

MANUAL DE CALIDAD DE JURAN

Quinta edición

Volumen III

Joseph M. Juran

Coeditor principal

A. Blanton Godfrey

Coeditor principal

Robert E. Hoogstoel

Editor asociado

Edward G. Schilling

Editor asociado



**MADRID • BUENOS AIRES • CARACAS • GUATEMALA • LISBOA • MÉXICO
NUEVA YORK • PANAMÁ • SAN JUAN • SANTAFÉ DE BOGOTÁ • SANTIAGO • SÃO PAULO
AUCKLAND • HAMBURGO • LONDRES • MILÁN • MONTREAL • NUEVA DELHI • PARÍS
SAN FRANCISCO • SIDNEY • SINGAPUR • ST. LOUIS • TOKIO • TORONTO**

Traducción

Miembros del Dpto. de Innovación y Tecnología de E.O.I.

José Miguel Torrecilla Pérez

Mireya Valero de Bernabé

Jesús Saiz Saiz

Manuel Núñez Bonilla

Colaboradores del Dpto. de Innovación y Tecnología de E.O.I.

Manuel López Pellicer

Isabel Vallecillo Rubira

Coordinación y Revisión Técnica

José Ramón Zaratiegui

Director de Programas de E.O.I

Prólogo del Instituto Juran

Ignacio Babé

Director

MANUAL DE CALIDAD DE JURAN

No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, por fotocopia, por registro u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito de los titulares del Copyright.

DERECHOS RESERVADOS © 2001, respecto a la quinta edición en español, por
McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S. A. U.

Edificio Valrealty, 1.ª planta
Basauri, 17
28023 Aravaca (Madrid)

Traducido de la quinta edición en inglés de:
JURAN'S QUALITY HANDBOOK
Copyright © MCMXCIX, por McGraw-Hill, Inc.
ISBN: 0-07-034003-X.

ISBN (Volumen III): 84-481-3286-6
ISBN (Obra completa): 84-481-3283-1
Depósito legal: M. 26.998-2001

Editor: Antonio García Brage
Cubierta: Design Master Dima
Compuesto en FER, Fotocomposición, S. A.
Impreso en Edigrafos, S. A.

IMPRESO EN ESPAÑA - PRINTED IN SPAIN

CONTENIDO

Colaboradores	ix
Prólogo a la quinta edición	xii
Prólogo a la edición española	xv
Volumen I	
1. CÓMO UTILIZAR ESTE MANUAL	1.1
J. M. Juran	
2. CÓMO PENSAR SOBRE LA CALIDAD	2.1
J. M. Juran	
3. EL PROCESO DE PLANIFICACIÓN DE LA CALIDAD	3.1
John F. Early y O. John Coletti	
4. EL PROCESO DE CONTROL DE LA CALIDAD	4.1
J. M. Juran y A. Blanton Godfrey	
5. EL PROCESO DE MEJORA DE LA CALIDAD	5.1
J. M. Juran	
6. GESTIÓN DE LOS PROCESOS	6.1
James F. Riley, Jr.	
7. CALIDAD Y RENTABILIDAD	7.1
J. M. Juran	
8. CALIDAD Y COSTES	8.1
Frank M. Gryna	
9. MEDICIÓN, INFORMACIÓN Y TOMA DE DECISIONES	9.1
Thomas C. Redman	
10. APLICACIONES DE LOS ORDENADORES A LOS SISTEMAS DE CALIDAD ..	10.1
Fredric I. Orkin y Daniel P. Olivier	
11. LA FAMILIA DE NORMAS INTERNACIONALES ISO 9000	11.1
Donald W. Marquardt	
12. BENCHMARKING	12.1
Robert C. Camp e Irving J. DeToro	

VI Contenido

13. DESPLIEGUE ESTRATÉGICO	13.1
Joseph A. DeFeo	
14. GESTIÓN DE LA CALIDAD TOTAL	14.1
A. Blanton Godfrey	
15. RECURSOS HUMANOS Y CALIDAD	15.1
W. R. Garwood y Gary L. Hallen	
16. FORMACIÓN PARA LA CALIDAD	16.1
Gabriel A. Pall y Peter J. Robustelli	
17. GESTIÓN DE PROYECTOS Y DESARROLLO DE PRODUCTOS	17.1
Gerard T. Paul	
18. INVESTIGACIÓN DE MERCADOS Y MARKETING	18.1
Frank M. Gryna	
19. CALIDAD EN LOS PROCESOS DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO	19.1
Al C. Endres	

Volumen II

20. DESARROLLO DEL SOFTWARE	20.1
Lawrence Bernstein y C. M. Yuhas	
21. RELACIONES CON LOS PROVEEDORES	21.1
John A. Donovan y Frank P. Maresca	
22. OPERACIONES	22.1
Frank M. Gryna	
23. INSPECCIÓN Y ENSAYO	23.1
E. F. «Bud» Gookins	
24. TALLERES INDUSTRIALES	24.1
Leonard A. Seder	
25. SERVICIO A LOS CLIENTES	25.1
Edward Fuchs	
26. OPERACIONES ADMINISTRATIVAS Y DE APOYO	26.1
James A. F. Stoner, Charles B. Wankel y Frank M. Werner	
27. INDUSTRIAS DE FABRICACIÓN	27.1
Donald W. Marquardt	
28. LA CALIDAD EN LA INDUSTRIA DE ALTA TECNOLOGÍA	28.1
M. K. Detrano	
29. LA INDUSTRIA DEL AUTOMÓVIL	29.1
Yoshio Ishizaka	

	Contenido	VII
30. SECTORES DE VIAJES Y HOSTELERÍA	Patrick Mene	30.1
31. SERVICIOS GUBERNAMENTALES: REDISEÑO DEL GOBIERNO FEDERAL ..	Al Gore	31.1
32. LOS SERVICIOS SANITARIOS	Donald M. Berwick y Maureen Bisognano	32.1
33. EL SECTOR DE LOS SERVICIOS FINANCIEROS	Charles A. Aubrey II y Robert E. Hoogstoel	33.1
34. SISTEMAS DE CALIDAD DE DATOS DE SEGUNDA GENERACIÓN	Thomas C. Redman	34.1
35. CALIDAD Y SOCIEDAD	J. M. Juran	35.1
36. LA CALIDAD Y LA CULTURA NACIONALES	J. M. Juran	36.1
37. LA CALIDAD EN LOS PAÍSES EN VÍAS DE DESARROLLO	Lennart Sandholm	37.1
38. LA CALIDAD EN EUROPA OCCIDENTAL	Tito Conti	38.1
39. LA CALIDAD EN EUROPA CENTRAL Y ORIENTAL	Robert E. Hoogstoel	39.1
40. LA CALIDAD EN LOS ESTADOS UNIDOS	J. M. Juran	40.1
41. LA CALIDAD EN JAPÓN	Yoshio Kondo y Noriaki Kano	41.1

Volumen III

42. LA CALIDAD EN LA REPÚBLICA POPULAR CHINA	Yuanzhang Liu	42.1
43. LA CALIDAD EN AMÉRICA LATINA	Marcos E. J. Bertin	43.1
44. MÉTODOS ESTADÍSTICOS BÁSICOS	Edward J. Dudewicz	44.1
45. CONTROL ESTADÍSTICO DEL PROCESO	Harrison M. Wadsworth	45.1

VIII Contenido

46. MUESTREO DE ACEPTACIÓN	46.1
Edward G. Schilling	
47. DISEÑO Y ANÁLISIS DE EXPERIMENTOS	47.1
J. Stuart Hunter	
48. CONCEPTOS DE FIABILIDAD Y ANÁLISIS DE DATOS	48.1
William Q. Meeker, Luis A. Escobar, Necip Doganaksoy y Gerald J. Hahn	
Apéndice I. Glosario de símbolos y abreviaturas	AI.1
Apéndice II. Tablas y gráficos	AII.1
Apéndice III. Selección de normas, especificaciones y documentos relacionados con la calidad	AIII.1
Apéndice IV. Terminología de los sistemas de calidad	AIV.1
Apéndice V. Herramientas de mejora de la calidad	AV.1
Apéndice VI. Juran Institute. Información general e historia de la compañía ..	AVI.1
Apéndice VII. Juran Institute y Seis Sigma. El camino hacia la excelencia	AVII.1
Índice de nombres	I.1
Índice de materias	II.1

CONCEPTOS BÁSICOS

1.1 UNA VISIÓN HISTÓRICA DE LA CALIDAD

Escuche al presidente de una compañía de fabricación de moldes especializados: “Los costos de desperdicio y retrabajo este año fueron de cinco veces nuestra ganancia. Debido a eso hemos tenido que incrementar el precio de venta y en consecuencia perdimos participación de mercado. Ahora la calidad no sólo es una característica técnica; es una característica del negocio”.

¿Tiene esta compañía una reputación de calidad marginal en el mercado? No. Los clientes la clasifican como la que ofrece la mejor calidad. Pero el anticuado enfoque de inspección le ha fallado –y ha emprendido un nuevo enfoque.

Nuestros antecesores –hasta donde sabemos– estaban conscientes de que la calidad es importante. Metrología, especificaciones, inspección –todo viene de siglos atrás, antes de la era cristiana.

Llegó el siglo veinte. Se aceleró el paso con una larga procesión de actividades “nuevas” e ideas que surgieron con un arreglo cautivador de nombres: control de calidad, planeación de la calidad, mejoramiento continuo de la calidad, prevención de defectos, control estadístico de procesos, ingeniería de confiabilidad, análisis de costos de la calidad, cero defectos, control total de calidad, certificación del proveedor, círculos de calidad, auditoría de la calidad, aseguramiento de la calidad, función despliegue de calidad, métodos de Taguchi, comparación competitiva (contramarcas o *benchmarking*). Este libro analizará estos conceptos.

Después de la Segunda Guerra Mundial, surgieron dos corrientes importantes que han tenido un profundo impacto en la calidad.

La primera corriente es la revolución japonesa de la calidad. Antes de la Segunda Guerra Mundial la calidad de los productos se percibía, en todo el mundo, como muy baja. Para ayudar a vender sus productos en mercados internacionales, los japoneses dieron algunos pasos revolucionarios para mejorar la calidad:

1. La alta administración se hizo cargo personalmente de llevar a cabo los cambios.
2. Todos los niveles y funciones recibían entrenamiento en las disciplinas de calidad.
3. Los proyectos de mejoramiento de la calidad se pusieron en marcha como un proceso continuo —a un paso revolucionario.

El éxito japonés fue casi legendario.

La segunda corriente fue el realce que se dio a la calidad del producto en la mente del público. Varias tendencias convergieron en este énfasis: los casos de demanda sobre el producto, la preocupación sobre el medio ambiente, algunos desastres enormes y otros casi desastres, la presión de las organizaciones de consumidores y la conciencia del papel de la calidad en el comercio, las armas y otras áreas de competencia internacional.

Estas dos corrientes importantes, combinadas con otras, dieron como resultado (para muchas compañías) un escenario cambiante en las condiciones de los negocios que caen necesariamente en el parámetro de la calidad.

1.2 CONDICIONES CAMBIANTES DE LOS NEGOCIOS RESPECTO A LA CALIDAD

La consecuencia de las corrientes que se acaban de identificar es que la calidad se convirtió en una prioridad fundamental para la mayoría de las organizaciones. Esta realidad se ha desarrollado a través de muchas condiciones cambiantes que incluyen:

1. *Competencia.* En el pasado, una calidad mayor significaba por lo general la necesidad de pagar un precio más alto. Hoy, los clientes pueden obtener alta calidad y precios bajos al mismo tiempo. Entonces, no es suficiente tener una “buena imagen de calidad”. Si los costos internos para lograr esa imagen (inspección de muestras, retrabajo, desperdicio) son altos, una compañía perderá ventas por sus precios más altos, necesarios para cubrir estos costos de baja calidad.
2. *Clientes que cambian.* Algunas empresas intentan entrar a los mercados industriales o del consumidor por primera vez. Por ejemplo, un pequeño fabricante de tractores agrícolas para el campesino independiente produce ahora monoblocks para un fabricante importante de automóviles. Este cliente industrial no sólo pide prioridad en términos del volumen sino que exige más sobre el “sistema de calidad”.
3. *Mezcla de productos que cambia.* Por ejemplo, un fabricante de computadoras ha cambiado de una mezcla de volumen principal bajo con un precio alto a una mezcla que incluye un volumen alto y un precio bajo. Estas nuevas líneas de productos dan como resultado la necesidad de reducir los costos internos de baja calidad.

4. *Complejidad del producto.* Conforme los sistemas se vuelven más complejos, los requerimientos de confiabilidad para los proveedores de componentes son más rigurosos.
5. *Niveles más altos en las expectativas de los clientes.* Las mayores expectativas, combinadas con la competencia, toman muchas formas. Un ejemplo es la menor variabilidad alrededor de un valor meta sobre la característica de un producto aun cuando el producto completo cumpla con los límites especificados. Otra forma de expectativas más altas es una mejor calidad en el servicio antes y después de la venta.

Las condiciones de los negocios en años pasados se apoyaban en enfoques más sencillos de calidad, por ejemplo, la inspección del producto para controlar la calidad y la incorporación de los costos internos de la baja calidad en el precio de venta. Para ser justo con el pasado se dirá que esos enfoques dieron resultados admirables para muchas compañías en aquellas condiciones. Pero, ¿funcionarán en las condiciones actuales? No. Las condiciones siempre cambiantes del comercio actual requiere nuevos enfoques si las empresas quieren sobrevivir en los mercados competitivos del mundo.

Antes de aprender estos nuevos enfoques es necesario definir algunos términos.

1.3 DEFINICIÓN DE “CALIDAD”

El diccionario tiene muchas definiciones de “calidad”. Una definición breve que tiene mucha aceptación es: *la calidad es la satisfacción del cliente*. “Adecuado para el uso” es una buena definición alternativa.

Aunque una definición tan breve tiene un punto central, debe desarrollarse para proporcionar una base para la acción.

La extensión de esta definición comienza con la palabra “cliente”. Un cliente es aquel a quien un producto o proceso impacta:

1. Los *clientes externos* incluyen no sólo al usuario final sino también a los procesadores intermedios y a los comerciantes. Otros clientes no son compradores sino que tienen alguna conexión con el producto, como los cuerpos regulatorios gubernamentales.
2. Los *clientes internos* incluyen tanto a otras divisiones de una compañía a las que se proporcionan componentes para un ensamble, como a otros a los que afecta, por ejemplo un departamento de compras que recibe una especificación de ingeniería para una readquisición.

Un “producto” es la salida de un proceso. Se pueden identificar tres categorías:

1. *Bienes:* por ejemplo, automóviles, tarjetas de circuitos, reactivos químicos.
2. *Software:* por ejemplo, un programa de computadora, un informe, una instrucción.
3. *Servicio:* por ejemplo, bancos, seguros, transporte. Los servicios incluyen también actividades de apoyo dentro de las empresas, como prestaciones para empleados, mantenimiento de plantas, apoyo secretarial.

A lo largo de este libro, “producto” significa bienes, software o servicios.

Ahora es necesario definir “satisfacción del cliente”. Ésta se logra a través de dos componentes: características del producto y falta de deficiencias. En la tabla 1.1 se muestran ejemplos de las categorías principales de estas dos componentes para las industrias de manufactura y servicios. Se pueden observar diferencias dramáticas dentro del sector de manufactura (ensambles contra reacciones químicas) y dentro del sector servicios (restaurantes contra bancos).

Un examen más detallado de las dos componentes revela un panorama más completo.

1. Las *características del producto* tienen un efecto importante en los *ingresos por ventas* (a través de participación de mercado, precios superiores, etcétera). En muchas industrias, la población total de clientes externos se puede dividir según el nivel o “grado” de calidad deseada. Así, el espectro de clientes conduce a una demanda de hoteles de lujo y hoteles económicos; a una demanda de refrigeradores con muchas características especiales al igual que de aquellos que sólo tienen capacidades básicas. Aumentar la calidad del diseño por lo general se traduce en costos más altos.
2. La *falta de deficiencias* tiene un mayor efecto en los costos a través de la reducción de desperdicio, retrabajo, quejas y otros resultados de ellas. Las “deficiencias” se establecen en diferentes unidades como: errores, defectos, fracasos, fuera de especifica-

TABLA 1.1

Dos componentes de la calidad

Industria de manufactura	Servicios
Características del producto	
Desempeño	Precisión
Confiabilidad	Realización a tiempo
Durabilidad	Integridad
Facilidad de uso	Ser amigable y cortés
Servicio	Anticipación a las necesidades del cliente
Estética	Conocimientos del servidor
Disponibilidad de opciones y posibilidad de expansión	Estética
Reputación	Reputación
Falta de deficiencias	
Producto sin defectos o errores a la entrega, durante el uso y durante el servicio	Servicio sin errores durante las transacciones de servicio original y futuras
Ventas, facturación y otros procesos sin errores	Ventas, facturación y otros procesos del negocio sin errores

ciones. La falta de deficiencias se refiere a la *calidad de conformancia*. Aumentar la calidad de conformancia casi siempre significa costos *menores*. Además, una conformación mejor quiere decir menos quejas y por lo tanto una mayor satisfacción del cliente.

La figura 1.1 muestra la interrelación de las características del producto y la falta de deficiencias y la manera en que esto lleva a mayores ganancias.

Para resumir, la calidad significa la satisfacción del cliente externo e interno. Las características del producto y la falta de deficiencias son los principales determinantes de la satisfacción. Por ejemplo, un cliente externo de un automóvil desea ciertas características de desempeño al mismo tiempo que un historial de pocos defectos y descomposturas. El departamento de manufactura como cliente interno del departamento de desarrollo del producto quiere una especificación de ingeniería que se pueda producir en la planta y que no tenga errores u omisiones. Ambos clientes quieren “bien hecho el producto correcto”.

1.4 LA FUNCIÓN DE CALIDAD

El logro de la calidad requiere el desempeño de una amplia variedad de actividades identificadas o de tareas de calidad. Los ejemplos obvios son el estudio de las necesidades de calidad de los clientes, la revisión del diseño, las pruebas del producto y el análisis de la quejas reales. En una empresa pequeña unas cuantas personas puede llevar a cabo todas estas tareas (a veces llamadas elementos de trabajo). Sin embargo, conforme crece la empresa, las tareas específicas pueden llegar a ser tan tardadas que deben crearse departamentos especializados para realizarlas. Las corporaciones han creado departamentos tales como de diseño del producto, de manufactura, de inspección y prueba, etcétera, que son esenciales para lanzar cualquier producto nuevo o mejorado. Estas funciones siguen una secuencia de eventos relativamente invariable (vea la espiral en la figura 1.2). Además de las actividades en la “línea” principal de la espiral, se necesitan muchas actividades

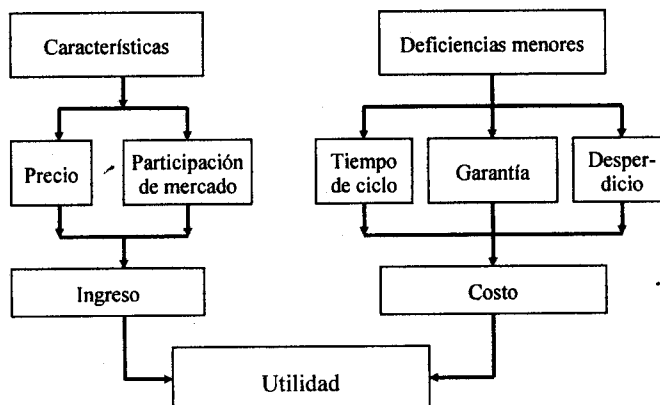


FIGURA 1.1

Calidad, participación de mercado y retorno sobre la inversión. (Tomado de Juran Institute, Inc., 1990.)

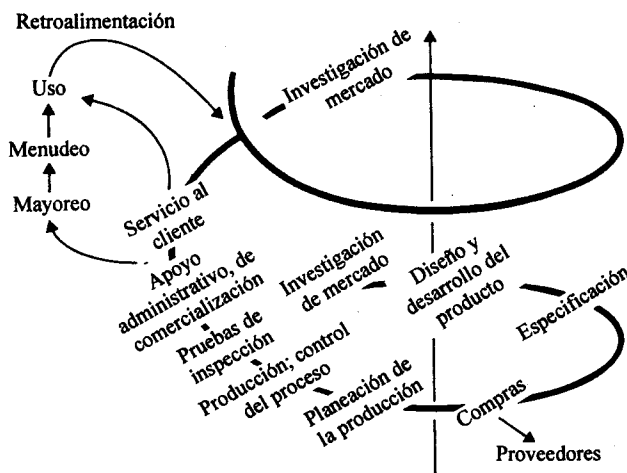


FIGURA 1.2
Espiral del progreso en la calidad.

administrativas y de apoyo como finanzas, recursos humanos, distribución y ventas y procesamiento de datos.

Es evidente, en la espiral, que deben realizarse muchas actividades y tareas para lograr la adecuación para el uso. Algunas de éstas se realizan dentro de las compañías de manufactura o servicio. Otras las llevan a cabo otras personas, por ejemplo, proveedores, comerciantes o legisladores. Es conveniente tener un nombre corto para esta colección de actividades; el término no usual es “función de calidad”. La función de calidad es la colección completa de actividades a través de las cuales se logra la adecuación para el uso, sin importar en dónde se realicen.

Algunas personas del ramo ven la espiral o la función de calidad como un sistema, es decir, una red de actividades o subsistemas. Algunos de estos subsistemas corresponden a segmentos de la espiral. Otros, aunque no se muestran en la espiral, están de todas formas, presentes y activos, como el procesamiento de datos y la estandarización. Estos subsistemas, cuando se diseñan y coordinan bien, se convierten en sistemas unificados que realizan los objetivos establecidos de calidad.

El alcance tradicional de las actividades de calidad está sufriendo un cambio radical e inesperado del énfasis histórico sobre la calidad del producto en la industria de la transformación (“pequeña Q”) a lo que ahora surge como la aplicación de los conceptos de calidad a todos los productos, todas las actividades funcionales y todas las industrias (“gran Q”)*. La tabla 1.2 resume estos cambios de horizonte.

La tabla 1.3 ilustra este mayor alcance basado en el concepto de un triple papel. Bajo este concepto, todos los trabajos incluyen tres papeles para el que los realiza: el cliente que recibe insumos de información y bienes físicos; el procesador que convierte estos insumos

* *Nota del traductor:* se conservará “Q” de “quality” en inglés para no crear confusión con la letra “C” que se usa tanto.

TABLA 1.2
Pequeña Q y gran Q

Tema	Contenido de la pequeña Q	Contenido de la gran Q
Productos	Bienes manufacturados	Todos los productos, bienes y servicios, sean o no para venta
Procesos	Procesos relacionados directamente con la fabricación de bienes	Todos los procesos; apoyo a la manufactura; negocios, etc.
Industrias	Manufactura	Todas las industrias, manufactura, servicios, gobierno, etc., sean o no lucrativas

en productos (resultados); el proveedor que distribuye los productos resultantes a los clientes.

La tabla 1.3 proporciona unos cuantos ejemplos de actividades en cada uno de los tres papeles de una función financiera y de una función de desarrollo de producto. La figura 1.3 muestra la forma en que una organización, la AT&T Paradyne, identifica las acciones realizadas en cada uno de estos tres papeles en la búsqueda del mejoramiento continuo.

1.5 ADMINISTRACIÓN DE LA CALIDAD

La administración de la calidad es el proceso de identificar y administrar las actividades necesarias para lograr los objetivos de calidad de una organización. Una manera útil para ilustrar los elementos básicos de la administración de la calidad es trazar una paralela a una función bien establecida, específicamente la de finanzas (Juran, 1986).

TABLA 1.3
Ejemplos del triple papel de cliente/usuario, procesador y proveedor

Cliente/usuario	Procesador	Proveedor
Función de finanzas (datos financieros)		
Recibe datos básicos de varias fuentes	Establece sistemas de procesamiento de datos	Publica informes
Recibe retroalimentación de informes publicados	Procesa datos y obtiene resúmenes	Reparte a clientes internos y externos
	Analiza datos y prepara informes	
Función de desarrollo del producto		
Recibe información sobre necesidades de los clientes	Crea conceptos para nuevos productos	Proporciona especificaciones a departamentos de manufactura
Recibe datos sobre desempeño real	Desarrolla diseños de productos	Proporciona especificaciones y otros requerimientos a departamentos de compras
	Planea y conduce pruebas de prototipos	

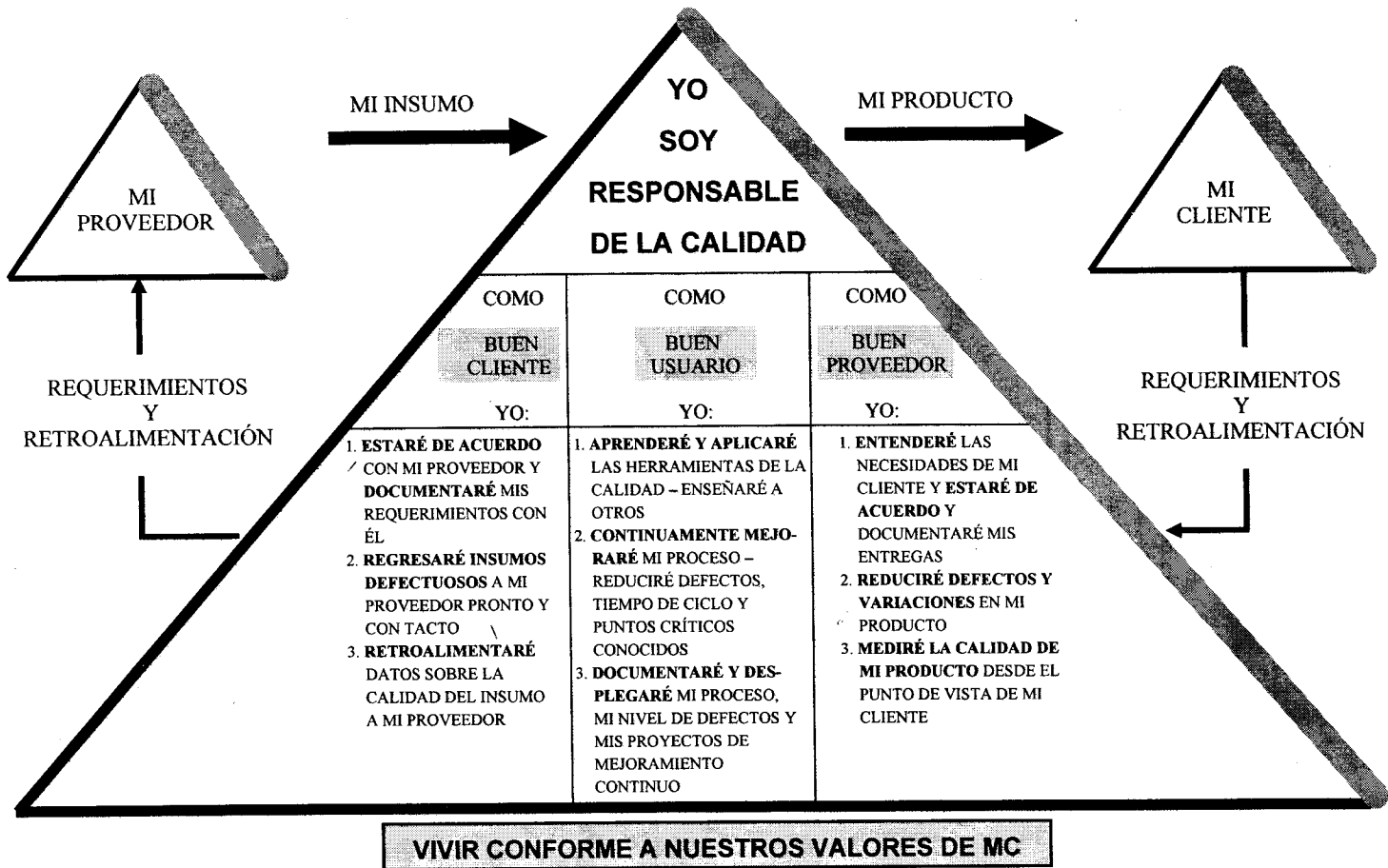


FIGURA 1.3

AT&T Paradyne: prácticas de mejoramiento continuo. (Tomado de AT&T Paradyne Continuous Improvement Leadership Team.)

La administración financiera se logra mediante el uso de tres procesos administrativos: planeación, control y mejoramiento. Algunos elementos importantes de estos tres procesos se muestran en la tabla 1.4. Estos mismos procesos se aplican a la calidad. Los tres procesos financieros proporcionan un enfoque metódico a las finanzas; los tres procesos de calidad proporcionan un enfoque metódico a la calidad. De especial importancia es el hecho de que cada uno de los tres procesos de calidad se puede definir con más detalle como una secuencia general de actividades. La tabla 1.5 resume esta secuencia. En capítulos posteriores se profundizará en estos “mapas de caminos”.

Los tres procesos de la trilogía de calidad se interrelacionan. La figura 1.4 muestra la interrelación aplicada a una de las dos componentes de la definición de calidad, la falta de deficiencias. Esta figura es de gran importancia. Por ejemplo, observe la distinción de la gráfica entre un problema de calidad ruidoso *esporádico* y el *desperdicio* crónico silencioso. El problema esporádico se detecta y el proceso de *control de calidad* toma medidas. El problema crónico requiere un proceso diferente, a saber, el de *mejoramiento de la calidad*. Los capítulos posteriores desarrollarán estos conceptos con más detalle.

Para que la trilogía del proceso de calidad sea un marco de referencia útil para lograr los objetivos de calidad, es necesario que los procesos se apoyen en un fundamento de

TABLA 1.4

Procesos financieros

Proceso	Algunos elementos
Planeación financiera	Presupuesto
Control financiero	Medida del gasto
Mejoramiento financiero	Reducción de costos

TABLA 1.5

Procesos generales para la administración de la calidad

Planeación de la calidad	Control de calidad	Mejoramiento de la calidad
Establecer metas de calidad	Elegir elementos de control	Probar la necesidad
Identificar a los clientes	Elegir unidades de medida	Identificar proyectos
Descubrir necesidades de los clientes	Establecer metas	Organizar equipos por proyectos
Desarrollar características de productos	Crear un sensor	Diagnosticar causas
Desarrollar características de procesos	Medir el desempeño real	Proporcionar remedios, probar que los remedios son efectivos
Establecer controles de procesos, transferir operaciones	Interpretar la diferencia	Manejar la resistencia al cambio
	Actuar contra la diferencia	Controlar para mantener las ganancias

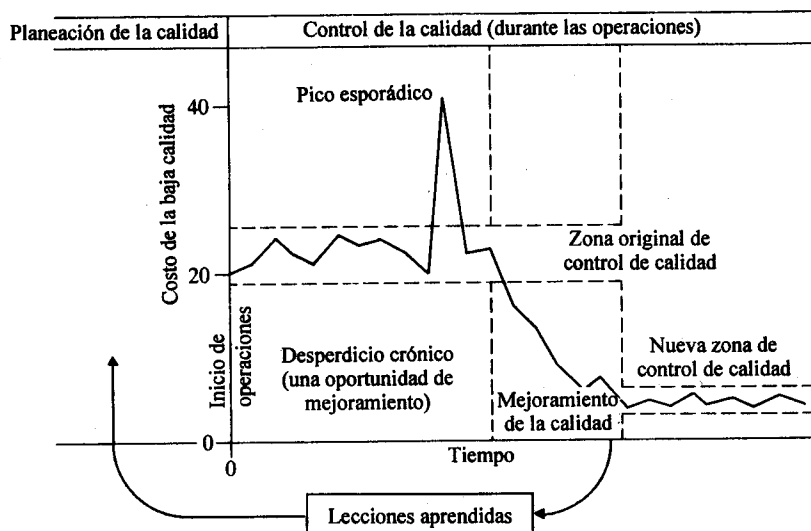
**FIGURA 1.4**

Diagrama de la trilogía de Juran. (Tomado de Juran, 1986.)

liderazgo inspiracional y prácticas sobre el medio ambiente que favorezcan la calidad. Sin esta “cultura” de calidad, la trilogía de los procesos de calidad no será totalmente efectiva. Estos elementos tienen un impacto sobre las personas en todos los niveles. De nuevo, los capítulos posteriores proporcionarán explicaciones adicionales.

1.6 CALIDAD, COSTOS Y PROGRAMACIÓN

Si se da importancia a la calidad, ¿tiene esto un impacto positivo o negativo sobre los costos y la programación? Los tres parámetros deben ser compatibles entre sí; en forma realista, puede tratarse de fuerzas de apoyo o fuerzas opuestas.

Enfatizar la calidad puede ser un apoyo que identifique y elimine las causas de los errores y el retrabajo, reduciendo costos y logrando que haya más unidades de producto disponibles para cumplir con las fechas de entrega. Por otro lado, un esfuerzo mal dirigido por alcanzar la calidad puede ser causa de problemas tanto con los costos como con la programación, al diseñar características innecesarias para un producto, al especificar tolerancias irreales y al permitir el perfeccionismo en la inspección.

Un énfasis exagerado en los costos y tiempos de entrega puede tener un impacto mortal sobre la calidad al no permitir suficiente tiempo y recursos para lograr una buena calidad y al tomar la decisión de embarcar producto de calidad marginal con el fin de cumplir con el programa de entregas y evitar los costos del retrabajo.

En un problema al final de capítulo, se pedirá al lector que calcule los beneficios obtenidos de un programa de mejoramiento de la calidad en cuanto al ahorro en el costo, los programas de entrega y la productividad.

1.7 DISCIPLINAS DE CALIDAD Y OTRAS DISCIPLINAS

Este libro analizará los conceptos, herramientas, técnicas, etcétera, esenciales para la competencia moderna de calidad. “Disciplinas de calidad” es el término usado para denotar el cuerpo de conocimientos relacionados con la calidad. En un principio este conocimiento se aplicó a la calidad de los procesos de manufactura de bienes físicos (pequeña Q). Como el alcance de las actividades de calidad se ha expandido a todos los procesos –y a los clientes externos e internos– los conocimientos de otras disciplinas son útiles. Las contribuciones de otras disciplinas a veces son únicas y otras se traslapan con las disciplinas de calidad. La tabla 1.6 muestra un resumen de las contribuciones de todas las disciplinas. A través del libro se identificarán las aplicaciones potenciales.

1.8 PERSPECTIVA DE CALIDAD: INTERNA CONTRA EXTERNA

Como panorama general del resto de este libro, la tabla 1.7 muestra dos puntos de vista de calidad: el interno convencional que todavía se aplica en muchas organizaciones y el

TABLA 1.6
Contribuciones de diferentes disciplinas

Disciplina	Ejemplo de contribución
Finanzas	Medida del costo de la calidad baja
Ingeniería industrial	Diseño de sistemas integrados, medidas, solución de problemas, análisis del trabajo
Investigación de mercado	Competitividad de la calidad; entendimiento de los deseos del cliente
Administración de operaciones	Administración de sistemas integrados
Investigación de operaciones	Análisis de las alternativas de diseño del producto para optimización
Comportamiento organizacional	Entendimiento de la cultura de calidad; formación de equipos eficientes
Efectividad organizacional	Satisfacción de las necesidades de clientes tanto internos como externos
Planeación estratégica	La calidad como medio para lograr una ventaja competitiva única
Ingeniería de sistemas	Traducción de las necesidades del cliente a características del producto y del proceso
Ingeniería del valor	Análisis de las funciones esenciales requeridas por el cliente

TABLA 1.7

Dos puntos de vista de la calidad

Punto de vista interno	Punto de vista externo
Comparar el producto con las especificaciones	Comparar el producto con la competencia y con el mejor
Aceptar el producto en la inspección	Proporcionar satisfacción sobre la vida del producto
Prevenir defectos de planta y de aplicación	Cumplir con las necesidades del cliente de bienes y servicios
Concentrarse en la manufactura	Cubrir todas las funciones
Usar medidas de calidad internas	Usar medidas de calidad basadas en el cliente
Ver la calidad como un aspecto técnico	Ver la calidad como un aspecto de negocios
Coordinar los esfuerzos con calidad administrativa	Dirigir los esfuerzos mediante la alta administración

Fuente: Juran Institute, Inc. (1990).

externo moderno que muchas organizaciones encuentran imperativo para sobrevivir. Está pendiente de algunos aspectos obvios y de otros más sutiles de los elementos de esta tabla.

La reciente importancia que se da a la satisfacción del cliente, a la amplia aplicación de los conceptos de calidad, y a la participación de todos los empleados, ha dado lugar a un nuevo nombre –administración de calidad total, ACT (ACT = TQM, siglas que corresponden a “Total Quality Management”). La ACT es el sistema de actividades dirigidas al logro de clientes complacidos, empleados capaces, ingresos mayores y costos más bajos. Este sistema se desglosará a lo largo de este libro.

RESUMEN

- La calidad es la satisfacción del cliente.
- La calidad tiene dos componentes: las características del producto y la falta de deficiencias.
- Las características del producto afectan el ingreso.
- La falta de deficiencias afecta los costos.
- El logro de la calidad requiere actividades en todas las funciones de la organización.
- Las actividades tradicionales de calidad se han concentrado en la manufactura (“pequeña Q”); las actividades de calidad modernas engloban a todas las actividades (“gran Q”).
- Todos los trabajos tiene tres elementos: cliente, procesador y proveedor.
- Se pueden identificar tres procesos de calidad: planeación de la calidad, control de la calidad, mejoramiento de la calidad. Cada proceso tiene una lista definida de pasos.
- Los problemas de calidad esporádicos y crónicos requieren enfoques diferentes.
- Los costos, la calidad y la programación pueden ser compatibles entre sí.

- La administración de la calidad se apoya en conocimientos de muchas otras disciplinas.
- Los puntos de vista interno y externo sobre la calidad son ambos esenciales.
- La administración de calidad total (ACT) es el sistema de actividades dirigidas al logro de clientes complacidos, empleados capaces, ingresos mayores y costos más bajos.

PROBLEMAS

- 1.1. Para la satisfacción del cliente, el software de computadora no debe tener errores ni “virus”, y también debe tener las características de producto necesarias. Enumere algunas características importantes de un paquete de software de procesamiento de palabras.
- 1.2. La calidad se ha definido como la satisfacción del cliente (o la “adecuación para el uso”). La calidad también puede definirse como “conformancia con las especificaciones”. En teoría, si se crean las especificaciones adecuadas y después se fabrica un producto que cumpla con esas especificaciones, debe llegarse a la satisfacción del cliente. Pero caray, la vida no es tan sencilla. Considere las siguientes cuatro situaciones para un producto.

- Conformar con las especificaciones; es competitivo en su adecuación
- Conformar con las especificaciones; no es competitivo en su adecuación
- No conformar con las especificaciones; es competitivo en su adecuación
- No conformar con las especificaciones; no es competitivo en su adecuación

¿Cuáles de ellas no son, en teoría, factibles, pero en la práctica ocurren (y causan mucha confusión y preocupación)? ¿Puede citar algunos ejemplos?

- 1.3 Seleccione un departamento funcional en una organización de manufactura o servicio, como el departamento de desarrollo del producto.
 - a) Para el departamento elegido, enumere dos clientes internos. Por ejemplo, es probable que el departamento de manufactura sea un cliente interno del de desarrollo del producto.
 - b) Para cada cliente interno, describa en una oración un requerimiento probable de ese cliente que deba cumplir el departamento proveedor.
 - c) Proponga una medida que se pueda usar para cuantificar qué tan bien se está cumpliendo el requerimiento.
- 1.4 Por cada 100 unidades de un producto fabricado, cierto proceso da 85 unidades conformantes, 5 que son desperdicio y 10 que se pueden reprocesar. Cada unidad de desperdicio significa una pérdida de \$50; cada unidad reprocesada requiere .05 hora de tiempo de retrabajo adicional. El recurso tiempo para producir las 100 unidades originales es 20 horas.
 - a) Calcule el costo de desperdicio, de tiempo de retrabajo y la productividad por hora. La productividad debe calcularse en términos de las unidades conformantes por hora de insumo de recurso.
 - b) Se acaba de introducir con éxito un programa de mejoramiento de la calidad. Por cada 100 unidades fabricadas, el proceso ahora obtiene 95 unidades conformantes, 1 de desperdicio y 4 para retrabajo. Repita los cálculos del inciso a). ¿Cuáles son los beneficios cuantitativos de esforzarse por la calidad, respecto a la programación de entregas y a la productividad?

REFERENCIAS

Juran, J. M. (1986). "The Quality Trilogy", *Quality Progress*, agosto, pp. 19-24.

Juran Institute, Inc. (1990). "Management of Quality Manufacturing", notas del curso, Wilton, Connecticut.

LECTURAS COMPLEMENTARIAS

Historia de la calidad: *Juran's Quality Control Handbook*, 4ª ed. (QCH4), McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1988, pp. 35G.1-35G.7.

Definición de calidad: QCH4, pp.2.2-2.4.

Adecuación para el uso: QCH4, pp. 2.8-2.11.

Enfoques de expertos: Lowe, Theodore A. y Joseph M. Mazzeo, "Lessons Learned from the Masters -Experiences in Applying the Principles of Deming, Juran and Crosby", *ASQC Quality Congress Transactions*, Milwaukee, 1988, pp. 397-402.

Calidad y otras disciplinas: Golonski, William A. "Social Science Aspects of Quality", *Proceedings of Conference on Quality in the Year 2000*, Rochester Institute of Technology, Junio 10, 1992, Rochester, N.Y.

Notas del revisor técnico: también se pueden consultar:

Juran, J. M. "China's Ancient History of Managing for Quality", *Quality Progress*, julio, 1990, pp. 31-35.

La ASQC es la *American Society for Quality Control* (Sociedad Norteamericana para el Control de la Calidad).

Edición en español de: *Manual de Control de Calidad*, J. M. Juran, Frank M. Gryna, 4ª edición, McGraw Hill / Interamericana de España, S. A., 1993.

CAPÍTULO

2

APRECIACIÓN DE LA CALIDAD EN TODA LA COMPAÑÍA

2.1 ¿POR QUÉ EVALUACIÓN?

En la últimas décadas, el movimiento de calidad ha sido bombardeado por una procesión interminable de técnicas nuevas con promesas parecidas a los milagros. Ha habido éxitos; ha habido fracasos. Una evaluación formal de la calidad es un punto de partida para el entendimiento de 1) la dimensión del problema de calidad y 2) las áreas que demandan atención. Se puede desarrollar una estrategia manteniendo los pies en la tierra.

“Evaluación de la calidad” será el término que se use para describir una revisión del estado de la calidad en toda la compañía.

La evaluación de la calidad comprende:

1. Costo de la baja calidad
2. Posición en el mercado
3. Cultura de calidad en la organización
4. Operación del sistema de calidad de la compañía.

Se pueden agregar otros elementos según lo requieran las circunstancias. Por lo general se hace una evaluación anual o una cada dos años.

Se comenzará con la evaluación del costo de la baja calidad.

2.2 COSTO DE LA BAJA CALIDAD

Todas las organizaciones utilizan el concepto de la identificación de los costos necesarios para llevar a cabo las distintas funciones –desarrollo del producto, comercialización, personal, producción, etc. Hasta la década de 1950 este concepto no se había extendido a la función de calidad excepto en las actividades departamentales de inspección y prueba. Había, por supuesto, muchos otros costos relacionados con la calidad, pero se encontraban dispersos entre las distintas partidas, en especial la de “costos generales”.

Durante los 50s surgió el concepto de “costos de calidad”. Cada persona asignó un significado diferente a este término. Algunos igualaron los costos de calidad con los costos de *lograr* la calidad; algunos otros igualaron el término con los costos en que se incurre al tener baja calidad. En este libro se dará el enfoque de los costos de la baja calidad. Esta componente de la evaluación resultará importante para la reducción de costos.

2.3 CATEGORÍAS DE COSTOS DE CALIDAD

Muchas compañías resumen estos costos en cuatro grandes categorías. Enseguida se analizarán estas categorías y los ejemplos de subcategorías típicas. (ASQC, 1986 es una fuente que incluye detalles de estas cuatro categorías. Una fuente que aplica estas mismas categorías a los servicios y a la banca es Aubrey y Zimbley, 1982.)

Costos de fallas internas

Éstos son los costos asociados con defectos (errores, no conformancia, etc.) que se encuentran antes de transferir el producto al cliente. Son costos que desaparecerían si no existieran defectos en el producto antes de la entrega. Ejemplos de estas subcategorías son:

Desperdicio: mano de obra, material y (casi siempre) costos generales de los productos defectuosos que no es económico reparar. Los títulos son numerosos –desperdicio, desecho, defectuosos, basura, etcétera

Retrabajo: el costo de corregir los defectos para hacer que satisfagan las especificaciones

Análisis de fallas: costos de analizar los productos no conformantes para determinar las causas

Materiales de desperdicio y retrabajo: costos de desperdicio y retrabajo debidos a productos no conformantes recibidos de los proveedores

Inspección del 100%: costos de encontrar unidades defectuosas en lotes de productos que contienen niveles inaceptables de productos defectuosos

Reinspección y volver a probar: costos de volver a inspeccionar y probar los productos que han pasado por retrabajo u otra revisión

Pérdidas de proceso evitables: costos de las pérdidas que ocurren aun con productos conformantes –por ejemplo, sobrellenar contenedores (que van a los clientes) debido a una variabilidad excesiva en el equipo de llenado y medición

Rebajas: la diferencia entre el precio normal de venta y el precio reducido por razones de calidad

Costos de fallas externas

Estos costos están asociados con defectos que se encuentran después de mandar el producto al cliente. Estos costos también desaparecerían si no hubiera defectos. Los ejemplos son:

Costos de garantía: costos de remplazo o reparación de productos que están dentro del periodo de garantía

Conciliación de quejas: Costos de investigación y conciliación de quejas justificadas atribuibles a un producto o instalación defectuosa

Material regresado: costos asociados con la recepción y remplazo de productos defectuosos recibidos del cliente

Concesiones: costos de concesiones hechas a los clientes cuando aceptan productos como están, abajo de los estándares, o productos conformantes que no cumplen las especificaciones de adecuación para el uso

Costos de evaluación

Éstos son costos en los que se incurre al determinar el grado de conformancia con los requerimientos de calidad. Los ejemplos son:

Inspección y prueba al recibir: costos de determinar la calidad de productos comprados, ya sea por inspección al recibir, por inspección en la fuente o por vigilancia

Inspección y prueba en proceso: costo de la evaluación en proceso de la conformancia con los requerimientos

Inspección y prueba final: costos de evaluación de la conformancia con los requerimientos para la aceptación del producto

Auditorías de la calidad del producto: costos de realizar auditorías de calidad sobre productos en proceso o terminados

Mantenimiento de la exactitud del equipo de prueba: costos de mantener los instrumentos y equipos de medición calibrados

Inspección y prueba de materiales y servicios: costos de materiales y provisiones para el trabajo de inspección y prueba (por ejemplo, película de rayos X) y los servicios generales (como energía eléctrica) cuando sean significativos

Evaluación del inventario: costos de probar productos almacenados para evaluar la degradación

Al recolectar los costos de apreciación, lo decisivo es el tipo de trabajo que se hace y no el nombre del departamento (el trabajo lo pueden realizar químicos en el laboratorio, muestreadores en producción, inspectores en el departamento de inspección o una empresa externa contratada para ese propósito).

Costos preventivos

Éstos son costos en los que se incurre al mantener los costos de fallas y de apreciación al mínimo. Los ejemplos son:

Planeación de la calidad: la organización de las actividades que juntas crean el plan global de calidad y los numerosos planes especializados; también la preparación de los procedimientos necesarios para comunicar estos planes a todos los involucrados

Revisión de nuevos productos: costos de ingeniería de confiabilidad y otras actividades relacionadas con la calidad asociadas con introducción de nuevos diseños

Control de procesos: costos de inspección y pruebas en proceso para determinar el estado del proceso y no la aceptación del producto

Auditorías de calidad: costos de evaluar las actividades del plan global de calidad

Evaluación de la calidad del proveedor: costos de evaluar las actividades de calidad del proveedor antes de la selección, de la auditoría de las actividades durante el contrato y de llevar a cabo esfuerzos asociados junto con el proveedor

Entrenamiento: costos de preparación e implantación de programas de entrenamiento relacionados con la calidad (como en el caso de la apreciación de costos, parte de este trabajo puede realizarlo alguien que no esté en la nómina del departamento de calidad: el criterio decisivo, de nuevo, es el tipo de trabajo y no el nombre del departamento que lo realiza)

La tabla 2.1 muestra un ejemplo de un estudio hecho para un fabricante de llantas. Se llegó en este caso a algunas conclusiones típicas de estos estudios:

- El total de casi \$900 000 anuales es grande.
- La mayor parte (79.1%) de este total se concentra en costos de fallas, en especial en “desperdicio” y conciliación de quejas.
- Los costos por fallas son alrededor de cinco veces los costos de evaluación.
- Se gasta una pequeña cantidad (4.3%) en prevención.
- Existen algunas consecuencias de la baja calidad que no se pudieron cuantificar en forma conveniente, como la “mala voluntad del cliente” y las “políticas de conciliación”. De todas maneras se mencionan estos factores como recordatorio de su existencia.

Como resultado de este estudio, la administración decidió aumentar el presupuesto para las actividades de prevención. Se asignaron tres ingenieros para identificar y plantear proyectos específicos de mejoramiento de la calidad.

Como definición estricta, el costo de la baja calidad es la suma de los costos en las categorías de fallas internas y externas. Esto supone que esos elementos de los costos de

TABLA 2.1
Costo anual de calidad para un fabricante de llantas

Costo de fallas de calidad (pérdidas)		
Inventario defectuoso	\$ 3 276	0.37%
Reparaciones a productos	73 229	8.31
Recolección de desperdicio	2 288	0.26
Desecho (basura)	187 428	21.26
Conciliación	408 200	46.31
Productos perecederos	22 838	2.59
Mala voluntad del cliente	No incluido	
Políticas de conciliación	No incluido	
Total	\$697 259	79.10%
Costo de evaluación		
Inspección al recibir	\$ 32 655	2.68
Inspección 1	32 582	3.70
Inspección 2	25 200	2.86
Inspección en el puesto	65 910	7.37
Total	\$147 347	16.61%
Costo de prevención		
Calidad en la planta local		
Ingeniería de control	7 848	0.89
Calidad corporativa		
Ingeniería de control	30 000	3.40
Total	\$ 37 848	4.29%
Gran total	\$882 454	100.00%

evaluación —por ejemplo, una inspección del 100%— que necesitan los procesos inadecuados se clasifican como fallas internas. En la práctica, algunos usan el término “costos de calidad” para las cuatro grandes categorías.

Al identificar las categorías detalladas del costo de la baja calidad, habrá algunas que sean cuestionables. La mayor parte de la controversia se centra en la afirmación de que éstos no son costos relacionados con la calidad sino parte de los gastos de operación normales, y por lo tanto, no deben incluirse. Un ejemplo es la inclusión de gastos generales además de los de mano de obra directa y materiales por desperdicio y retrabajo (vea más detalles en QCH4, p. 4.9-4.12). Una guía útil es hacer la pregunta: “Suponiendo que todos los defectos desaparecieran, ¿también desaparecería el costo en cuestión?” Una respuesta “sí” significa que el costo está asociado con problemas de calidad y debe entonces incluirse. Una respuesta “no” significa que no debe incluirse esta categoría en el costo de la baja calidad.

2.4 OBJETIVOS DE EVALUACIÓN

La compañías estiman los costos de calidad por varias razones:

1. Cuantificar la dimensión del problema de calidad en términos de dinero mejora la comunicación entre los administradores medios y la alta administración. En algunas

empresas la necesidad de mejorar la comunicación sobre asuntos relacionados con la calidad ha sido tan aguda que se ha convertido en un objetivo primordial para emprender un estudio de los costos de la baja calidad. Algunos administradores dicen: “No tenemos que gastar tiempo en traducir los defectos a dólares. Nos damos cuenta de que la calidad es importante y ya conocemos los problemas más importantes”. Pero casi siempre, cuando se hace un estudio, dos de los resultados sorprenden a estos administradores. Primero, los costos de calidad resultan ser mucho más altos de lo que pensaban – en muchas industrias más del 20% de las ventas. Segundo, mientras que la distribución de los costos de calidad confirma algunos problemas conocidos, revela además otras áreas problema que antes no se habían descubierto.

2. Se pueden identificar las oportunidades más importantes de reducción de costos. Los costos de la baja calidad no se encuentran como una masa homogénea, más bien son un conjunto de segmentos específicos, cada uno debido a una causa particular. Estos segmentos son de diferente tamaño, y unos cuantos son responsables del grueso de los costos. Un producto secundario importante de la evaluación de los costos de la baja calidad es la identificación de estos pocos segmentos vitales. Esto se cubrirá en el capítulo 3 como “el principio de Pareto”.
3. Se pueden identificar las oportunidades para reducir la falta de satisfacción del cliente y las amenazas asociadas con poder vender el producto. Algunos costos de baja calidad son el resultado de fallas que tienen lugar después de la venta. En parte, el fabricante paga estos costos en forma de cargos por garantía, quejas, etc. Pero ya sea que el fabricante pague estos costos o no, las fallas aumentan los costos del cliente por el tiempo perdido y las molestias. El análisis de los costos de manufactura, complementado con una investigación de mercado sobre los costos del cliente por baja calidad, puede identificar esas pocas áreas vitales de altos costos. Estas áreas llevan después a la identificación del problema.

2.5 RELACIÓN DEL GRAN TOTAL CON LAS MEDIDAS DEL NEGOCIO

La interpretación del gran total se hace con la ayuda de la relación de los costos de baja calidad con otras cifras con las que los administradores están familiarizados. Las relaciones que tienen el mayor impacto en la alta administración son:

- Costos de calidad como porcentaje de ventas
- Costos de calidad comparados con la ganancia
- Costos de calidad por acción común
- Costos de calidad como porcentaje de los costos de bienes vendidos
- Costos de calidad como porcentaje de los costos totales de manufactura
- Efecto de los costos de calidad sobre el punto de equilibrio

Si bien el dinero es el lenguaje universal de la alta administración, existen otras formas de comunicar el significado a estos administradores.

Los dos lenguajes universales se hablan en la compañía. En el “fondo” el lenguaje es el de objetivos y logros: metros cuadrados de espacio, programas en toneladas por semana, tasas de rechazos en X porcentaje. En lo “alto” el lenguaje es el del dinero: ventas, ganancias, impuestos, inversión. Los administradores de nivel medio y los especialistas técnicos deben por lo tanto ser “bilingües”.

En una compañía que estaba preocupada por cumplir con las fechas de entrega, se tradujeron los costos de calidad a la producción agregada equivalente. Esto llamó la atención de los gerentes ya que coincidía con sus metas actuales. En otra compañía, se demostró que los costos de calidad totales de \$76 millones anuales eran equivalentes al costo de operar una planta con 2900 empleados, en un espacio de 1.1 millones de pies cuadrados y con un inventario de material en proceso de \$6 millones. Estas tres cifras a su vez eran equivalentes a que una de las plantas principales de la empresa hiciera un trabajo 100% defectuoso todos los días del año. ¡Y esta compañía es uno de los líderes de calidad en su sector industrial!

Un fabricante de computadoras tradujo el costo anual de la baja calidad a estos términos:

- 25% de los bienes producidos
- 25% del personal
- 40% del espacio
- 70% del inventario

Por ejemplo, se estaba gastando el tiempo del 25% del personal en encontrar y corregir productos defectuosos.

2.6 ANÁLISIS DE COSTOS DE CALIDAD

Se pueden derivar otras comparaciones útiles de las interrelaciones de los subtotales de los costos de calidad y las categorías más importantes. En muchas compañías, los costos de evaluación son parte del presupuesto y por lo tanto hace mucho que son materia de discusión. No obstante, el estudio de costos de calidad típico mostrará que los costos de fallas antes despreciados son varias veces los costos de evaluación. Esto sorprende a la mayoría de los administradores y después los fuerza a reconsiderar su atención.

De manera parecida, cuando los administradores descubren que los costos de prevención son lastimosamente bajos en relación con el total, su reacción instintiva es poner más atención a las posibilidades de aumentar esta prevención. La relación entre los costos de fallas internas y los costos de fallas externas es también significativa. Los primeros por lo general señalan la necesidad de programas de planeación y producción, mientras que los segundos casi siempre señalan la necesidad de programas sobre diseño de productos y servicio a clientes.

La tabla 2.2 muestra un ejemplo que utiliza los datos de 8 meses. Ahí, para cada producto, los costos de fallas están sobre el 80% del total –al menos seis veces los costos

TABLA 2.2
Balance de costos de calidad por línea de producto

	Producto A	Producto B	Producto C
Prevención, \$	5 698	1 569	1 908
Evaluación, \$	37 676	10 384	9 206
Fallas internas, \$	119 107	60 876	63 523
Fallas externas, \$	<u>133 168</u>	<u>12 625</u>	<u>15 755</u>
Gran total, \$	295 649	85 454	90 392
Embarques, \$	8 165 000	1 750 000	840 000
Razón (costo de calidad a embarques, %)	3.62	4.88	10.76
Número de máquinas	71	14	14
Costo de calidad total por máquina, \$	4 165	6 104	6 456

de evaluación— y los costos de prevención son menores que el 2% del total. Las implicaciones son claras:

- Para lograr una reducción significativa en los costos, deben atacarse primero los costos por fallas. Esto tendrá más impacto que reducir los costos de evaluación (inspección).
- Un incremento en los costos de prevención significa un ingreso en términos de costos menores por fallas.
- La mayor oportunidad de reducción de costos está en el producto A. Observe que al usar los resultados de “costo de calidad a embarques” y “costo de calidad total por máquina” sobresale el producto C. Esto se debe a la mezcla de productos.
- El producto A genera desperdicio y retrabajo internos, pero también hay problemas externos. Para los productos B y C el problema se centra más en el desperdicio y retrabajo internos.

Costos de calidad ocultos

Existen también costos que pueden resultar en una subestimación de los costos de calidad. Estos costos “ocultos” incluyen:

1. Ventas potenciales perdidas. Un intento para medir parcialmente este costo oculto es estimar el porcentaje de órdenes firmadas que se cancelan y convertir este porcentaje a ventas en dólares. Las cancelaciones, aunque se deben a muchas razones posibles incluyendo la calidad, son el reflejo de un desempeño menos que satisfactorio. Vea también en la sección 21.3 otro enfoque.
2. Los costos de rediseño por razones de calidad.
3. Los costos de cambiar el proceso de manufactura debido a la falta de habilidad para cumplir con los requerimientos de calidad.
4. Los costos de cambio de software por razones de calidad.

5. Los costos incluidos en los estándares porque la historia muestra que es inevitable cierto nivel de defectos y debe incluirse alguna tolerancia en esos estándares. En tales casos suena la señal de alarma sólo cuando se excede el valor estándar. Sin embargo, aun cuando se opere dentro de los estándares, esos costos deben ser parte del costo de baja calidad, ya que representan oportunidades de mejoramiento.
6. Costos de manufactura adicionales debidos a defectos. Éstos incluyen los costos adicionales por espacio, inventario y tiempo extra.
7. El desperdicio no reportado. Esto puede significar el desperdicio que nunca se reporta por el miedo a represalias, o el desperdicio que se carga a una partida general sin identificarlo como desperdicio.
8. Costos de proceso excesivos para lograr un producto aceptable. Por ejemplo, un proceso de llenado de cajas con mezcla de detergente cumple con los requerimientos de contenido de la etiqueta, pero la máquina se calibra arriba del peso de la etiqueta para permitir la variabilidad en el llenado. Si la variabilidad es grande, se tendrá que calibrar mucho más arriba del mínimo para acomodarla. Una reducción en la variabilidad puede significar que se pueda bajar el calibre al mínimo, reduciendo con esto la cantidad promedio de llenado excesivo.

Los costos evidentes de la baja calidad son la punta del iceberg. La figura 2.1 ilustra tanto los costos evidentes como los ocultos para una compañía de manufactura.

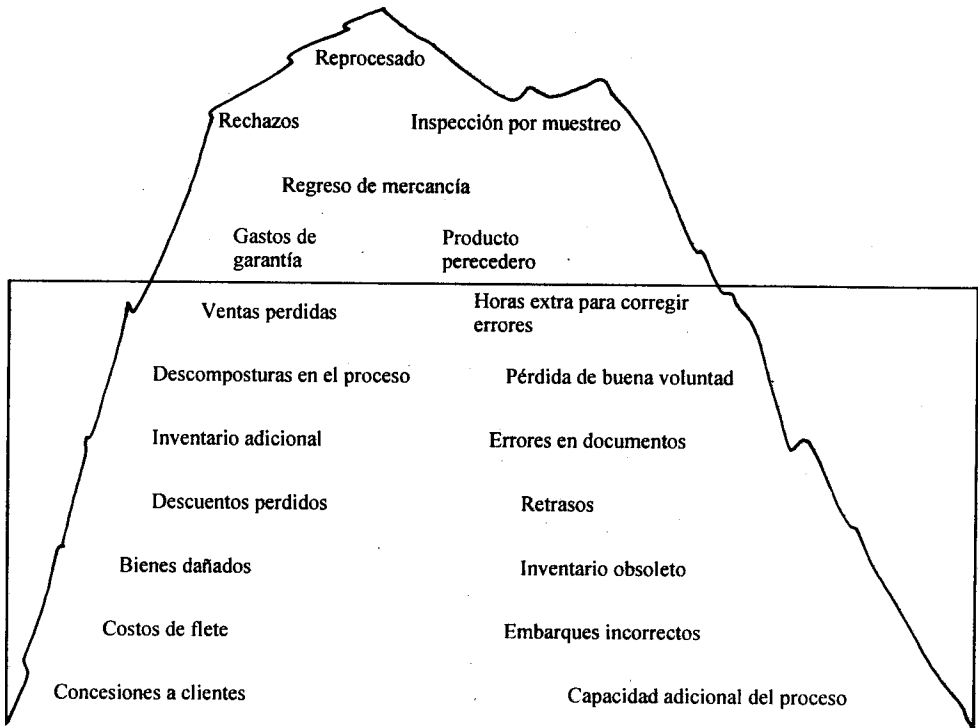


FIGURA 2.1
Costos ocultos de la baja calidad.

Descubrimiento del óptimo

Cuando se presentan por primera vez los resúmenes de costos de calidad a los administradores, una de las preguntas usuales es: “¿Cuáles son los costos correctos?” Los administradores buscan un estándar (“paridad”) contra el que puedan comparar sus costos reales para poder juzgar si hay necesidad de acción.

Desafortunadamente se dispone de muy pocos datos confiables. Las empresas casi nunca publican tales datos. En los intentos de investigar estos costos se han encontrado varios obstáculos (vea “Quality Cost Survey”, 1980; Gilmore, 1983). Primero, los datos de costos son confidenciales. También, algunas compañías incluyen el desperdicio inevitable de fabricación como parte del costo de baja calidad, mientras que otras no lo hacen; algunas compañías agregan los costos generales a los costos directos de mano de obra y material para el desperdicio y el retrabajo, mientras que otras no. Los rangos tan amplios en los ejemplos publicados son un recordatorio implacable del riesgo de comparar los costos de calidad de una compañía con los llamados promedios de la industria. Sobresalen tres conclusiones: los costos totales son más altos para industrias complejas, los costos por fallas son el porcentaje más alto del total y los costos de prevención constituyen el porcentaje más pequeño del total.

Una vez establecidas estas advertencias, se pueden citar algunos números. Para las empresas manufactureras, el costo anual de la baja calidad es alrededor del 15% del ingreso por ventas, variando del 5% al 35% dependiendo de la complejidad del producto. Para las organizaciones de servicios, el promedio es de alrededor del 30% de los gastos de operación, variando del 25% al 40% según la complejidad del servicio.

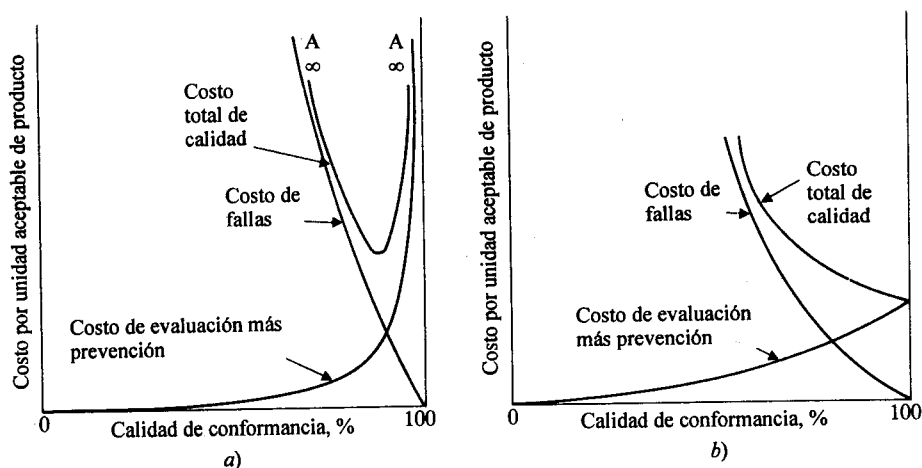
2.7 MODELOS ECONÓMICOS DE LA CALIDAD DE CONFORMANCIA

El estudio de la distribución de los costos de calidad en la mayoría de las categorías se puede explorar más usando los modelos que se muestran en la figura 2.2a y b.

Cada modelo muestra tres curvas:

1. *Costos de fallas.* Éstos son iguales a cero cuando el producto es 100% aceptable y se elevan a infinito cuando el producto es 100% defectuoso. (Observe que la escala vertical es costo por unidad aceptable de producto. Con 100% de defectuosos, el número de unidades aceptables es cero, y así el costo por unidad aceptable es infinito.)
2. *Costo de evaluación más prevención.* Estos costos son cero con 100% de unidades defectuosas y se elevan cuando se acerca a la perfección. Sin embargo, la cantidad en la que aumentan difiere para los dos modelos.
3. *Suma de las curvas 1 y 2.* Esta tercera curva está marcada como “total” y representa el costo total de la calidad por unidad aceptable de producto.

El modelo de la figura 2.2a representa las condiciones que prevalecieron durante gran parte del siglo XX. “Evaluación más prevención” consistía en mucha evaluación y poca


FIGURA 2.2

Modelo para el costo de calidad óptimo: a) Procesos tradicionales. b) Procesos en desarrollo. (Tomado de QCH4, p. 4.19.)

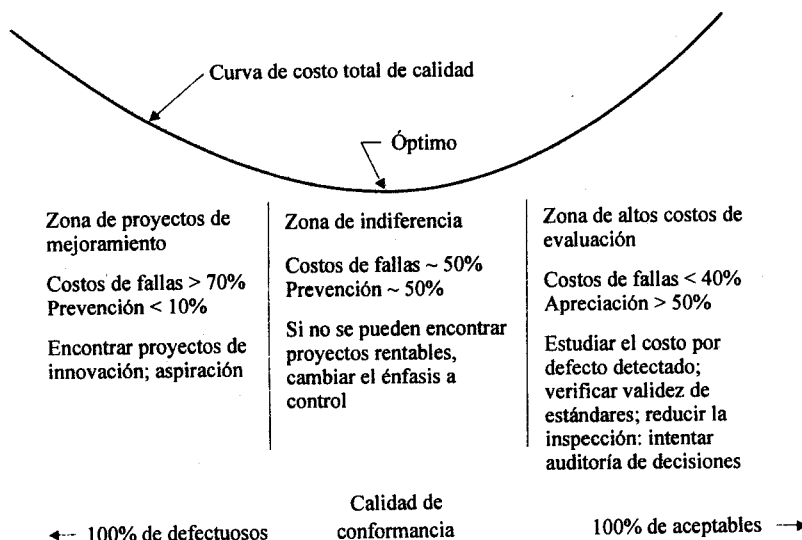
prevención. Lo que es más, la mayor parte de la evaluación la llevaban a cabo hombres falibles que no pueden mantener la atención 100% del tiempo, no pueden desplegar energía muscular 100% del tiempo, etc. Este hombre falible limita en realidad el esfuerzo por alcanzar la perfección con costos finitos. Así, el modelo muestra la curva de "costos de evaluación más prevención" creciendo a infinito al acercarse a la perfección. En consecuencia, la curva de "costo total" también tiende a infinito.

El modelo de la figura 2.1b representa las condiciones que surgieron en la última parte del siglo XX. Las prioridades en la prevención aumentaron. La nueva tecnología redujo las tasas de fallas inherentes en materiales y productos. La robótica y otras formas de automatización redujeron el error humano durante la producción. La inspección y pruebas automatizadas redujeron el error de evaluación humano. (Los procesos automatizados no tienen lapsos en la atención, no se cansan, etcétera.) En conjunto, estos desarrollos han dado como resultado la habilidad de lograr la perfección a un costo finito.

Mientras que la perfección es una meta a largo plazo, no se puede concluir que la perfección sea la meta más económica a corto plazo, o para todas las situaciones. En la figura 2.2a la curva de costo total tiene un mínimo en un nivel anterior a la perfección. La figura 2.3 muestra esta curva de costo total con más detalle.

La figura 2.3 divide la curva de costo total de calidad de la figura 2.2a en tres zonas. Por lo general se puede identificar la zona en la que se encuentra una compañía a partir de las razones de los costos de calidad que prevalecen en las categorías principales, como sigue:

ZONA DE PROYECTOS DE MEJORAMIENTO. Ésta es la porción del lado izquierdo de la figura 2.3. Las características sobresalientes son que los costos por fallas constituyen

**FIGURA 2.3**

Porción óptima del modelo de costos de calidad.

más del 70% de los costos de calidad totales, mientras que los costos de prevención son menores que el 10% del total. En tales casos, existen oportunidades para reducir los costos de calidad totales mediante el mejoramiento de la calidad de conformancia. El enfoque es identificar proyectos de mejoramiento específicos e intentar lograr las metas para mejorar la calidad de conformancia, reduciendo así los costos de la baja calidad, en especial los costos de fallas.

ZONA DE ALTOS COSTOS DE EVALUACIÓN. Ésta es la porción del lado derecho de la figura 2.3. Casi siempre se caracteriza por el hecho de que los costos de evaluación exceden a los costos de fallas. En tales casos, también hay oportunidad de reducir costos. Se puede lograr en formas tales como:

- Comparar el costo de los defectos detectados con el daño que causan si no se detectan. Por ejemplo, una compañía tiene mucho tiempo realizando una inspección detallada de las características *X* de calidad. La inspección detallada se inició en una época en que el defecto *X* era común. Al pasar los años el proceso se mejoró al punto en que el defecto *X* ocurre rara vez —sólo 15 defectos por millón de partes. Sin embargo, la inspección siguió. Un estudio mostró que costaba a la compañía \$2.80 encontrar cada defecto, pero el precio de venta era 5 centavos.
- Revisar los estándares de calidad para ver si son realistas en relación con la adecuación para el uso.
- Ver si es factible reducir la cantidad de inspección con un muestreo basado en el conocimiento de la capacidad del proceso y el orden de fabricación.

- Ver si es factible evitar la duplicidad de inspección con una auditoría de las decisiones.

ZONA DE INDIFERENCIA. Ésta es el área central de la figura 2.3. En esta zona, los costos de fallas significan alrededor de la mitad de los costos de calidad mientras que los costos de prevención constituyen cerca el 10% de los costos de calidad. En la zona de indiferencia se ha alcanzado el óptimo en términos de proyectos de mejoramiento de la calidad, lo cual vale la pena seguir. El mejoramiento continuo siempre es deseable, pero los proyectos compiten contra otros que valen la pena, aunque todavía no se encuentran en su nivel óptimo.

Es necesario hacer hincapié en varios conceptos relacionados con las figuras 2.2 y 2.3.

- Los modelos son conceptuales e ilustran la importancia de un valor óptimo de calidad de conformancia para muchas industrias. En la práctica, no se dispone de datos para construir estas curvas.
- El mejoramiento de la calidad de conformancia da como resultado una reducción del costo total en casi todo el espectro horizontal. Esto contradice la creencia de que una “calidad” alta requiere costos más altos.
- Se puede lograr una reducción en el costo moviéndose hacia el óptimo desde la zona de proyectos de mejoramiento o desde la zona de costos de evaluación altos.
- Es probable que los procesos de una compañía que todavía no ha emprendido el mejoramiento de la calidad se encuentren en la zona de mejoramiento. Para ellas las principales oportunidades de reducir costos son a través de proyectos para mejorar la conformancia.
- Los costos ocultos de la baja calidad (vea antes “costos de calidad ocultos”) no están incluidos en el modelo. Si se dispusiera de datos, el efecto sería mover el óptimo hacia un 100% de conformancia. Deberá entonces lucharse por un mejoramiento constante.

Otras circunstancias, que se analizan enseguida, también tienen un impacto en el balance del costo.

2.8 BALANCE DE COSTO DIFERENTE PARA CIERTAS CIRCUNSTANCIAS

Los modelos que se muestran en las figuras 2.2a y 2.3 se aplican a una amplia variedad de situaciones en la industria. Sin embargo, hay excepciones:

1. Las industrias que producen bienes que tienen un impacto crítico en la seguridad humana: los ejemplos incluyen la generación de energía nuclear o la fabricación de productos farmacéuticos. Esas industrias están sujetas a presiones sociales para lograr una calidad perfecta a casi cualquier costo.

2. Las industrias altamente automatizadas: aquí, con frecuencia es posible lograr un nivel bajo de defectos con la planeación apropiada del proceso de manufactura para asegurar que los procesos son capaces de cumplir con las especificaciones. Además, la inspección automatizada con frecuencia hace económicamente factible realizar una inspección del 100% para encontrar todos los defectos.
3. Las compañías que venden a clientes ricos: estos clientes con frecuencia están dispuestos a pagar un precio alto por una calidad perfecta para evitar hasta el más pequeño riesgo de un defecto.
4. Las compañías que luchan por optimizar el costo del usuario: los modelos esbozados en las figuras 2.2a y b muestran el concepto del óptimo desde el punto de vista del productor. Cuando se agregan a ellos los costos del usuario debidos a una falla del producto, el punto óptimo se mueve hacia la perfección. El mismo resultado se obtiene si se incluye en los costos de fallas el ingreso por ventas perdidas para el fabricante.

Estas condiciones proporcionan incentivos adicionales para buscar un mejoramiento continuo de la calidad. La razón es que el valor agregado de venta de un producto perfecto contrarresta con creces el costo de lograr 100% de conformancia. Esto casi ha logrado ser una realidad en productos como refrigeradores y aparatos de televisión a color. La perspectiva es que la tendencia al 100% de conformancia se extenderá cada vez a más productos de mayor complejidad.

A continuación se analizará otro elemento de evaluación.

2.9 POSICIÓN EN EL MERCADO

La estimación del costo de la baja calidad es una parte esencial de la evaluación. Pero no es suficiente. También es necesario entender cuál es la posición de la calidad de la compañía en el mercado, en relación con la competencia. Esta componente de evaluación resultará importante para aumentar los ingresos por ventas.

Parecido a la evaluación del costo de la baja calidad, el estudio de mercado 1) da un panorama de la posición respecto a la competencia y 2) identifica las oportunidades y peligros.

El enfoque debe basarse en un estudio de investigación de mercado. Estos estudios debe planearlos no sólo un departamento sino un equipo que incluya personal de mercadotecnia, desarrollo de producto, calidad, manufactura y otras áreas que se requieran. Este equipo debe estar de acuerdo de antemano en qué preguntas necesitan una respuesta del estudio de campo. Los tipos de preguntas que deben considerarse son: 1) ¿Cuál es la importancia relativa de las distintas calidades de producto según lo ve el consumidor? 2) ¿Cómo se compara nuestro producto con los de la competencia respecto a cada una de las cualidades, según lo ve el consumidor?

El capítulo 11, "comprensión de las necesidades de los clientes" incluye algunas preguntas.

Las respuestas a tales preguntas deben basarse en la información sobre los *consumidores*. Las opiniones del personal de la compañía, no importa qué tan extensa sea la experiencia, no pueden ni deben sustituir la voz del cliente.

Ejemplos de estudios de campo

El primer ejemplo es sobre un fabricante de productos para la salud. Se llevó a cabo un estudio de multiatributos en el que se pidió a los clientes que consideraran varios atributos de productos e indicaran tanto su importancia relativa como la clasificación en la competencia. Los resultados para un producto se presentan en la tabla 2.3. Observe que se obtuvo una calificación global para cada fabricante multiplicando la importancia relativa por la calificación de ese atributo y después sumando los resultados.

En otro ejemplo, un fabricante de equipo experimentaba una baja en su participación de mercado. Las quejas sobre la calidad llevaron a una propuesta: "objetar la inspección". Las discusiones dentro de la compañía revelaron incertidumbre sobre la naturaleza de las quejas, por lo que se decidió hacer un estudio para conocer más sobre los puntos de vista del cliente. Se formó un equipo para planear y realizar el estudio. Se visitó a más o menos 50 clientes.

En una parte del estudio se identificaron seis atributos y se pidió a los clientes que calificaran a la compañía como superior, competitiva o inferior respecto a la competencia en cada uno de ellos (vea la tabla 2.4). Los resultados fueron sorprendentes. Se confirmaron los problemas de equipo, pero el estudio reveló la presencia de causas tanto de diseño como de manufactura. Además, la documentación y el servicio de reparación se identificaron como áreas débiles; esto fue una sorpresa para la compañía. Se tomaron medidas dramáticas. Se creó un amplio enfoque hacia la calidad, comenzando por el diseño inicial y siguiendo por toda la espiral de actividades que afectan la adecuación para el uso. Esto era

TABLA 2.3
Estudio de multiatributos

Atributo	Importancia relativa, %	Compañía X		Competidor A		Competidor B	
		Calif.	Calif. ponderada	Calif.	Calif. ponderada	Calif.	Calif. ponderada
Seguridad	28	6	168	5	140	4.5	126
Desempeño	20	6	120	7	140	6.5	130
Calidad	20	6	120	7	140	4	80
Servicio de campo	12	4	48	8	96	5	60
Facilidad de uso	8	4	32	6	48	5	40
Imagen de la compañía	8	8	64	4	32	4	32
Servicio en la planta	4	7.5	30	7.5	30	5	20
Total			582		626		488

TABLA 2.4
Caso de maquinaria pesada

Atributo	Comparación con la competencia, %		
	Superior	Competitiva	Inferior
Análisis de necesidades del cliente			
Preparación de requerimientos de calidad y órdenes de compra			
Preparación de especificaciones y documentación técnica			
Calidad de equipo			
Calidad y disponibilidad de refacciones			
Calidad de servicio de campo y reparaciones			

Fuente: Comunicación privada.

totalmente opuesto a la propuesta original de aumentar la inspección. El estudio requirió alrededor de 7 hombres-mes de esfuerzo, incluyendo la planeación, las visitas a clientes, el análisis de resultados y la preparación del informe —un pequeño precio que pagar para desarrollar una estrategia adecuada.

Muchas organizaciones de servicios tienen una gran experiencia en estudios de mercado. Por ejemplo, un banco realiza periódicamente estudios de mercado como parte de un sistema de calidad. Esta investigación explora 20 atributos del servicio bancario preguntando a los clientes sobre la importancia relativa de los atributos y su grado de satisfacción. La tabla 2.5 muestra el formato de los resultados resumidos.

Ahora se generalizará a partir de estos ejemplos. Primero, todos ellos incluyen un estudio de clientes experimentados en el uso del producto. También, los estudios identifican

TABLA 2.5
Estudio de mercado en un banco

Satisfacción con ...	Muy satisfecho, %	Tamaño de la muestra	Importante y bajo en satisfacción, %	Importante y alto en satisfacción, %
1. Saludar con una sonrisa				
8. Procesar transacciones sin errores				
14. Estados de cuenta fáciles de leer y entender				
20. Seguimiento rápido a preguntas y problemas				

en forma específica los atributos que contribuyen a la satisfacción del cliente, cuantifican su importancia relativa y después determinan alguna clasificación para esos atributos.

Un panorama completo del punto en el que se encuentra una empresa en el mercado incluye más que un estudio de multiatributos. La compañía NCR (Willets, 1989) proporciona un ejemplo de una perspectiva de entendimiento. Se realiza un cuestionario formal a cuatro niveles de clientes:

1. Aquellos que aprueban la compra: un ejecutivo de nivel alto
2. Aquellos que influyen en la decisión: un ejecutivo técnico
3. Aquellos que firman la orden de compra: un comprador
4. Aquellos que son usuarios: un gerente de una tienda que usa una computadora NCR.

Además se recolecta otro tipo de información de manera continua a través de 11 medios que incluyen el análisis de las tendencias de venta, el análisis de quejas y grupos de interés de clientes.

Muchos de los conceptos que se presentaron para los clientes externos se pueden adaptar y aplicar a clientes internos. Stevens (1987) describe la aplicación a clientes internos de departamentos como centro de ingeniería y centro de aseguramiento de la calidad.

El siguiente elemento de evaluación es la cultura.

2.10 CULTURA DE CALIDAD EN LA COMPAÑÍA

Los empleados de una organización tienen opiniones, creencias, tradiciones y prácticas que conciernen a la calidad. Se llamará a esto cultura de calidad de la compañía. Adquirir y entender esta cultura debe ser parte de la evaluación de la calidad de una empresa.

Los enfoques formales para evaluar la cultura de calidad están todavía en desarrollo, pero se pueden identificar dos: las discusiones con grupos de interés de empleados y el uso de cuestionarios por escrito. Con cualquiera de estos enfoques, la evaluación de la calidad se puede hacer por separado o como parte de un estudio más amplio de actitudes sobre muchos aspectos.

Un ejemplo de la industria de productos para el cuidado de la salud ilustra el uso del enfoque de grupos de discusión (Hulse, 1983). Se formó una mesa redonda de 15 personas para analizar el estado de la calidad en la compañía. Se incluyó un supervisor de inspección, varios ingenieros gerentes, un gerente de planta, un gerente de producción, un vicepresidente de manufactura, un director de comercialización, un director de aseguramiento de la calidad y algunos otros miembros relacionados con las actividades de aseguramiento de la calidad. La junta duró tres días en un retiro rural.

Para darle una estructura y dirección, se usaron una serie de gráficas temáticas. Las gráficas se diseñaron para despertar la opinión personal y las observaciones sobre la

percepción de los asistentes y de otras personas en sus unidades de trabajo. Las gráficas hacían referencia a tres áreas:

1. Actitudes, percepciones y actividad dentro de la compañía. Un ejemplo es la actitud hacia la calidad del producto según la ven tres niveles —la alta administración, la administración de línea y los trabajadores de producción. Otro ejemplo exploró la misión de calidad de la empresa: ¿Tiene la compañía una misión? Si así es, ¿cuál? ¿Perciben los empleados la misión de calidad?
2. Actitudes percibidas de los usuarios sobre la calidad de los productos. Ejemplos de aspectos analizados son la pérdida en la participación del mercado y las quejas de los clientes como indicación de las actitudes de los usuarios.
3. Entendimiento de las herramientas de la calidad. Ejemplos de aspectos analizados son el entendimiento y el grado de aplicación de los conceptos de control de procesos, herramientas de ingeniería estadística y prácticas de muestreo de productos.

En las etapas finales de la reunión, se formaron tres grupos de trabajo independientes para lograr un consenso de opiniones y percepciones. Se proporcionó a los grupos afirmaciones sobre las deficiencias que hacen que una compañía se quede atrás en la competencia de calidad. Las discusiones de grupos (que duraron cerca de 3 horas) se dirigieron a confirmar o negar la exactitud de las afirmaciones. La mesa redonda en pleno analizó después las conclusiones de los grupos.

El enfoque usado generó un análisis crítico y positivo de los aspectos de la calidad, “muy probablemente a un nivel de análisis constructivo sin precedente en la naturaleza de nuestra organización”.

Pedir a los empleados que respondan un cuestionario proporciona otro enfoque para la cultura de calidad de la compañía. Un ejemplo, de una compañía manufacturera (Ryan y Wong, 1984) consistió en 14 preguntas. Tres de ellas y algunas respuestas sorprendentes son:

“¿Piensa usted que entiende qué es buena calidad? Por favor diga cuál cree usted que es la actitud de los gerentes hacia la calidad.” Las respuestas resumidas en una palabra fueron: hostil.

“¿Se le ha indicado alguna vez que siga con un trabajo defectuoso para cumplir los programas de producción?” Alrededor del 52% de los encuestados respondieron “sí”.

“Señale tres áreas que usted piense que son la causa de la mayoría de los defectos.” Muchas de las respuestas resultaron ser una grave revelación para la administración.

En otro ejemplo, una organización de servicios estudió la cultura de calidad a través de un cuestionario que consistía en las siguientes seis preguntas:

- ¿En qué grado está usted familiarizado con la importancia que la compañía da a la calidad?
- ¿En qué grado está usted de acuerdo con la afirmación: “Las acciones y actitudes de mi jefe me convencieron de que la calidad es importante”?

- ¿En qué grado entiende las medidas de calidad que se usan en su departamento?
- Considerando todo, ¿cómo calificaría su departamento en cuanto a proporcionar servicio y productos de alta calidad?
- ¿En qué grado piensa que el logro de los estándares de calidad afecta la evaluación de su desempeño?
- ¿Ha trabajado en un círculo de calidad, en un proyecto de mejoramiento de la calidad o en un equipo de mejoramiento de la calidad en los últimos 12 meses?

En lugar de una breve lista de preguntas, algunas organizaciones encuentran valioso emplear un formato extenso. Una organización utiliza 56 preguntas para explorar ocho áreas: calidad de todo el producto, conformancia con los requerimientos, equipo, calidad del proveedor, compromiso de la administración, desempeño de los grupos de trabajo, participación de los empleados y entrenamiento. En otra organización, se aplican 82 preguntas para evaluar 18 factores que en conjunto describen la cultura de calidad.

Es importante para la evaluación entender la cultura de calidad de una compañía. Adquirir este entendimiento tiene riesgos. Se pedirá al lector que examine esos riesgos en un problema del final del capítulo.

2.11 APRECIACIÓN DE LAS ACTIVIDADES ACTUALES DE CALIDAD

El cuarto elemento de apreciación es la evaluación de las actividades actuales de una organización relacionadas con la calidad. Tal evaluación puede cubrir un amplio rango tanto de magnitud (de global a unas pocas actividades) como de examen (general o detallado). El estudio aquí se concentra en un examen de una compañía completa con suficiente detalle para cumplir las necesidades de la apreciación global de la calidad. El capítulo 24 hará referencia a las actividades actuales con más detalle.

Se comenzará con preguntas de apreciación referentes a la administración de la calidad. Las preguntas en esta categoría incluyen:

- ¿Se han establecido objetivos de calidad?
- ¿Se han relacionado los objetivos de calidad con los objetivos de negocios?
- ¿Son las políticas y los planes tales que, si se siguen, la calidad será competitiva en el mercado?
- ¿El enfoque de calidad, está guiado por los administradores de línea o por supervisores?
- ¿Cubre todos los procesos (gran Q)?
- ¿La maquinaria de la organización está en su lugar para identificar y buscar oportunidades para aumentar los ingresos de ventas y para reducir los costos de baja calidad?
- ¿Existe un sistema efectivo para dar avisos con prontitud de problemas de calidad potenciales?

Además, se tienen preguntas relacionadas con las áreas funcionales. Las siguientes son comunes a *todas* las áreas funcionales:

- ¿Qué medidas se usan para juzgar la calidad del producto?
- ¿Cuál es el desempeño de la compañía reflejado por estas medidas?
- ¿Se han estimado los recursos gastados en detectar y corregir problemas relacionados con la calidad?
- ¿En qué grado entiende el personal las responsabilidades relacionadas con la calidad?
- ¿En qué grado se ha capacitado al personal en disciplinas de la calidad?
- ¿En qué grado se ha cuantificado la capacidad de los procesos clave?
- ¿Cumple el sistema de datos con las necesidades de personal?

Las preguntas que se aplican a áreas funcionales *específicas* se pueden encontrar en QCH4, páginas 9.18-9.20.

Una apreciación más detallada de una compañía utiliza criterios establecidos. Un ejemplo es el criterio utilizado en relación con el premio nacional de calidad Malcolm Baldrige. Este reconocimiento se otorga cada año en Estados Unidos. Sólo pueden seleccionarse un máximo de dos organizaciones en cada una de tres categorías (manufactura, servicio y pequeños negocios). Una evaluación exhaustiva se basa en los documentos presentados seguidos de visitas a los lugares para calificar a las organizaciones. El examen de las categorías y puntos asignados se dan en la tabla 2.6. Observe el fuerte hincapié que se hace en los resultados de la calidad y satisfacción del cliente. El premio Baldrige da reconocimiento a organizaciones que han logrado los niveles más altos de calidad.

Una agencia del gobierno revisó 20 compañías que tenían las calificaciones más altas entre las propuestas para el premio Baldrige en 1988 y 1989 (U.S. General Accounting Office, 1991). Las tres conclusiones clave fueron:

1. En casi todos los casos, las compañías lograron mejoras en relaciones humanas, productividad, satisfacción del cliente, participación de mercado y utilidades.
2. Seis características comunes contribuyeron a mejorar el desempeño: enfoque hacia el cliente, liderazgo de la alta administración, implicación y participación de empleados, una cultura corporativa abierta, toma de decisiones basada en los hechos y asociación con proveedores.
3. Las compañías requirieron un promedio de 2½ años para obtener los primeros beneficios.

El informe es una lectura excelente.

El esfuerzo internacional para identificar los elementos clave de un sistema de calidad para productos manufacturados ha dado como resultado una serie de estándares de calidad.

Estos estándares han sido desarrollados por la International Standards Organization (ISO) y se conocen como serie ISO 9000 de estándares de calidad. La tabla 2.7 enumera los documentos referentes. (En Estados Unidos, el American National Standards Institute

TABLA 2.6

Aspectos examinados en el premio nacional de calidad Malcolm Baldrige 1992

Categoría/aspectos	Puntos máximos
Liderazgo	90
Liderazgo de la alta administración	
Administración para la calidad	
Responsabilidad con el público	
Análisis e información	80
Alcance y administración de la calidad y datos e información sobre el desempeño	
Comparaciones de competitividad y límites	
Análisis y uso de los datos del nivel de la compañía	
Planeación de la calidad estratégica	60
Calidad estratégica y proceso de planeación del desempeño de la compañía	
Calidad y planes de desempeño	
Desarrollo y administración de recursos humanos	150
Administración de recursos humanos	
Participación del empleado	
Educación y capacitación del empleado	
Desempeño y reconocimiento del empleado	
Bienestar y moral del empleado	
Administración del proceso de calidad	140
Diseño e introducción de productos y servicios de calidad	
Administración de procesos – procesos de producción y entrega de bienes y servicios	
Administración de procesos – procesos de negocios y servicios de apoyo	
Calidad del proveedor	
Evaluación de la calidad	
Resultados de calidad y operativos	180
Resultados de calidad de productos y servicios	
Resultados operativos de la compañía	
Resultados del proceso de negocios y servicios de apoyo	
Resultados de la calidad del proveedor	
Atención y satisfacción al cliente	300
Administración de relaciones públicas	
Compromiso con el cliente	
Determinación de la satisfacción del cliente	
Resultados de satisfacción del cliente	
Comparación de la satisfacción del cliente	
Requerimientos y expectativas futuras del cliente	
Total de puntos	1000

Fuente: Application guidelines – Malcolm Baldrige National Quality Award, 1992.

TABLA 2.7

Serie ISO 9000 de estándares de calidad

ISO	ANSI/ASOC	Alcance
9000	Q90—1987	Selección de documentos
9001	Q91—1987	Diseño, desarrollo, producción, instalación y servicio
9002	Q92—1987	Producción e instalación
9003	Q93—1987	Inspección final y pruebas
9004	Q94—1987	Administración de la calidad y elementos del sistema

y la American Society for Quality Control publican los estándares.) En algunos países estos estándares se usan para certificar que una organización cumple con los criterios mínimos del sistema de calidad que definen. Una organización independiente hace la evaluación para una certificación tan formal. Los compradores de productos pueden requerir que los proveedores potenciales tengan la certificación con los criterios ISO apropiados como prerequisite para recibir un contrato. Las organizaciones encontrarán que es importante alcanzar la certificación ISO 9000 para competir en el ámbito tanto nacional como internacional.

En el capítulo “Aseguramiento de la calidad”, se pueden encontrar más detalles sobre la evaluación de actividades dentro de un sistema de calidad y también en QCH4, sección 9, “Quality Assurance”.

RESUMEN

- Todas las organizaciones necesitan una evaluación periódica de la calidad en toda la compañía.
- La evaluación de la calidad comprende cuatro elementos:
 - Costo de la baja calidad
 - Posición en el mercado
 - Cultura de calidad
 - Operación del sistema de calidad
- El premio nacional de calidad Malcolm Baldrige proporciona criterios para identificar organizaciones que han alcanzado los más altos niveles de calidad. Éste es un reconocimiento a los más altos logros.
- Los estándares ISO 9000 proporcionan criterios mínimos para un sistema de calidad. Estos documentos proporcionan alguna seguridad a clientes potenciales de que una organización certificada, puesto que cumple con los estándares tiene, de hecho, un sistema de calidad adecuado.

PROBLEMAS

- 2.1. La Federated Screw Company fabrica una amplia variedad de tornillos sobre medida para compañías industriales. Por lo general los clientes proporcionan los diseños. La nómina total de la planta es de 260 personas con ventas alrededor de \$8 millones. Las operaciones son relativamente sencillas pero preparadas para altos volúmenes de producción. Se alimenta alambre en rollos a alta velocidad en las máquinas encabezadoras en las que se forma el contorno del tornillo. Las punteadoras y ranuradoras realizan operaciones secundarias. La operación de roscar completa la configuración del tornillo. Los pasos finales son el tratamiento con calor, galvanizado y algunas veces horneado, y los realiza un contratista externo que se localiza cerca.

Se le ha pedido que prepare un resumen de costo de calidad para la compañía y usted ha hecho las siguientes notas:

- El departamento de control de calidad es en esencia un departamento de inspección final (ocho inspectores), que también inspecciona el alambre que llega. Se realizan rondas de inspección a las encabezadoras verificando la primera y la última piezas de cada corrida. El departamento de control de calidad maneja también la verificación y preparación de todos los anillos, placas y calibradores que usan ellos mismos y el personal del departamento de producción. El salario de un inspector es de alrededor de \$24 000 anuales.
- La calidad de la fabricación es responsabilidad de los equipos de preparación asignados a conjuntos de más o menos cuatro máquinas cada uno. Es difícil estimar cuánto de su tiempo se gasta en verificar las preparaciones o las corridas de las máquinas, así que no ha tratado de hacerlo todavía. La producción tiene dos inspectores para clasificación, cada uno gana \$18 000; ellos clasifican los lotes que la inspección final rechaza.
- El departamento de ingeniería prepara referencias, herramientas de diseño, planos de ruta de trabajos, y establece los requerimientos de calidad; trabajan a partir de los planos del cliente. Además resuelven problemas, a un costo alrededor de \$20 000 anuales. Se gastan otros \$16 000 al año en la revisión de los planos de los clientes para identificar las dimensiones críticas, tratando de que el cliente cambie esos aspectos y traduciendo los requerimientos de calidad del cliente a especificaciones que los inspectores y el personal de manufactura de la Federated puedan usar.
- Los registros sobre desperdicio, retrabajo y devoluciones son escasos, pero usted ha podido reunir cierta cantidad de información de los registros y estimaciones:

El desperdicio por rechazo de la inspección final y devoluciones suma 438 000 y 667 000 piezas, respectivamente, para los dos últimos meses.

Las devoluciones que requieren retrabajo promedian 1 millón de piezas al mes.

Se piensa que el desperdicio generado durante la producción es alrededor de la mitad del desperdicio en el suelo (el resto no se relaciona con la calidad) de 30 000 libras al mes.

La inspección final rechaza un promedio de 400 000 piezas mensuales para retrabajo. Éstas son piezas que se pueden volver a roscar o hacerse de rosca plana.

- Se han obtenido cifras preliminares de los contadores, que dicen que se puede valorar el desperdicio en \$12.00 por millar de piezas, el desperdicio en el suelo en \$800 por cada mil libras, el retrabajo de las devoluciones en \$4.00 por millar de piezas, y el roscado plano y

la vuelta a roscar en \$1.20 por millar de piezas. Se supone que todas estas cifras incluyen costos generales.

Prepare un resumen de costos anuales de calidad. (Este ejemplo fue adaptado de uno preparado originalmente por L. A. Seder.)

- 2.2. Revise la explicación del estudio de investigación de mercado descrito en la tabla 2.4. ¿Qué otras preguntas hubiera sido útil hacer durante el estudio?
- 2.3. La información sobre la cultura de calidad actual de una organización es un valor importante para la evaluación. Preguntar a los empleados sus opiniones sobre la cultura de calidad tiene algunos riesgos. Establezca dos de esos riesgos.
- 2.4. En una investigación usada para conocer más sobre la cultura de calidad de una organización se hicieron preguntas a los empleados que se relacionan con tres niveles – la alta administración, su propio gerente y las personas en su grupo de trabajo. Para cada nivel, establezca dos preguntas que identificarían las percepciones del empleado sobre la cultura de calidad.
- 2.5. Cuando los consumidores comen en un restaurante elegante, ellos esperan comida y servicio excelentes. La investigación ha identificado siete características del servicio de un restaurante. ¿Cuáles son estas características de servicio?

REFERENCIAS

- ASQC (1986). *Principles of Quality Costs*, American Society for Quality Control, Milwaukee.
- Aubrey, C. A. III y D. A. Zimble (1982). "A Banking Quality Cost Model: Its Uses and Results", *ASQC Quality Congress Transactions*, Milwaukee, pp. 195-201.
- Gilmore, Harold L. (1983). "Consumer Product Quality Control Costs Revisited", *Quality Progress*, abril, pp. 28-32.
- Hulse, James W. (1983). "The Technique of Conducting a State of Quality Affairs Roundtable Conference to Ascertain the Employees' Perception of Quality", *Juran Report Number Two*, Juran Institute, Inc. Wilton, Connecticut, pp. 132-135.
- "Quality Cost Survey" (1980). *Quality*, julio, pp. 16-17.
- Ryan, H. N. y H. Y. S. Wong (1984). "Breaking Down the Barrier", *Quality*, abril, pp. 40-41.
- Stevens, Eric R. (1987). "Implementing an Internal Customer Satisfaction Improvement Process", *Juran Report Number Eight*, Juran Institute, Inc., Wilton, Connecticut, pp. 140-145.
- U. S. General Accounting Office (1991). "Management Practices: U. S. Companies Improve Performance Through Quality Efforts", P.O. Box 6015, Gaithersburg, MD 20877.
- Willems, Gary G. (1989). "Internal and External Measures of Customer Satisfaction", *Customer Satisfaction Measurement Conference Notes*, American Society for Quality Control and American Marketing Association, Atlanta.

LECTURAS COMPLEMENTARIAS

Costos de la calidad: QCH4, Sección 4.

Schneiderman, Arthur M. (1986). "Optimum Quality Costs and Zero Defects: Are they Contradictory Concepts?" *Quality Progress*, noviembre, pp. 28-31.

Juran, J. M. (1987). "Letter to Editors", *Quality Progress*, abril, pp. 7, 9.

Reeve, James M. (1991). "Variation and the Cost of Quality", *Quality Engineering*, vol. 4, núm. 1, pp. 41-55.

Posición en el mercado: QCH4, pp. 12.1-12.20.

Cultura de la calidad en la compañía: QCH4, pp. 10.17-10.21.

Evaluación de las actividades de calidad actuales: QCH4, pp. 9.18-9.20

ISO 9000-9004 Quality Standards (ANSI/ASQC Q90-Q94), ASQC, Milwaukee.

Application Guidelines — Malcolm Baldrige National Quality Award, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899.

Capítulo 3

EL PROCESO DE PLANIFICACIÓN DE LA CALIDAD¹

John F. Early y O. John Coletti

DEFINICIÓN DE LA PLANIFICACIÓN DE LA CALIDAD	3.2	Necesidades declaradas y necesidades reales	3.15
EL PROBLEMA DE LA PLANIFICACIÓN DE LA CALIDAD	3.3	Necesidades percibidas	3.16
LA SOLUCIÓN DE LA PLANIFICACIÓN DE LA CALIDAD	3.4	Necesidades culturales	3.16
PASO 1: ESTABLECER EL PROYECTO	3.5	Necesidades asignables a un uso no supuesto	3.16
Identificación de los proyectos ..	3.5	Seguridad humana	3.16
Preparar la declaración de misión	3.6	«Amigable para el usuario»	3.16
Bases para establecer los objetivos de la calidad	3.7	Rapidez de servicio	3.16
Políticas de nuevos productos ..	3.8	Necesidades del cliente relacionadas con las deficiencias	3.17
Establecer el equipo	3.10	Garantías	3.17
PASO 2: IDENTIFICAR A LOS CLIENTES	3.11	Efecto del tratamiento de las quejas sobre las ventas	3.17
Tipos de clientes externos	3.11	Mantener a los clientes informados	3.17
Clientes internos	3.12	Plan para recoger las necesidades de los clientes	3.18
Identificación de los clientes	3.13	Descubrimiento de las necesidades del cliente de Mustang	3.18
PASO 3: DESCUBRIR LAS NECESIDADES DEL CLIENTE	3.14	Recoger la lista de las necesidades de los clientes en su lenguaje	3.19
		Analizar y fijar las prioridades de las necesidades del cliente	3.19

¹ En la cuarta edición, el material cubierto por este capítulo fue proporcionado por Joseph M. Juran y Frank M. Gryna en los capítulos sobre Planificación empresarial para la calidad, Desarrollo del producto y Planificación de la producción.

Establecer unidades de medida y sensores	3.24	Seleccionar el diseño general del proceso	3.43
Traducción y medición de las necesidades del cliente de Mustang	3.26	Identificar las metas y características del proceso	3.46
PASO 4: DESARROLLAR EL PRODUCTO	3.26	Identificar las metas y características detalladas del proceso ..	3.48
Agrupar las necesidades relacionadas del cliente	3.28	Diseño teniendo en cuenta los factores críticos y el error humano	3.48
Determinar los métodos para identificar las características del producto	3.29	Optimizar las metas y características del proceso	3.50
Normas, regulaciones y políticas ..	3.30	Establecer la capacidad del proceso	3.50
Criterios para el diseño	3.30	Fijar y documentar las metas y características finales del proceso	3.50
Criterios para fijar las metas de las características del producto ..	3.32	PASO 6: DESARROLLO DE LOS CONTROLES DEL PROCESO/ TRANSFERENCIA A OPERACIONES	3.51
Medición de las metas de las características del producto	3.32	Identificar los controles necesarios	3.51
Desarrollar las metas y características detalladas del producto ..	3.33	Diseñar el bucle de realimentación	3.52
Optimizar las metas y características del producto	3.33	Optimizar el autocontrol y la autoinspección	3.52
Fijar y documentar el diseño final del producto	3.39	Plan de auditorías para la transferencia	3.54
PASO 5: DESARROLLAR EL PROCESO	3.39	Aplicar el plan y validar la transferencia	3.55
Revisar las metas del producto ..	3.40	REFERENCIAS	3.55
Identificar las condiciones operativas	3.40		
Recoger información conocida sobre procesos alternativos ..	3.41		

DEFINICIÓN DE LA PLANIFICACIÓN DE LA CALIDAD

La «planificación de la calidad», tal como se emplea aquí, es un proceso estructurado para desarrollar productos (tanto bienes como servicios) que asegure que el resultado final se ajusta a las necesidades del cliente. Las herramientas y métodos de la planificación de la calidad están incorporados a las herramientas tecnológicas para el producto específico que se desarrolla y presta. El diseño de un automóvil nuevo necesita de la ingeniería de automoción y de las materias relacionadas; el desarrollo de un medio de cuidado eficaz de la diabetes juvenil se derivará de los métodos expertos de médicos especializados, y la planificación de un nuevo enfoque de los servicios al huésped en un lugar de recreo requerirá las técnicas de un hotelero experimentado. Los tres necesitan procesos, métodos, herramientas y técnicas de planificación de la calidad para asegurar el que los diseños finales del automóvil, del cuidado de la diabetes y de los servicios del lugar de recreo no sólo satisfarán los mejores requisitos técnicos de sus materias relativas, sino también las necesidades de los clientes que adquieran y se beneficien de sus productos.

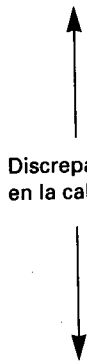
EL PROBLEMA DE LA PLANIFICACIÓN DE LA CALIDAD

El proceso de la planificación de la calidad y sus métodos asociados, herramientas y técnicas se han desarrollado debido a que en la historia de la sociedad moderna las organizaciones han demostrado universalmente que fallan continuamente al producir bienes y servicios que gusten sin lugar a dudas a los clientes. Como cliente, todo el mundo se ha desesperado una y otra vez cuando los aviones se retrasan, la contaminación radiactiva se extiende, el tratamiento médico no concuerda con las mejores prácticas, el juguete de un niño no funciona, una pieza de software no es tan rápida o fácil de usar como se creía, el gobierno responde con rapidez glacial (si responde), o una lavadora ultramoderna no entrega la ropa más limpia que antes. Estas frecuentes y grandes discrepancias en la calidad son en realidad la suma resultante de pequeñas discrepancias, como se ilustra en la Figura 3.1.

El primer componente de la discrepancia en la calidad es la *discrepancia en la comprensión*, es decir, la falta de comprensión de lo que el cliente necesita. A veces esta discrepancia se origina cuando el productor simplemente falla en tener en cuenta quiénes son y qué necesitan los clientes. Con más frecuencia, la discrepancia existe porque la organización suministradora tiene una confianza equivocada en su habilidad para entender exactamente lo que el cliente necesita realmente. La discrepancia final de percepción de la Figura 3.1 surge también de un fallo en comprender al cliente y a sus necesidades. Los clientes no se basan simplemente en los méritos técnicos del producto para saber si les gusta un traje nuevo o el carácter del servicio de un organismo local. Los clientes reaccionan a su *percepción* del beneficio obtenido del bien o del servicio.

El segundo componente de la discrepancia en la calidad es la *discrepancia en el diseño*. Incluso si hay un perfecto conocimiento de las necesidades y percepciones del cliente, muchas organizaciones fallarán en crear diseños de sus bienes y servicios que concuerden completamente con esta comprensión. Parte de este fallo surge del hecho de que las personas que entienden a los clientes y la ciencia que usan para comprender las necesidades del cliente están frecuentemente separados de los que crean los diseños en la realidad. Además, a los

Expectativas del cliente



Discrepancia
en la calidad

Comprensión de las necesidades

Diseño del producto

Capacidad de ejecutar el diseño

Prestación real

Discrepancia en la comprensión

Discrepancia en el diseño

Discrepancia en el proceso

Discrepancia en las operaciones

Discrepancia en la percepción

Percepción de la prestación por el cliente

FIGURA 3.1 La discrepancia en la calidad y las discrepancias que la componen [Inspirado por A. Parasuraman, Valerie A. Zeithami and Leonard L. Berry (1985). «A Conceptual Model for Service Quality and Its Implications for Further Research». *Journal of Marketing*, Fall, pp. 41-50].

diseñadores —diseñen equipos sofisticados o servicios humanos delicados— les faltan a menudo las herramientas simples que les permitirían combinar su pericia técnica con la comprensión de las necesidades del cliente para crear un producto verdaderamente superior.

La tercera discrepancia es la *discrepancia en el proceso*. Muchos diseños espléndidos fallan porque el proceso por el que se crea el producto físico o se presta el servicio no es capaz de ajustarse al diseño de forma consistente. Esta falta de capacidad del proceso es uno de los fallos más persistentes y endiablados de la discrepancia en la calidad total.

La cuarta discrepancia es la *discrepancia en las operaciones*. Los medios por los que el proceso se realiza y controla pueden crear deficiencias adicionales en la entrega del bien o servicio final.

LA SOLUCIÓN DE LA PLANIFICACIÓN DE LA CALIDAD

La planificación de la calidad proporciona los procesos, métodos, herramientas y técnicas para evitar cada una de estas discrepancias y así asegurar que la discrepancia final en la calidad es mínima. La Figura 3.2 resume bien los pasos básicos de la planificación de la calidad. El resto de este capítulo proporcionará detalles y ejemplos para cada uno de estos pasos.

El primer paso, establecer el proyecto, proporciona las metas claras, la dirección y la infraestructura requeridos si hay que evitar los componentes de las discrepancias de calidad. El paso siguiente se encarga de la identificación sistemática de todos los clientes. Es imposible evitar discrepancias en la comprensión si existe el menor resquicio de incertidumbre, confusión o ignorancia acerca de quiénes son los clientes.

El descubrimiento de las necesidades del cliente en el tercer paso proporciona la comprensión total y completa que demanda un diseño de producto con éxito y que satisfaga dichas necesidades. También evalúa explícitamente las percepciones del cliente, de forma que se evita la discrepancia final en la percepción.

El paso de desarrollo del producto usa tanto las herramientas de la planificación de la calidad como la tecnología de la industria específica, para crear un diseño que sea eficaz para satisfacer las necesidades del cliente, evitando con ello la discrepancia en el diseño. La discrepancia en el proceso se evita en el paso siguiente, desarrollo del proceso. Las técnicas de planificación de la calidad aseguran la capacidad del proceso para entregar el producto consistentemente, tal como se diseñó.

Finalmente, se evita la discrepancia en las operaciones mediante el desarrollo de controles del proceso que lo mantienen operando a su entera capacidad. La eliminación con éxito de la discrepancia en las operaciones depende también de una transferencia eficaz de los planes a operaciones. Un plan sólido de transferencia, bien ejecutado, proporcionará a operaciones todos los procesos, técnicas, materiales, equipamiento, habilidades, etc., que gustarán a los clientes de modo continuado.

- Establecer el proyecto.
- Identificar a los clientes.
- Descubrir las necesidades de los clientes.
- Desarrollar el producto.
- Desarrollar el proceso.
- Desarrollar los controles y transferir a operaciones.

FIGURA 3.2 Pasos de la planificación de la calidad (Juran Institute, Inc., Copyright 1994. Usado con su permiso).

El resto de este capítulo proporcionará detalles, orientación práctica y ejemplos de cada uno de estos pasos. Se incluyen varios ejemplos detallados de cómo Ford Motor Company aplicó los principios de la planificación de la calidad al desarrollo de su Ford Mustang en 1994.

PASO 1: ESTABLECER EL PROYECTO

Un proyecto de planificación de la calidad es el trabajo organizado necesario para preparar a una organización para entregar productos nuevos o revisados, siguiendo los pasos relacionados con la planificación de la calidad. Hablando en general, las actividades siguientes se relacionan con el establecimiento de un proyecto de planificación de la calidad:

- Identificar qué proyectos se requieren para cumplir la estrategia de la organización.
- Preparar una declaración de misión para cada proyecto.
- Establecer un equipo que lleve a cabo el proyecto.
- Planificar el proyecto.

Identificación de los proyectos. Decidir qué proyectos acometer es normalmente el fruto de la planificación estratégica y de negocio de una organización (véase el Capítulo 13, «Despliegue estratégico», para debatir cómo se despliegan los proyectos específicos desde la visión, estrategias y metas de una organización). Lo normal es que los proyectos de planificación de la calidad creen los productos nuevos o actualizados que se necesitan para alcanzar metas estratégicas específicas, para satisfacer las necesidades del cliente nuevas o cambiantes, para cumplir con obligaciones legales o del cliente, o para aprovecharse de una tecnología nueva o emergente.

La alta dirección debe asumir el liderazgo en la identificación y apoyo de los proyectos críticos de planificación de la calidad. Al actuar como un comité de calidad u órgano similar, la dirección necesita desempeñar los papeles clave siguientes:

Fijación de metas de calidad. La alta dirección identifica las oportunidades y necesidades de mejorar la calidad y fija las metas estratégicas de la organización.

Propuesta y selección de proyectos. El comité de calidad selecciona los proyectos de planificación de la calidad más importantes y críticos para alcanzar las metas estratégicas de la calidad.

Selección de equipos. Una vez que se ha identificado el proyecto, el comité de calidad nombra un equipo para ejecutar el proyecto durante los restantes pasos del proceso de planificación de la calidad.

Soporte al equipo del proyecto. Generalmente, se requieren técnicas y procesos nuevos para alcanzar las metas de la calidad. Será el comité de calidad el encargado de ocuparse de que el equipo de planificación de la calidad esté bien preparado y equipado para desempeñar su misión. El soporte del comité de calidad puede incluir:

- Proporcionar educación y formación en técnicas y herramientas de planificación de la calidad.
- Proporcionar un facilitador formado que ayude al equipo a trabajar con eficacia y a aprender el proceso de planificación de la calidad.
- Revisar el avance del equipo.
- Aprobar la revisión de la misión del proyecto.
- Identificar cualquier problema y ayudar a resolverlo.

- Coordinar los proyectos de planificación de la calidad relacionados.
- Ayudar en la logística, por ejemplo, con un lugar de reunión.
- Proporcionar conocimientos expertos en análisis de datos y diseño de encuestas.
- Suministrar recursos para una recogida de datos extremadamente exigente.
- Comunicar los resultados de los proyectos.

Control del avance. El comité de calidad es en general responsable de estar al día del proceso de planificación de la calidad, de evaluar su avance y de hacer correcciones durante su curso para mejorar la eficacia del proceso entero. Una vez que el comité de calidad haya revisado las fuentes de proyectos potenciales, seleccionará una o más para su atención inmediata. Luego deberá preparar una declaración de misión para el proyecto.

Preparar la declaración de misión. Una vez que el comité de calidad haya identificado la necesidad de un proyecto, deberá preparar una declaración de misión que incorpore la meta o metas específicas del proyecto. La declaración de misión es la instrucción escrita para el equipo en la que se describe la intención o propósito del proyecto. La misión del equipo describe:

- El alcance del proyecto de planificación, es decir, el producto y mercados a los que se dirige.
- Las metas del proyecto, es decir, los resultados que se quieren conseguir.

La redacción de la declaración de misión demanda una firme comprensión de la fuerza motriz impulsora del proyecto. La misión ayuda a contestar las preguntas siguientes:

- ¿Por qué desea la organización hacer el proyecto?
- ¿Qué conseguirá una vez que se haya realizado?

Una declaración de misión también fomenta el consenso entre los que o bien se ven afectados por el proyecto, o bien contribuirán con el tiempo y recursos necesarios para planificar y llevar a cabo las metas del proyecto.

Ejemplos

- La misión del equipo es entregar al mercado un refrigerador nuevo de bajo consumo y libre de fluorocarbonados.
- El equipo creará un control preciso y a un coste mínimo para el inventario de todos los almacenes.

Si las declaraciones de misión describen sólo lo que se hará, resultarán incompletas. Les falta la claridad y especificidad requeridas para una declaración de misión de la planificación de la calidad completa que incorpore las metas del proyecto. Una declaración de misión bien redactada y efectiva define el alcance del proyecto mediante la inclusión de uno o más de los siguientes epígrafes:

- *Rendimiento inherente.* Cuál será el rendimiento final del producto en una o más dimensiones; v.g., tiempo de respuesta 24 horas.
- *Rendimiento comparativo.* Cuál será el rendimiento final del producto frente a la competencia; v.g., el tiempo de respuesta más rápido en el área metropolitana.
- *Reacción del cliente.* Cómo calificarán los clientes el producto comparándolo con otros disponibles; v.g., se considera que una empresa tiene un mejor servicio de entrega a tiempo comparada con su rival más próximo.
- *Mercado.* Quiénes son o serán los clientes o la audiencia objetivo de este producto, y qué cuota del mercado o nicho del mercado capturará; convertirse en la fuente «preferida» de todos los viajeros de negocios dentro del territorio de Estados Unidos.

- *Deficiencias del rendimiento.*Cuál será el rendimiento del producto con respecto a los fallos; v.g., índice de fallos inferior a 200 por cada millón de horas de uso.
- *Prevención de restricciones innecesarias.* Evitar especificar el producto en exceso; v.g., si se pretende que el producto sea para un transporte aéreo, el especificar en la misión sus dimensiones precisas puede ser demasiado restrictivo; puede haber varios modos de satisfacer el mercado del transporte.

Bases para establecer los objetivos de la calidad. Además del alcance del proyecto, la declaración de misión debe incluir la meta o las metas del proyecto. Al establecer las metas de la calidad hay que tener muy en cuenta la elección de la base para la que se fijan estas metas.

La tecnología como base. En muchas organizaciones, ha sido tradicional establecer las metas de la calidad sobre una base tecnológica. La mayoría de las metas se incluyen en especificaciones y procedimientos que definen los objetivos de la calidad para los niveles supervisores y no supervisores.

El mercado como base. Las metas de la calidad que afectan a la capacidad de venta del producto deberían basarse fundamentalmente en satisfacer o exceder la calidad del mercado. Como indudablemente el mercado y la competencia estarán cambiando mientras el proyecto de planificación de la calidad se esté llevando a cabo, las metas deberían fijarse para igualar o batir a la competencia que se estima que existirá cuando termine el proyecto. Algunos proveedores internos son monopolios internos. Ejemplos corrientes son la preparación de la nómina, el mantenimiento de las instalaciones, el servicio de cafetería y el transporte interno. No obstante, la mayoría de los monopolios internos tienen competidores potenciales. Existen proveedores externos que ofrecen el mismo servicio. De este modo, se puede comparar el rendimiento del proveedor interno con las propuestas ofrecidas por el proveedor externo.

Benchmarking (emulación) como base. «Benchmarking» es una etiqueta reciente para el concepto de fijarse metas basadas en el conocimiento de los que otros han conseguido (véase el Capítulo 12). Una meta corriente es el requisito de que la fiabilidad de un producto nuevo sea como mínimo igual a la del producto que sustituye y sea por lo menos igual a la del producto competidor más fiable. En el uso del benchmarking está implícito el concepto de que las metas resultantes son alcanzables porque ya han sido alcanzadas por otros.

La historia como base. Una cuarta base ampliamente usada para fijar las metas de la calidad ha sido el rendimiento histórico; es decir, las metas se basan en el rendimiento pasado. Algunas veces esto se exagera para estimular la mejora. Para algunos productos y procesos, la base histórica es una ayuda para la necesaria estabilidad. En otros casos, especialmente en aquellos que implican habitualmente grandes costes por baja calidad, la base histórica ayuda a perpetuar un rendimiento habitualmente antieconómico. Durante el proceso de fijar metas, el equipo directivo debería estar alerta contra este mal uso de la base histórica.

Las metas de la calidad como objetivo móvil. Se reconoce ampliamente que las metas de calidad deben ir mudando para responder a los cambios que siguen apareciendo por el horizonte: tecnología nueva, competencia nueva, amenazas y oportunidades. Las organizaciones que han adoptado los métodos de gestión de la calidad practican este concepto, pero pueden, sin embargo, no haber proporcionado los medios para evaluar el impacto de estos cambios y revisar sus metas de acuerdo con ellos.

Metas del proyecto. Las metas específicas, es decir, lo que va a conseguir el equipo del proyecto, forman parte de una declaración de misión efectiva. Al ir a ejecutar la tarea, el equipo debe empezar mentalmente por el final. Cuanto más se centre en lo que parecerá el resultado final, más fácil le será llegar a su feliz conclusión.

Medición de las metas. Además de declarar lo que se va a hacer y por quién, la meta del proyecto debe mostrar cómo medirá el equipo si se han conseguido o no las metas declaradas. Es importante emplear un tiempo en definir cómo se mide el éxito. A continuación se indican cuatro cosas que se pueden medir:

1. Calidad.
2. Cantidad.
3. Coste.
4. Tiempo.

Una meta efectiva del proyecto de planificación de la calidad debe tener cinco características para proporcionar al equipo suficiente información para guiar el proceso de planificación. La meta debe ser:

- Específica.
- Medible.
- Aceptada por los afectados.
- Realista. Se puede expandir, pero debe ser plausible.
- Específica en el tiempo: cuándo se hará.

Un ejemplo de meta mal redactada puede ser algo como esto: «Diseñar un coche nuevo que sea el mejor de su clase». Contraste esto con el siguiente ejemplo: «Diseñar y poner en producción dentro de tres años un coche nuevo, de tamaño medio, que sea el mejor de su clase y con un precio para el público de menos de 20.000 \$ (en el momento de su introducción). El diseño deberá permitir también a la empresa vender el coche con un beneficio promedio entre el 4 y el 6 por ciento.

El Ford Mustang. Misión y metas. Antes de seguir adelante con el desarrollo de productos, Ford acordó una misión clara para el Mustang. La versión breve era «El coche es la estrella». Siempre que un amplio grupo de personas de varias organizaciones funcionales se reúne para trabajar en un proyecto, existe una tendencia natural a llevar al equipo un montón de «objetivos y prioridades de la oficina central». Si no se atienden, estas prioridades de la oficina central pueden difuminar el enfoque del equipo y crear una considerable cantidad de conflictos dentro del equipo.

Para solucionar este asunto, el equipo eligió la declaración «El coche es la estrella» para alinear los esfuerzos de todos los miembros del equipo y centrarlos en un solo objetivo. Esta declaración fue un medio sencillo y efectivo de galvanizar el equipo alrededor del hecho de que existía un propósito común y un solo objetivo de rango superior.

En concreto, esto significó que todos los miembros del equipo podían adjudicar sus acciones y decisiones diarias de acuerdo con el objetivo global del equipo de hacer del coche una realidad y un éxito. Se establecieron metas del programa para 18 parámetros separados. Este «gráfico de los 18 paneles» permitió que el proyecto se centrara en factores de éxito muy específicos (véase Figura 3.3).

Políticas de nuevos productos. Las empresas necesitan tener una orientación de política muy clara con respecto al desarrollo del producto y de la calidad. La mayor parte se relacionará con todos los nuevos productos, pero puede haber políticas específicas relacionadas con productos particulares, líneas o grupos de producto. A continuación se indican cinco de las políticas más críticas:

Deficiencias en diseños nuevos y remanentes. Muchas organizaciones han establecido la política clara de que ningún producto o componente nuevo puede tener un nivel de deficiencias

	Tema	Descripción
Panel 1	Calidad	Cosas que fueron mal/1000, cosas que fueron bien/1000, reparaciones/1000 y satisfacción del cliente a los tres meses en servicio, más cosas que fueron mal/1000 a los cuatro años en servicio.
Panel 2	Tiempo	Resumen de los mayores hitos del programa total del plan de trabajo.
Panel 3	Puntos difíciles del vehículo	Resumen de los puntos difíciles de su arquitectura, como la base del volante, llanta, longitud, altura, anchura, espacio interior, espacio para las piernas, etc.
Panel 4	Dinámica del vehículo	Objetivos subjetivos para rendimiento de combustible, conducción, manejo, ruido/vibración/dureza, rendimiento de frenos, rendimiento de asientos, etc.
Panel 5	Peso	Valor relativo de frenado y valor relativo de prueba de emisión para todos los modelos. Eliminación de bomba de gasolina, fijada.
Panel 6	Economía del combustible	Fijado el consumo de combustible por kilómetro de autopista para todos los modelos.
Panel 7	Rendimiento	Fijado el tiempo transcurrido para 0-60 mph para todos los modelos.
Panel 8	Complejidad	Fijado el número de opciones de cliente discrecionales y combinaciones fabricables.
Panel 9	Facilidad de servicios	Fijada la estimación del número total de horas de servicio durante 50.000 millas.
Panel 10	Vulnerabilidad	Fijado el coste de reparación calculado para una colisión típica.
Panel 11	Emisiones sanas	Fijado el cumplimiento de todas las normas aplicables de Federal Motor Vehicle Safety y Federal Clean Air.
Panel 12	Costes variables	Fijados los costes variables <i>versus</i> modelo anterior.
Panel 13	Inversión del programa	Fijada la inversión total para montaje, instalaciones, lanzamiento e ingeniería.
Panel 14	Precio	Fijado el precio de entrega al por mayor, fijado para todos los modelos.
Panel 15	Volúmenes de ventas	Fijada la proyección de cinco años para tendencia en volumen de ventas.
Panel 16	Rentabilidad	Fijada la rentabilidad del programa desde el punto de vista de ganancias totalmente contabilizadas.
Panel 17	Características	Fijadas todas las características estándar y opcionales del producto por modelo.
Panel 18	Exportación	Fijado los mercados y volúmenes de exportación.

FIGURA 3.3 Metas de Ford Mustang en un gráfico de 18 paneles.

más alto que el del producto o componente al que sustituyen. Además, con frecuencia requieren que cualquier diseño que permanezca debe tener un cierto nivel de rendimiento; de otro modo, debe ser reemplazado por un diseño más fiable. La fiabilidad mínima del producto que permanece debe fijarse de acuerdo con uno o más de los siguientes criterios: (1) fiabilidad del competidor o benchmark; (2) requisitos del cliente, o (3) una meta que supere los requisitos del benchmark o del cliente.

Uso supuesto frente a uso no supuesto. ¿Deben diseñarse las escaleras de mano de modo que el usuario pueda estar sin peligro de pie en el escalón superior, incluso aunque el escalón esté claramente etiquetado «No pise aquí»? ¿Debe un hospital diseñar su sala de urgencias para ocuparse de muchos pacientes normales no urgentes que lleguen a sus puertas? Estas son preguntas de política que deben decidirse antes de que empiece el proyecto. Las respuestas pueden tener un impacto considerable en el producto final y necesitan ser desarrolladas en referencia a la estrategia de la organización y al entorno en que se usan sus productos.

Exigencia de un proceso formal de planificación de la calidad. Se requiere un proceso formal y estructurado para asegurar que los planificadores del producto identifican sus clientes y diseñan productos y procesos que satisfarán las necesidades del cliente con un mínimo de deficiencias. La formulación estructurada se considera a veces una barrera a la creatividad. Nada puede ser menos cierto. La planificación formal de la calidad identifica los puntos en los que se requiere creatividad, y la permite, fomenta y apoya. La planificación formal asegura también que la creatividad se enfoca a los clientes y que los diseños creativos se entregan al fin al cliente libres de la influencia destructiva de las deficiencias.

Custodia de los diseños y control de los cambios. Se tomarán medidas específicas para asegurar que los diseños aprobados están documentados y accesibles. Cualquier cambio en el diseño debe ser validado, recibir las aprobaciones adecuadas, ser documentado e incorporado sin errores en el producto o proceso. Se deben asignar a individuos concretos la responsabilidad, autoridad y recursos para mantener los diseños finales y administrar el control de los cambios.

Políticas de Ford relativas al Mustang. Ford fijó tres políticas concretas relacionadas con diseños nuevos y a los que permanecen. Se exigió que los diseños nuevos fueran más fiables que los antiguos. Se exigió también que prestasen al producto final contribuciones demostrables de coste-beneficio. Finalmente, se esperaba que las principales características mejorasen los resultados del principal competidor, Camaro/Firebird.

Como Mustang necesitaba mantener su reputación de coche fiable, se estableció una política de pruebas más exigente. Además de la seguridad, economía, fiabilidad, durabilidad y otras pruebas que todos los coches Ford deben pasar, se requirió que el Mustang pasara pruebas tales como arranque a 500 drag sin un fallo y frenados bruscos y repetidos sin debilitarse.

Establecer el equipo. El enfoque multifuncional para la planificación de calidad es efectivo por varias razones:

- La implicación en un equipo fomenta el compartir ideas y experiencias, y el sentido de compromiso de formar parte y de ayudar a «nuestra» organización a conseguir su meta.
- La diversidad de los miembros de un equipo produce un conocimiento funcional más completo del producto y de los procesos que se planifican. Planificar un producto requiere una comprensión completa de cómo se hacen las cosas en las distintas partes de la organización.
- La representación de distintos departamentos o funciones fomenta la aceptación y la realización del nuevo plan en toda la organización. Productos o procesos diseñados con la participación activa de las áreas afectadas tienden a ser superiores técnicamente y aceptados más fácilmente por los que deben ejecutarlos.

Pautas para la selección del equipo. Cuando se selecciona un equipo, el comité de calidad identifica aquellas partes de la organización que tienen un interés en los resultados. Hay varios criterios para elegir:

- Los que más se van a ver afectados por el resultado del proyecto.
- Los departamentos o funciones responsables de los varios pasos del proceso.
- Aquellos con información, conocimiento o habilidad especiales en el diseño del proyecto.
- Las áreas que pueden resultar de ayuda en la ejecución del plan.

El equipo de Mustang. Ford estableció un equipo específico de individuos de todas las partes clave de la empresa, que incluían:

Organizaciones con interés en el proyecto

Ingeniería de vehículo
Planificación de producto y de negocio

Ingeniería de carrocería y chasis

Ingeniería de motor

Diseño de vehículo
Manufactura y montaje
Ventas y marketing

Compras
Finanzas

Papel

Líder del equipo.

Preparar las premisas del producto y los objetivos de resultados.

Definir las mejoras del producto para satisfacer al cliente en comodidad y seguridad y para cumplir con las normas federales previstas de seguridad de vehículos de motor.

Definir las mejoras del motor para satisfacer los deseos del cliente en fuerza y conducción y cumplir con los requisitos de aire limpio y de filtro de gasolina.

Sorprender con un diseño de alto estilo.

Asegurar que el producto es factible y de alta calidad.

Proporcionar la «voz del cliente» y asegurar que el producto da en la diana en el mercado.

Incluir a los suministradores en el proyecto.

Ayudar al equipo a desarrollar un paquete de negocio atractivo financieramente.

Además de su experiencia profesional para la tarea, muchos miembros del equipo eran también entusiastas de Mustang, que aportaron una pasión y comprensión de las necesidades del cliente que habría sido difícil duplicar.

Dado que un automóvil es un producto de consumo altamente complejo, se dividió el trabajo entre cinco grandes equipos: carrocería y estructura, interior y electricidad, motor, chasis y vehículo. Cada gran equipo tenía miembros de todas las principales partes interesadas y era capaz de manejar su porción de programa con autonomía dentro del diseño global y de los parámetros del gráfico de los 18 paneles.

La dirección y coordinación global del trabajo entre los equipos grandes se gestionó con una reunión semanal de «asuntos importantes» entre los líderes de los equipos grandes y el director del programa. Estas reuniones se centraron en las cifras principales del programa incorporadas en el gráfico de los 18 paneles.

PASO 2: IDENTIFICAR A LOS CLIENTES

Este paso puede parecer innecesario; por supuesto que los planificadores y diseñadores saben quiénes son sus clientes: el conductor del automóvil, el depositario de la cuenta bancaria, el paciente que se toma la medicina. Pero éstos no son los únicos clientes, incluso no son necesariamente los más importantes. Los clientes constituyen un elenco completo de personajes que necesitan ser bien comprendidos.

En general, existen dos grupos principales de clientes: los *clientes externos* (aquellos de fuera de la organización productora) y los *clientes internos* (aquellos de dentro de la organización productora).

Tipos de clientes externos. El término «cliente» se usa frecuentemente de manera vaga; puede referirse a una organización entera, a una unidad de una organización mayor o a una persona. Existen varios tipos de clientes, algunos obvios, otros escondidos. A continuación se da una lista de las principales categorías que ayudará a identificar a todos los clientes:

El comprador	Alguien que compra el producto para sí mismo o para otro; v.g., cualquiera que compra comida para su familia.
El cliente o usuario final	Alguien que se beneficia del producto final; v.g., el paciente que acude al servicio de asistencia sanitaria para una prueba de diagnóstico.
Comerciantes	Las personas que compran productos para revenderlos, mayoristas, distribuidores, agencias de viajes y agentes de bolsa, y cualquiera que maneja el producto, como el empleado del supermercado que coloca el producto en el estante.
Procesadores	Organizaciones y personas que usan el producto como medio para producir su propio producto; v. g., una refinería que recibe petróleo en bruto y lo procesa en productos diferentes para varios tipos de clientes.
Suministradores	Quienes suministran algún integrante del proceso; v.g., el fabricante de las bujías de un coche o el bufete legal que asesora a las empresas sobre asuntos de derecho medioambiental. Los proveedores también son clientes. Tienen necesidad de información respecto a especificaciones de producto, deficiencias, encargos predecibles, etc.
Fabricantes de equipamiento original (OEM)	Compradores de un producto para incorporarlo al propio; v.g., un fabricante de ordenadores que usa las disqueteras de otro fabricante para sus ordenadores.
Clientes potenciales	Aquellos que no usan normalmente el producto pero pueden llegar a ser clientes; v.g., un viajero por negocios que alquila un coche puede adquirir un coche similar cuando llega la hora de comprarse uno para su uso personal.
Clientes ocultos	Una serie de diferentes clientes que pueden ser fácilmente ignorados porque no vienen a la mente al momento. Pueden ejercer gran influencia sobre el diseño del producto: legisladores, críticos, líderes de opinión, servicios de pruebas, responsables de pagos, medios de comunicación, público en general, asociaciones profesionales.

Clientes internos. Dentro de una organización cada uno desempeña tres papeles: suministrador, procesador y cliente. Cada individuo recibe algo de alguien, hace algo con ello y se lo pasa a un tercero. La eficacia en satisfacer las necesidades de estos clientes internos puede tener un gran impacto sobre el cumplimiento con los clientes externos. La identificación de los clientes internos requerirá cierto análisis porque muchas de estas relaciones tienden a ser informales, con el resultado de una percepción difusa de quiénes son los clientes y cómo se verán afectados. Por ejemplo, si una empresa decide introducir la fabricación «justo a tiempo» en uno de sus planes, esto tendrá un efecto significativo sobre compras, ventas, organización, etcétera.

La mayoría de las organizaciones intenta poner en marcha un mecanismo que permita que funciones aparentemente competitivas negocien y resuelvan diferencias pensando en la meta más alta de satisfacer las necesidades del cliente. Puede incluir la celebración de reuniones semanales de jefes de departamento o la publicación de manuales de procedimientos. Sin embargo, a menudo estos mecanismos no funcionan porque las necesidades de los clientes internos no son bien entendidas y se quiebra la comunicación entre las funciones. Esta es la causa de que una meta importante en un proceso de planificación de la calidad sea identificar quiénes son los clientes internos, descubrir sus necesidades y planificar cómo satisfacer estas necesidades. Esta es también otra razón para tener un equipo multifuncional implicado en la planificación; son personas que con toda probabilidad reconocerán los intereses legítimos de los clientes internos.

Identificación de los clientes. Además de las pautas generales que se acaban de exponer, es muy útil frecuentemente dibujar un diagrama de flujo de relativo alto nivel con los procesos que afectan al producto que se planifica. Un análisis cuidadoso de este diagrama de flujo proporcionará a menudo una nueva perspectiva, identificando los clientes que podían haberse ignorado y refinando la comprensión de cómo interactúan con el proceso. La Figura 3.4 es un ejemplo de ese diagrama. El examen del diagrama revela que el papel del «cliente» es en la realidad dos papeles diferentes: hacer el pedido y usar el producto. Pueden ser desempeñados o no por el mismo individuo, pero son dos papeles bien distintos y cada uno necesita ser comprendido en sus necesidades específicas.

Cientes de Ford Mustang. El cliente más crítico de Ford Mustang era el «cliente final», es decir, la persona que compraría el vehículo. El primer grupo demográfico objetivo fue el comprador del Mustang GT. (El modelo GT es el que determina la imagen y el modelo que debe atraer al entusiasta si la línea de coche ha de tener éxito).

Entre los otros pocos clientes externos vitales estaban:

- Distribuidores.
- Suministradores.

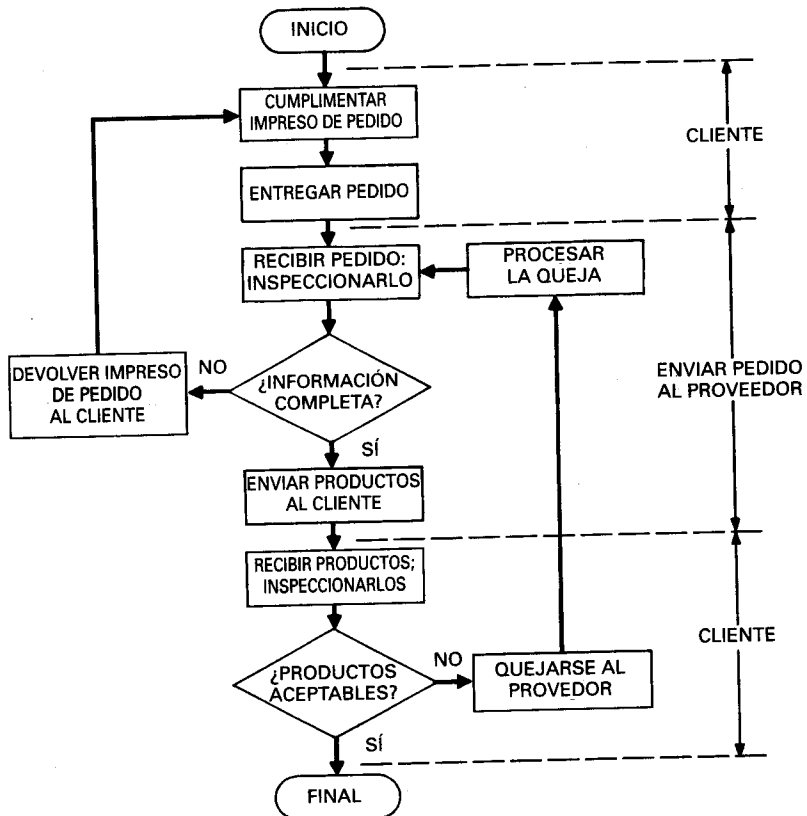


FIGURA 3.4 El diagrama de flujo y los clientes [De Juran, J. M. (1988), *Quality Control Handbook*, 4.ª ed. McGraw-Hill, Nueva York, p. 6.6].

- Gobierno:
 - Agencia para la Protección Medioambiental (EPA).
 - Administración Nacional de Seguridad en el Tráfico y las Carreteras (NHTSA).
 - Comisión Federal de Comercio (FTC).
- Medios de comunicación (tanto fuentes externas como internas):
 - Medios de comunicación internos:
 - Red de Comunicaciones de Ford (FCN).
 - Publicaciones de los empleados.
 - Medios de comunicación externos:
 - Revistas de entusiastas del motor, como *Motor Trend Magazine*, *Car and Driver*, *Road & Track*, *Automobile Magazine*, *AutoWeek*, etc.
 - Revistas comerciales, como *Ward's AutoWorld*, *Automotive News*, *Automotive Industries*, *Automotive Engineering*.
 - Programas nacionales de televisión, como «Motorweek», «MotorTrend».
 - Programas regionales y locales de televisión.
 - Programas regionales y locales de radio.
 - Cobertura de periódicos regionales y locales.

Clientes internos

- Dirección de la empresa.
- Oficina de ingeniería del producto.
- Planta de montaje.
- División de servicio al cliente de Ford.
- Marketing.
- Ventas.
- Compras.
- Relaciones públicas.
- Medios de comunicación internos:
 - Red de Comunicaciones de Ford (FCN).
 - Publicaciones de los empleados.

PASO 3: DESCUBRIR LAS NECESIDADES DEL CLIENTE

El tercer paso de la planificación de la calidad es descubrir las necesidades tanto de los clientes internos del producto como de los externos. Algunas de las actividades necesarias para el descubrimiento efectivo de las necesidades del cliente incluyen:

- Planificar la recogida de las necesidades de los clientes.
- Confeccionar una lista de las necesidades de los clientes en su propio lenguaje.
- Analizar y establecer prioridad entre las necesidades de los clientes.
- Traducir sus necesidades a «nuestro» lenguaje.
- Establecer unidades de medición y sensores.

Nuestra propia experiencia nos indica que las necesidades de los seres humanos son variadas y complejas. Esto constituye todo un reto para el equipo de planificación, porque las acciones del cliente no son siempre coherentes con lo que *dicen* que desean. El reto para la planificación de la calidad consiste en identificar las necesidades más importantes entre todo el conglomerado de las necesidades expresadas o implícitas del cliente. Sólo entonces puede el producto gustar a los clientes.

Al diseñar un producto, existen dos aspectos relacionados pero distintos en lo que se está desarrollando: los elementos *tecnológicos*, lo que las características del *producto realmente harán o de cómo funcionarán*, y los elementos *humanos*, los *beneficios que los clientes recibirán al usar el producto*. Deben considerarse los dos juntos.

Descubrir las necesidades del cliente es una tarea compleja. La experiencia muestra que los clientes normalmente no explican en términos sencillos lo que quieren exactamente; con frecuencia no mencionan incluso algunas de sus necesidades más básicas. La precisión de las declaraciones bancarias, la competencia de un médico, la fiabilidad de un ordenador y la corrección gramatical de una publicación pueden darse por sentadas y no pedirse de forma explícita.

Una de las formas en que los clientes expresan sus necesidades es hablando de los problemas que experimentan y de sus expectativas de que un producto les resuelva estos problemas. Por ejemplo, un cliente puede declarar: «Hay veces que no puedo contestar personalmente al teléfono, pero no quiero que quien llama se sienta molesto o disgustado por un sistema de contestador automático», o «La dignidad personal de mi madre y el cariño de la gente son muy importantes para mí. Quiero encontrar un servicio de atención sanitaria que la trate como a una persona, no como a un enfermo». Incluso cuando no se *expresa* la necesidad en tales términos, el arte y la ciencia de descubrir necesidades consiste en comprender exactamente el beneficio que el cliente espera conseguir.

Cuando las características de un producto se ajustan a la necesidad de un cliente, esto produce al cliente una sensación de satisfacción. Si fracasa al prestar la característica prometida libre de defectos, el cliente siente disgusto. Incluso aun cuando el producto funcione de la forma en que ha sido diseñado, un producto competidor que tenga un rendimiento o prestación superior puede proporcionar una mayor satisfacción al cliente.

Necesidades declaradas y necesidades reales. Los clientes declaran normalmente sus necesidades desde su punto de vista y en su lenguaje. Los clientes pueden declarar sus necesidades diciendo los bienes o servicios que desean adquirir. Sin embargo, sus necesidades reales son los beneficios que creen que recibirán. Como ilustración:

El cliente desea adquirir...

Pasta fresca

El ordenador personal más nuevo

Seguro de enfermedad

Billete de avión

El beneficio que el cliente necesita puede incluir...

Alimento y sabor.

Escribir informes rápida y fácilmente.

Encontrar información en la Web.

Ayudar a los niños a aprender matemáticas.

Seguridad contra catástrofes financieras.

Acceso a atención sanitaria de alta calidad.

Elección de médicos y clínicas.

Transporte, comodidad, seguridad y ajuste a su conveniencia.

El fracaso en captar la diferencia entre las necesidades declaradas y las necesidades reales puede socavar un proyecto de planificación de la calidad. La comprensión de las necesidades reales no significa que los planificadores tengan que desechar las declaraciones de los clientes y sustituirlas por su propia comprensión tecnológica superior, como si fueran las necesidades reales de los clientes. La comprensión de las necesidades reales significa preguntar y responder cuestiones como:

- ¿Por qué el cliente compra este producto?
- ¿Qué servicio espera de él?
- ¿Cómo se beneficiará de él?
- ¿Cómo lo usa el cliente?
- ¿Qué ha provocado anteriormente las quejas del cliente?
- ¿Por qué los clientes han elegido productos de la competencia en vez de los nuestros?

Necesidades percibidas. Los clientes declaran sus necesidades basándose, naturalmente, en sus *percepciones*. Éstas pueden diferir completamente de las percepciones del proveedor respecto a lo que constituye la calidad del producto. Los planificadores pueden engañarse a sí mismos al considerar que las percepciones del cliente son las que están equivocadas y al no centrarse en cómo estas percepciones influyen sobre sus hábitos de consumo. Aun cuando tales diferencias entre clientes y proveedores son fuente potencial de problemas, también pueden suponer una oportunidad. La comprensión superior de las percepciones del cliente puede conducir a una ventaja competitiva.

Necesidades culturales. Las necesidades de los clientes, especialmente las de los clientes internos, van más allá de los productos y los procesos. Incluyen necesidades importantes de seguridad en el trabajo, autoestima, respeto a los otros, continuidad de pautas de hábitos y otros varios elementos de los que, en sentido amplio, se llaman «valores culturales»; éstos pocas veces se declaran abiertamente. Cualquier cambio propuesto se convierte en una amenaza a estos importantes valores, y por tanto se le ofrecerá resistencia hasta que se entienda el carácter de la amenaza.

Necesidades asignables a un uso no supuesto. Muchos fallos en la calidad se originan porque un cliente usa el producto de una manera distinta de la que pretendía el proveedor. Esta práctica reviste varias formas. Los pacientes acuden al servicio de urgencias para asistencia no urgente. Se asignan trabajadores no formados a procesos que requieren trabajadores formados. Un equipo no recibe el mantenimiento preventivo especificado.

Factores como la seguridad pueden añadir costes, pero pueden resultar en una reducción del coste global al ayudar a evitar costes mayores originados en un mal uso del producto. Lo que es esencial es aprender lo siguiente:

- ¿Cuál será el uso (y el mal uso) real?
- ¿Cuáles son los costes asociados?
- ¿Cuáles son las consecuencias de limitarse sólo al uso pretendido?

Seguridad humana. La tecnología pone productos peligrosos en manos de aficionados que no siempre poseen los conocimientos necesarios para manejarlos sin accidentes. También crean productos derivados peligrosos que amenazan a la seguridad y salud humanas y al medio ambiente. La importancia de todo esto es tan grande que gran parte del esfuerzo de la planificación del producto y del proceso debe estar dirigido a reducir estos riesgos hasta un nivel aceptable. Numerosas leyes civiles y penales obligan a estos esfuerzos.

«Amistoso para el usuario». La condición de aficionado de muchos usuarios ha dado origen a la expresión «Amistoso para el usuario», para describir que las características del producto permiten al aficionado utilizar directamente los productos tecnológicos. Por ejemplo, el lenguaje de la información publicada debe ser:

- *Sencillo.*
- *Sin ambigüedades.*
- *Fácilmente comprensible* (entre los ejemplos de incumplimiento conocidos están los documentos legales, manuales de instrucciones del usuario, impresos administrativos, etc. Impresos muy usados, como los de devolución de impuestos, deberían sufrir una prueba de campo con una muestra de las mismas personas que luego tendrán que rellenarlos).
- *Ampliamente compatible* (por ejemplo, las nuevas versiones de software deben ser compatibles con todas las versiones anteriores).

Rapidez de servicio. Los servicios deben ser rápidos. En nuestra cultura, un elemento principal de competencia es la rapidez en el servicio. Otra fuente de una demanda creciente de

rapidez está en los programas interconectados (como el servicio de correos o los viajes por avión). Otro ejemplo más se halla en el uso creciente de fabricación justo a tiempo, que requiere de entregas de material fiables para reducir los inventarios al mínimo. Todos estos ejemplos muestran la necesidad de incluir el elemento de la rapidez en la planificación para satisfacer las necesidades del cliente.

Necesidades del cliente relacionadas con las deficiencias. En el caso de que un producto falle, surge una nueva serie de necesidades del cliente: cómo restablecer el servicio y cómo compensar por las pérdidas e inconvenientes asociados. La solución ideal está, claramente, en planificar la calidad de modo que no haya fallos. En este punto trataremos de lo que necesitan los clientes cuando los fallos ocurren.

Garantías. Las leyes que rigen las ventas implican ciertas garantías dadas por el proveedor. No obstante, en nuestra compleja sociedad se ha hecho necesario proporcionar contratos escritos específicos que definan qué cubre la garantía y durante cuánto tiempo. Además, debería estar claro qué responsabilidades tiene cada uno.

Efecto del tratamiento de las quejas sobre las ventas. Aunque las quejas tratan sobre todo del disgusto con el producto, existe un efecto lateral sobre la capacidad de venta. La investigación en esta área apunta lo siguiente: de los clientes disgustados con los productos, casi el 70 por ciento no se queja. La proporción de los que se quejan varía mucho según el tipo de producto implicado. Las razones para no quejarse son principalmente: (1) no merece la pena el esfuerzo de quejarse; (2) la creencia de que quejarse no serviría para nada, y (3) la falta de conocimiento de cómo quejarse. Más del 40 por ciento de los clientes que se quejaron estaban descontentos con la respuesta dada por los proveedores. Una vez más, los porcentajes varían según el tipo del producto.

La capacidad de venta futura está fuertemente influida por la acción emprendida como consecuencia de las quejas. También depende de la lealtad a la marca. Incluso los clientes de marcas populares de productos de «gran consumo», como los bienes duraderos, servicios financieros y servicios automovilísticos, reducirán su intención de comprar si perciben que no se hace caso de sus quejas.

La misma investigación dedujo que un enfoque organizado del tratamiento de las quejas proporciona un alto retorno en inversión. Entre los elementos de este enfoque organizado están:

- Un centro de respuesta con personal accesible las 24 horas a los consumidores y/o un número de teléfono gratuito.
- Formación especial a los empleados que contestan el teléfono.
- Resolución activa de las quejas para reducir las pérdidas de clientes en el futuro.

Mantener a los clientes informados. Los clientes son muy sensibles a ser víctimas de acciones secretas de un proveedor, como implica la frase «¡Que se cuide el comprador!». Cuando se descubren y publican más tarde estos secretos, el daño a la imagen de calidad del proveedor puede ser considerable. En muchos casos los productos son aptos para el uso a pesar de alguna no conformidad. En otros casos el asunto puede ser discutible. Y en otros casos el acto de la entrega es, por lo menos, falto de ética y a lo peor ilegal.

Los clientes también tienen necesidad de ser informados en muchos casos relacionados con fallos del producto. Existen muchas situaciones en las que una interrupción en el servicio forzaría a los clientes a esperar un tiempo indefinido hasta su restablecimiento. Ejemplos obvios son los cortes de suministro eléctrico y los retrasos en el transporte público. En estos casos los clientes se impacientan. No pueden resolver el problema, deben dejar que lo haga el proveedor. Sin embargo, quieren estar informados de la clase de problema y especialmente del

tiempo probable de su solución. Muchos proveedores se descuidan en mantener informados a los clientes y en consecuencia sufren un descenso de su imagen de calidad. Como contraste, algunas compañías aéreas se afanan al máximo por mantener informados a sus clientes de las razones de un retraso y de los progresos en ponerle remedio.

Plan para recoger las necesidades de los clientes. Las necesidades de los clientes van cambiando. No existe una lista final de las necesidades de los clientes. Esto puede ser frustrante, pero los equipos de planificación deben entender que están en medio del proceso de planificación, y que hay fuerzas como la tecnología, la competencia, el cambio social, etc., que pueden crear necesidades o pueden cambiar la prioridad de las necesidades existentes. Resulta extremadamente importante consultar con los clientes con frecuencia y controlar el mercado.

Algunos de los medios más corrientes para recoger las necesidades del cliente son:

- Encuestas a los clientes, grupos focales, programas y estudios de investigación del mercado.
- Comunicaciones de rutina, como llamadas e informes de ventas y servicios, inspecciones de gestión, publicaciones internas.
- Seguimiento de las quejas de los clientes, informes de incidencias, cartas y contactos telefónicos.
- Experimentos de simulación de uso y procesos de planificación que implican al cliente.
- Empleados con conocimiento especial del cliente: ventas, servicio, administración, secretariado y supervisores que están en contacto con los clientes.
- Reuniones con los clientes.
- Conferencias de usuarios para el usuario final.
- Información sobre productos de los competidores.
- Visitas personales a consumidores para observar y discutir:
 - Cómo se usa el producto.
 - Usos no supuestos.
 - Fallos de servicio realizados por terceros.
 - Qué características actuales o nuevas aliviarán de tareas pesadas.
 - Cambios en hábitos y cultura.
 - Cambios en las ventas.
 - Existencia de cambios en precios especiales.
 - Venta de piezas de repuesto o servicio posventa.
 - Adquisición de opciones.
- Datos del gobierno o de un laboratorio independiente.
- Cambios de regulaciones federales, estatales y locales que identifiquen necesidades actuales o una oportunidad nueva.
- Análisis competitivo e información de campo que compare los productos con los de los competidores.
- Experiencia personal en tratos con el cliente y el producto (no obstante, es importante ser cauto y no dar a la experiencia personal demasiado peso sin verificarla directamente con los clientes. Los analistas deben recordar que contemplar las necesidades y requisitos del cliente desde un punto de vista personal puede ser una trampa).

Con frecuencia, los clientes no expresan sus necesidades desde el punto de vista de los beneficios que desean recibir de la adquisición y uso del producto.

Descubrimiento de las necesidades del cliente de Mustang. Al diseñar al Mustang, Ford confió especialmente en las siguientes fuentes de información de las necesidades del cliente:

- Investigación cuantitativa del mercado.
- Investigación cualitativa del mercado.

- Estudios de inspección.
- Investigación empírica.
- Información aportada por el distribuidor.
- Encuestas a los clientes.
- Interacción directa con los clientes.
- Ecos en los medios de comunicación.
- Informes de evaluación del producto, internos y externos.
- Evaluaciones de la competencia.

Recoger la lista de las necesidades de los clientes en su lenguaje. Para que una lista de las necesidades de los clientes sea significativa al planificar un producto nuevo, debe estar formulada bajo el punto de vista de los beneficios buscados. Otra forma de decirlo es captar las necesidades en la voz del cliente. Al centrarse en los beneficios buscados por el cliente, en vez de en los medios de prestar los beneficios, los diseñadores ganarán una comprensión mejor de lo que el cliente necesita y de cómo usará el producto. El formular las necesidades bajo el punto de vista de los beneficios buscados puede revelar también oportunidades para mejorar la calidad, que a veces no se descubren concentrándose sólo en las características del producto.

Analizar y fijar las prioridades de las necesidades del cliente. La información que se recoge realmente de los clientes es con frecuencia demasiado amplia, demasiado vaga y demasiado voluminosa para usarla directamente al diseñar un producto. Se necesitan tanto especificidad como prioridad para asegurar que el diseño satisface realmente las necesidades y que el tiempo consumido en diseñar para esas necesidades es en verdad lo más importante. Las siguientes actividades ayudan a obtener precisión y enfoque centrado:

- Organizar, consolidar y fijar prioridades en la lista de las necesidades, tanto de los clientes internos como de los externos.
- Determinar la importancia de cada necesidad, sea de los clientes internos o de los externos.
- Descomponer cada necesidad en términos precisos, de modo que se pueda identificar su respuesta específica en un diseño.
- Traducir estas necesidades al lenguaje de la organización proveedora.
- Establecer medidas y métodos de medición específicos para cada necesidad.

Una de las mejores herramientas para analizar y organizar las necesidades de los clientes es la «matriz de planificación de la calidad».

Matrices de planificación de la calidad. La planificación de la calidad genera una gran cantidad de información que es útil y necesaria, pero sin un modo sistemático de tratar su organización y análisis, el equipo de planificación puede verse abrumado por su volumen y perder el mensaje que contiene.

Aunque los planificadores han desarrollado varios enfoques de organización de toda esta información, la herramienta de planificación más conveniente y básica es la *matriz de planificación de la calidad*. La matriz es una herramienta muy versátil que puede adaptarse a gran número de situaciones. Los procesos de planificación de la calidad utilizan varias clases de matrices, como:

- Matriz de necesidades del cliente.
- Matriz de análisis de necesidades.
- Matriz de diseño del producto.
- Matriz de diseño del proceso.
- Matriz de control del proceso.

Además de para registrar la información, estas herramientas son particularmente útiles para analizar las relaciones entre los datos recogidos y para facilitar la conversión por pasos de las necesidades del cliente en las características del producto, y luego de las características del producto en planes y características del proceso. Esta conversión está ilustrada en la Figura 3.5. El análisis de los clientes y sus necesidades suministra la base para diseñar los productos. El resumen de este diseño sustenta el diseño del proceso, que a su vez sustenta la matriz de control.

Para la mayoría de los proyectos de planificación bastará con matrices sencillas. Para otros proyectos, matrices de despliegue funcional de la calidad más complejas resultarán útiles para calcular los compromisos en el diseño. Todas estas matrices se diseñan para conseguir que el equipo registre y compare a la vez las relaciones entre muchas variables. Ilustraremos algunas de estas matrices en el punto adecuado del proceso de la planificación. La Figura 3.6 ilustra la disposición genérica de cualquiera de estas matrices. En general, los encabezamientos de las filas son los «qué» del análisis (el cliente que hay que satisfacer, las necesidades que hay que cumplir, etc.). Las columnas son los «cómo» (las necesidades que, cuando cumplidas, satisfarán al cliente; las características del producto que cumplirán las necesidades, etc.). La última fila de la matriz contiene generalmente las metas específicas medibles del «cómo» antedicho. El cuerpo de la matriz expresa con símbolos o cifras el impacto del «cómo» en el «qué» (v.g., ninguno, moderado, fuerte, muy fuerte). Se pueden añadir otras columnas para dar medidas específicas de la importancia de las respectivas filas, benchmarks, etc.

Matriz de necesidades del cliente. La Figura 3.7 proporciona un ejemplo sencillo de matriz de necesidades del cliente. La columna izquierda lista, por orden de prioridad, todos los clientes externos e internos. Los encabezamientos de las columnas son las varias necesidades que se han descubierto. Comprobando su importancia o asignándole un valor, es posible crear un cuadro sencillo pero completo de la importancia de satisfacer cada necesidad. Todo desarrollo de producto debe operar dentro de un presupuesto. Fijando las prioridades de los clientes y sus necesidades se consigue que el presupuesto se centre en lo que es más importante.

Necesidades precisas del cliente. Una vez que se han fijado las necesidades que se han de cumplir, deben describirse en términos lo suficientemente precisos para diseñar un producto basado en ellas. La matriz de necesidades del cliente ayuda a realizar este análisis. En este punto, las necesidades del cliente son, con toda probabilidad, una mezcla de expectativas relativamente amplias, como «fácil de usar», y peticiones más específicas, como «acceso los sábados». La Figura 3.8 ilustra de qué forma se descomponen las necesidades amplias (llamadas «primarias») en niveles sucesivos de especificación («secundario», «terciario», etc.). Adviértase que primario y secundario no significan más o menos importante, sino, respectivamente, menos específico y más específico. Se debe descomponer cada necesidad hasta el nivel en que pueda (1) ser medida y (2) servir sin ambigüedades de guía del diseño del producto. En algunos casos pueden bastar dos niveles de detalle; en otros se necesitarán cuatro o cinco. La Figura 3.8 ilustra cómo se puede hacer para el «servicio» de primera necesidad de un grupo de ejercicio de la medicina.

Necesidades del cliente de Mustang. Además de transporte básico, surgieron las siguientes necesidades como las más importantes para los clientes de Mustang:

- Seguridad.
- Rendimiento.
- Imagen.
- Comodidad.
- Conveniencia.
- Diversión.

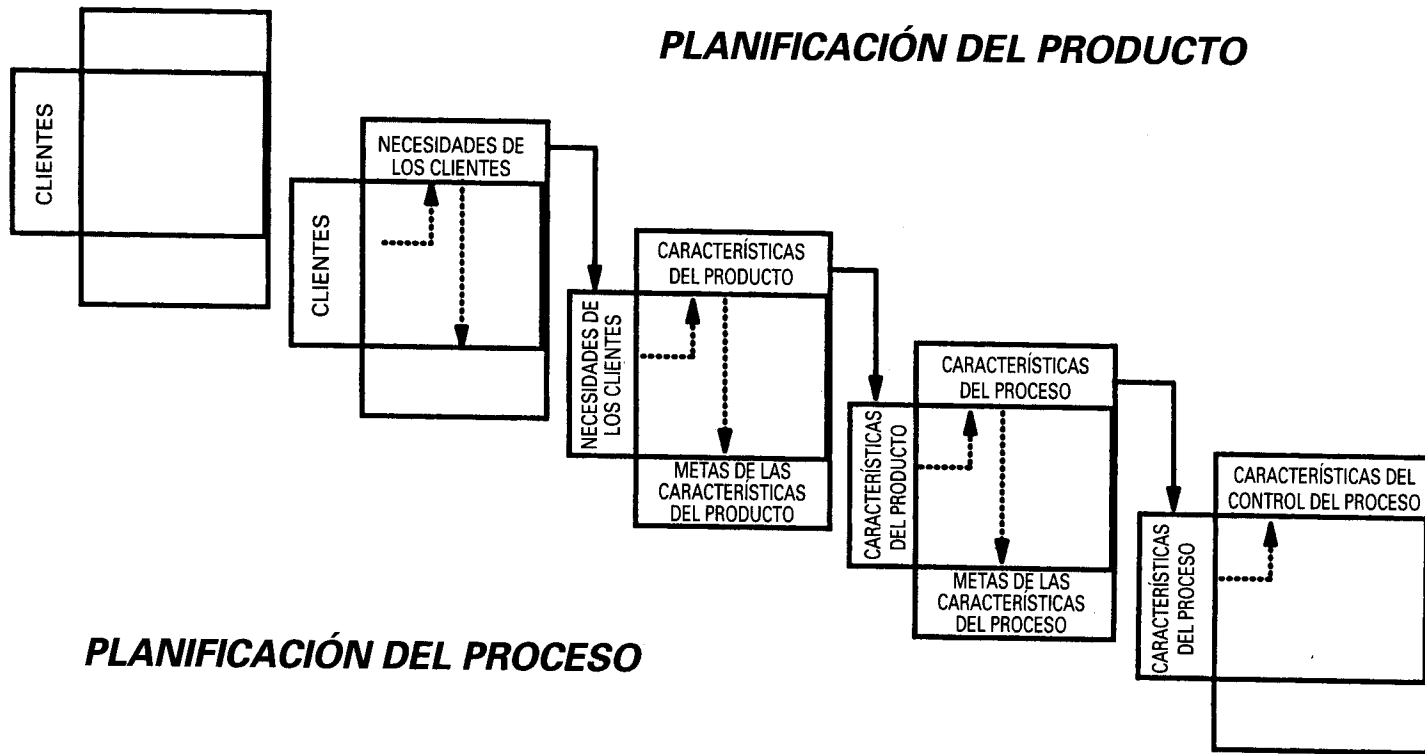


FIGURA 3.5 Matrices de planificación de la calidad (*Juran Institute, Inc. Copyright 1994. Usada con su permiso*).

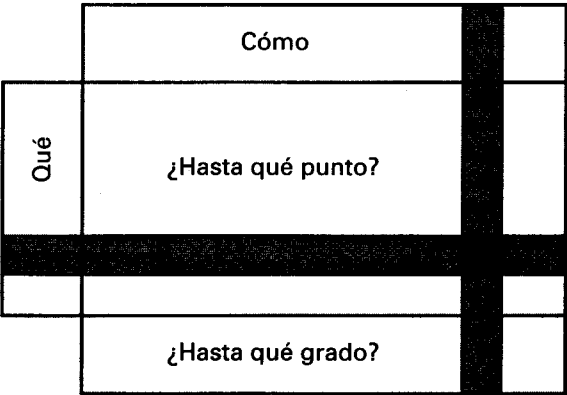


FIGURA 3.6 Matriz genérica de planificación (Juran Institute, Inc. Copyright 1994. Usada con su permiso).

	Atractivo	Artículos informativos y bien escritos	Titulares que atraigan la atención	Circulación estable	Que venda	Bastante tiempo	Material completo	Sin cambios de último minuto
Lectores	●	●	●					
Anunciantes	●	○	●	●	●			
Impresores						●	●	●
Tipógrafos o compositores						●	●	●
Separadores de color						●	●	●
Quiosco expositor de publicaciones	●	○	●	●	●			

Leyenda

● Muy fuerte

○ Fuerte

△ Débil

FIGURA 3.7 Matriz de necesidades del cliente para una revista (Juran Institute, Inc. Copyright 1994. Usada con su permiso).

Primera necesidad	Segunda necesidad	Tercera necesidad
Servicio	Horas de funcionamiento	Abierto de 17 a 21 horas. Sábado.
	Acceso de transporte	Parada de bus en tres manzanas. Amplio aparcamiento.
	Breve espera	Cita urgente dentro de las 24 horas. Cita normal dentro de 14 días. Tiempo de espera en cita menos de 15 minutos.
	Servicios complementarios disponibles	Farmacia. Laboratorio.

FIGURA 3.8 Matriz de análisis de necesidades para una consulta médica (*Juran Institute, Inc. Copyright 1994. Usada con permiso*).

- Fiabilidad/confianza.
- Durabilidad.
- Bajo coste de propiedad.
- Ergonomía.
- Bajo consumo de combustible.
- Manejo en todo tipo de climas.
- Calidad de conducción en cualquier superficie de carretera.

Traducir sus necesidades a «nuestro» lenguaje. Las necesidades precisas del cliente que se han identificado pueden expresarse en cualquier de los siguientes lenguajes:

- El lenguaje del cliente.
- El lenguaje («nuestro») del proveedor.
- Un lenguaje común.

Un viejo aforismo proclama que británicos y americanos están separados por un lenguaje común. La apariencia de un lenguaje o dialecto común puede ser causa de problemas, porque ambas partes creen que se entienden entre sí y esperan ser comprendidas. El fallo en la comunicación motivado por diferencias no reconocidas puede originar una incomprensión adicional que no hace más que complicar la situación. Es imperativo, por lo tanto, que los planificadores tomen medidas extraordinarias para asegurar que se comprenden realmente las necesidades del cliente, mediante su traducción sistemática. La necesidad de traducir se aplica tanto a clientes internos como externos. Varias funciones empresariales emplean jergas que con frecuencia no son comprendidas por otras funciones.

La terminología vaga constituye un caso especial de traducción que puede surgir incluso (y a menudo especialmente) entre clientes y proveedores que creen que están hablando el mismo dialecto. Palabras idénticas tienen significados múltiples. Palabras descriptivas no describen con precisión tecnológica.

Ayudas a la traducción. Existen numerosas ayudas para aclarar la vaguedad y crear un puente entre lenguajes y dialectos. Las más corrientes son las siguientes:

- Un *glosario* es una lista de términos y sus definiciones. Es un acuerdo escrito sobre el significado preciso de términos clave. Su publicación puede adornarse con otras formas de comunicación, como esquemas, fotografías y vídeos.
- Los *ejemplos* pueden tomar diversas formas, como objetos físicos (v.g., muestras de tela, fichas de color, audiocasetes) o servicios (v.g., grabaciones que muestren «pruebas» de buen servicio, cortesía, solicitud, etc.). Sirven como especificaciones para las carac-

terísticas del producto. Utilizan los sentidos humanos más allá de las asociaciones de imágenes y palabras.

- Una *organización especial* para traducir las comunicaciones con los clientes externos puede ser necesaria a causa del volumen de la traducción. Un ejemplo corriente es el departamento de recepción de pedidos de los clientes. Algunos elementos de estos pedidos están en el lenguaje del cliente. Recepción de pedidos los traduce al lenguaje del proveedor, v.g., números de código del producto, acrónimos del proveedor, etc.
- La *normalización* se usa por muchas industrias para beneficio mutuo de clientes y proveedores. Esta normalización se extiende a lenguaje, productos, procesos, etc. Todas las organizaciones designan a sus productos con nombres cortos, como números de código, acrónimos, palabras, frases, etc. Esta nomenclatura normalizada facilita la comunicación con los clientes internos.
- La *medición* es el remedio más efectivo contra la vaguedad y los dialectos múltiples: «Dígalos con números». Este es el primero pero no el último de los puntos en los procesos de planificación en donde la medición resulta crítica. La planificación de la calidad requiere también medición de características del producto, características del proceso, capacidad de los procesos, objetos de control, etc.

Establecer unidades de medida y sensores. Una planificación de calidad sólida requiere comunicación precisa entre clientes y proveedores. Parte de la información esencial se transmite adecuadamente con las palabras. Sin embargo, una sociedad crecientemente compleja y especializada pide una precisión mayor para comunicar información relacionada con la calidad. La mayor precisión se consigue cuando la expresamos con números.

La cuantificación demanda un sistema de medida. Este sistema consiste en:

- Una *unidad de medida*, que es una cantidad definida de alguna característica de calidad, permite evaluar la característica en números, v.g., horas de tiempo para prestar un servicio, kilovatios de energía eléctrica o concentración de un medicamento.
- Un *sensor*, que es un método o instrumento de medida, realiza la evaluación y expresa los resultados en números en términos de la unidad de medida, v.g., un reloj para dar la hora, un termómetro para medir la temperatura o un aparato de rayos X para medir la densidad ósea.

Al medir las necesidades del cliente, se establece un criterio objetivo de si se ajustan o no a las necesidades. Además, sólo mediante la medida se pueden contestar preguntas como: ¿Está nuestra calidad mejorando o empeorando? ¿Somos competitivos con respecto a otros? ¿Cuál de nuestras operaciones suministra la mejor calidad? ¿Cómo podemos elevar todas las operaciones al nivel de la mejor?

Unidades de medida para características de producto. La primera tarea al medir es identificar la unidad de medida apropiada a cada necesidad del cliente. Para las características del producto no conocemos ninguna fórmula genética, sencilla y conveniente que sea fuente de muchas unidades de medida. El número y variedad de las características del producto es realmente enorme. En la práctica, cada característica del producto requiere su propia unidad de medida. Un buen punto de inicio es preguntar a los clientes cuáles son sus unidades de medida para evaluar la calidad del producto. Si las unidades de medida del proveedor son diferentes, se está preparando la situación para un cliente insatisfecho, y el equipo necesitará dar con una unidad de medida aceptable para ambas partes. Incluso si los clientes no han desarrollado una unidad de medida explícita, hay que preguntarles cómo sabrían si se habían cumplido sus necesidades. Su respuesta puede aportar una unidad de medida implícita.

Aplicación a los objetos. Las unidades de medida para las características de calidad de los objetos usan ampliamente unidades tecnológicas «fuertes». Algunas de ellas son bien

conocidas por el público: tiempo en minutos, temperatura en grados o corriente eléctrica en amperios. Otras muchas sólo son conocidas por los especialistas.

Existen también áreas «suaves» de calidad para objetos. Los tecnólogos alimentarios necesitan unidades de medida del sabor, blandura y otras propiedades de los alimentos. Los electrodomésticos pueden ser «bonitos» de apariencia. La envoltura debe ser «atractiva». El desarrollo de unidades de medida para tales características implica mucho esfuerzo e ingenio.

Aplicación a los servicios. La evaluación de la calidad de los servicios incluye algunas unidades de medida tecnológicas. Un ejemplo muy extendido es la rapidez, que se mide en días, horas, etc. Los contaminantes medioambientales (v.g., ruido, radiación, etc.) generados por compañías de servicios son igualmente mensurables usando unidades de medida tecnológicas.

La calidad del servicio implica también características como la cortesía del personal de servicio, la decoración del entorno y la legibilidad de los informes. Como algunas de estas características son juzgadas por seres humanos, las unidades de medida (y sus sensores asociados) deben mostrar que se corresponden con un panel de opiniones de los clientes.

La unidad de medida ideal. Se resumen a continuación los criterios para una unidad de medida ideal. Debe:

- Ser comprensible.
- Suministrar una base común de acuerdo para la toma de decisiones.
- Conducir a una interpretación uniforme.
- Ser económica en su aplicación.
- Ser compatible con los diseños de sensores existentes, si se han de cumplir también otros criterios.

Medición de abstracciones. Algunas características de calidad parecen separarse del mundo de las cosas físicas. La calidad del servicio incluye a menudo la cortesía como una característica significativa de calidad. Incluso en el caso de objetos físicos, tenemos características de calidad, como la belleza, gusto, aroma, tacto o sonido. El reto está en establecer unidades de medida para tales abstracciones.

El enfoque para tratar de las abstracciones consiste en descomponerlas en piezas identificables. Una vez más, el cliente debe ser la mejor fuente para empezar a identificar estos componentes. Por ejemplo, la apariencia de la habitación de un hotel es ciertamente una característica de calidad, pero también parece una abstracción. No obstante, podemos dividir la característica en partes observables e identificar las específicas que constituyen colectivamente la «apariencia», v.g., ausencia de manchas o partes gastadas en la alfombra, lavabo limpio, ropa blanca no descolorida y doblada de formas especificadas, ventanas sin huellas, sobrecamas sin arrugas y colgando a distancias específicas del suelo, etc. Una vez que se han establecido unidades de medida para cada pieza o componente, deben resumirse en un índice, v.g., número de alfombras manchadas o dañadas en el total de las habitaciones del hotel, número de habitaciones a las que les falta ropa blanca en el total del número de habitaciones, o número de quejas de clientes.

Establecer el sensor. Para expresarlo en números necesitamos no sólo una unidad de medida, sino también evaluar la calidad en términos de esta unidad de medida. El sensor es un elemento clave al hacer la evaluación.

Un «sensor» es un aparato detector especializado o una herramienta de medición. Está concebido para reconocer la presencia e intensidad de ciertos fenómenos y convertir estas

percepciones en información. A su vez, la información resultante se convierte en un dato para la toma de decisiones, porque permite evaluar el rendimiento actual.

Los instrumentos tecnológicos son sensores obvios. Como lo son los seres humanos. Las tendencias en algunas series de datos se usan como sensores. Los gráficos de control de Shewhart son sensores.

Precisión y exactitud de los sensores. La «precisión» de un sensor es una medida de la habilidad del sensor para reproducir sus resultados una y otra vez en pruebas repetidas. Para la mayoría de los sensores tecnológicos, esta capacidad es alta y además fácilmente cuantificable.

En el otro extremo del espectro están los casos en los que usamos seres humanos como sensores: inspectores, auditores, supervisores y evaluadores. Los sensores humanos son notablemente menos precisos que los sensores tecnológicos. Dado que las cosas son así, los planificadores deberán tener en cuenta las limitaciones inherentes al ser humano antes de tomar decisiones basadas en los datos resultantes.

La «exactitud» de un sensor es el grado en que el sensor dice la verdad: el grado en que su evaluación de un fenómeno concuerda con el valor «verdadero» que se toma como norma establecida. La diferencia entre la evaluación observada y el valor verdadero es el «error», que puede ser positivo o negativo.

Para los sensores tecnológicos, resulta normalmente fácil ajustar la precisión mediante el recalibrado. Un ejemplo sencillo es un reloj. El propietario puede oír las señales horarias de la radio. En contraste, la precisión de un sensor no es fácil de ajustar. El límite superior de precisión es normalmente inherente al diseño básico del sensor. Mejorar la precisión más allá de su límite superior requiere volverlo a diseñar. El sensor puede estar operando a un nivel de precisión inferior al de su capacidad debido a mal uso, mantenimiento inadecuado, etc. Por esta razón, al elegir el sensor adecuado a cada necesidad, los planificadores deberán considerar la elaboración de programas de mantenimiento apropiados, además de listas de chequeo con las acciones que hay que realizar durante el chequeo.

Traducción y medición de las necesidades del cliente de Mustang. La necesidad del cliente de rendimiento indica cómo una necesidad de alto nivel necesita descomponerse en una miríada de necesidades detalladas. El rendimiento incluye todas las necesidades precisas y detalladas siguientes:

- Impresión del rendimiento en el personal de apoyo.
- Tiempo transcurrido de 0 a 60 millas/hora con el acelerador a fondo (WOT).
- Tiempo para recorrer $\frac{1}{4}$ de milla con el acelerador a fondo (WOT).
- Tiempo de paso de 40 a 60 millas/hora con el acelerador a fondo (WOT).
- Tiempo de paso de 30 a 70 millas/hora con el acelerador a fondo (WOT).
- Respuesta del acelerador.
- Impresión del asiento: sólo puede ser medida por un panel de clientes.

El rendimiento de los competidores se usó como benchmark mínimo, pero Ford sabía que sus competidores también estaban trabajando en nuevos modelos y tuvo que expandir el análisis de las necesidades hasta incluir posibilidades de «qué si...», que se probaron con paneles de consumidores y expertos en automoción.

Matriz de diseño del producto. Toda la información sobre la traducción y medición de las necesidades del cliente debe ser registrada y organizada. La experiencia recomienda colocar estos datos de forma que estén a mano durante el diseño del producto. El ejemplo de la Figura 3.9 muestra unas pocas necesidades dispuestas para usarse en el diseño del producto. Las necesidades, su traducción y su medición están colocadas en la izquierda de la matriz. El resto de la matriz se discutirá en el siguiente apartado.

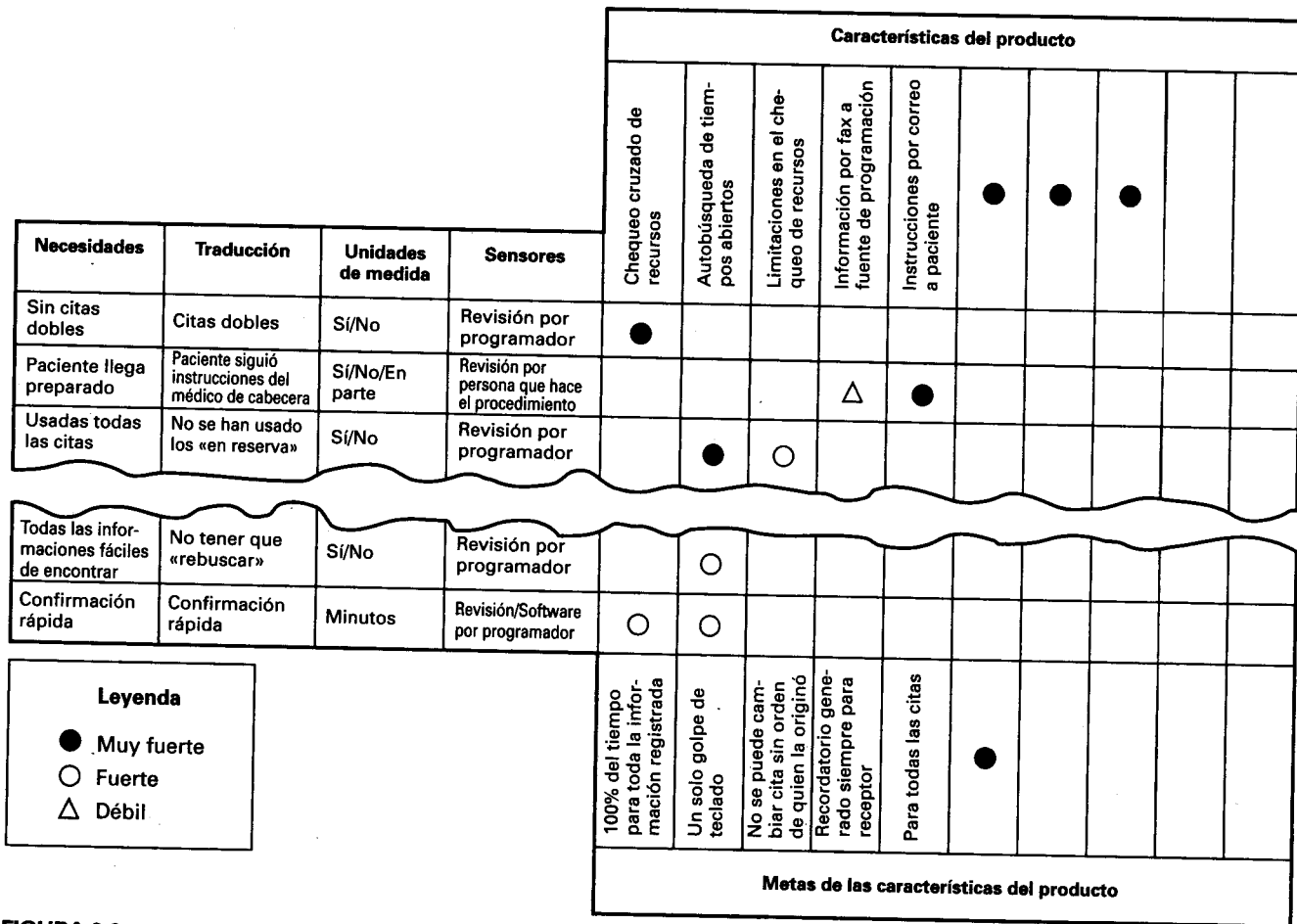


FIGURA 3.9 Gráfico de diseño del producto para la función de cita de pacientes externos (*Juran Institute, Inc. Copyright 1994. Uso autorizado*).

PASO 4: DESARROLLAR EL PRODUCTO

Una vez que se ha comprendido totalmente a los clientes y sus necesidades, estamos en disposición de diseñar el producto que satisfará mejor esas necesidades. El desarrollo del producto no es una función nueva para la empresa. La mayoría de las empresas tienen algunos procesos para diseñar y llevar nuevos productos al mercado. En este paso del proceso de planificación de la calidad, nos centraremos en el papel de la calidad en el desarrollo del producto y en cómo este papel se combina con los aspectos técnicos del desarrollo y del diseño apropiados para un sector concreto. Dentro de cada desarrollo del producto, el diseño del producto es un proceso creativo basado mayormente en habilidades tecnológicas o funcionales.

Los diseñadores de productos han sido tradicionalmente ingenieros, analistas de sistemas, directivos de operaciones y muchos otros profesionales. En el contexto de la calidad, los diseñadores pueden incluir a cualquiera que pueda contribuir al proceso del diseño con su experiencia, posición y pericia. El diseño del producto produce diseños detallados, dibujos, modelos, procedimientos, especificaciones, etc.

Los objetivos globales de la calidad en este paso son dos:

1. Determinar qué características y metas del producto proporcionarán al cliente el beneficio óptimo.
2. Identificar qué se necesita para que los diseños se entreguen sin deficiencias.

En el caso del diseño de servicios, el alcance de esta actividad es a veces sorprendente. Por ejemplo, al prestar atención sanitaria, ¿dónde acaba el *producto* de diagnóstico y tratamiento y dónde empiezan los *procesos* de pruebas de laboratorio, exámenes de gráficos, etc.? Una forma que ayuda a distinguirlos es que el *producto* es la «cara hacia el consumidor», lo que el cliente ve y experimenta. El paciente ve y experimenta la interacción con el médico, el tiempo de espera, la claridad en la información, etc. La eficacia y efectividad de trasladar las muestras de sangre al laboratorio y dentro de él tiene un efecto en las características de este producto, pero son realmente características del proceso que suministra el producto último al cliente.

Quienes diseñan productos físicos pueden también beneficiarse de pensar en el alcance del diseño del producto. Recordando que las necesidades del cliente son los beneficios que el cliente desea del producto, el diseño de una pieza de electrónica de consumo incluye no sólo el contenido de la caja, sino también las instrucciones para su instalación y uso y la «línea de ayuda» del mantenimiento.

Existen seis actividades principales en este paso:

- Agrupar todas las necesidades relacionadas del cliente.
- Determinar los métodos para identificar las características del producto.
- Seleccionar las características y metas de alto nivel del producto.
- Desarrollar las características y metas detalladas del producto.
- Optimizar las características y metas del producto.
- Fijar y publicar el diseño final del producto.

Agrupar las necesidades relacionadas del cliente. La mayor parte de los proyectos de planificación de la calidad se enfrentarán a gran número de necesidades del cliente. Con base en los datos desarrollados en los pasos precedentes, el equipo puede fijar prioridades y agrupar las necesidades que se relacionan con una función similar. Esta actividad no requiere mucho tiempo, pero puede ahorrar mucho tiempo más tarde. El fijar prioridades asegura que los recursos escasos del desarrollo del producto se gastan con más eficacia en los puntos que son más importantes para el cliente. El agrupamiento de las necesidades relacionadas permite al equipo de planificación «dividir y vencer», con subequipos trabajando en

diferentes partes del diseño. Estos enfoques de diseño de subsistema o componentes han sido normales, por supuesto, desde hace años. Lo que puede ser diferente aquí es que se centra inicialmente en las *componentes de las necesidades del cliente*, no en los *componentes del producto*. El diseño del componente para el producto llegará durante las actividades posteriores de esta fase.

Determinar los métodos para identificar las características del producto. Existen varios enfoques complementarios para identificar el diseño del producto que mejor se ajuste a las necesidades del cliente. La mayor parte de los proyectos de diseño no los usan todos. Antes de empezar a diseñar, sin embargo, el equipo debería desarrollar un plan sistemático de los métodos que utilizará en su propio diseño. A continuación, algunas de las opciones:

Benchmarking. Este enfoque identifica el mejor en su clase y los métodos que lo respaldan para hacer de él el mejor (véase el Capítulo 12 para los detalles).

Investigación básica. Un aspecto de la investigación puede ser una nueva innovación para el producto, que no existe actualmente en el mercado o entre los competidores. Otro aspecto de la investigación básica es que busca explorar la viabilidad del producto y de sus características. Aunque estos dos aspectos son importantes, procure que la fascinación por las posibilidades tecnológicas del producto no prime sobre la preocupación principal de beneficiar al cliente.

Experimentos de mercado. La introducción y prueba en el mercado de ideas para las características del producto permite analizar y evaluar conceptos. Los grupos focales constituyen una técnica que se puede usar para medir las reacciones del cliente y determinar si las características del producto se ajustan realmente a las necesidades del cliente. Algunas organizaciones también prueban sus ideas, de un modo informal, con clientes en las ferias comerciales y en las reuniones de asociaciones. Otras realizan un marketing limitado de prueba con un prototipo del producto.

Creatividad. El desarrollo de características del producto le permite a uno soñar con toda una serie de posibilidades sin verse obstaculizado por restricciones o nociones preconcebidas. La planificación de la calidad constituye un enfoque probado, estructurado y basado en datos, para ajustarse a las necesidades del cliente. Pero esto no significa que sea rígido y no creativo. En este punto del proceso, se debe animar a los participantes en la planificación a que sean creativos y se les deben dar las herramientas necesarias para ello, de modo que desarrollen alternativas para el diseño. Después de que hayan seleccionado cierto número de alternativas prometedoras, usarán análisis y datos firmes para diseñar el producto final.

Los equipos de planificación pueden beneficiarse de cómo contemplan al mundo los individuos: desde su propia perspectiva. Todo empleado ve otros medios potenciales de hacer las cosas. El equipo puede animar a sus miembros a que sugieran nuevas ideas y a que se arriesguen. Los miembros del equipo deben evitar quedarse «bloqueados» o consumir demasiado tiempo debatiendo una idea o tema particulares. Pueden dejar las ideas de lado y volver a ellas más tarde con un punto de vista renovado. Pueden aplicar métodos nuevos de pensar acerca de las necesidades o problemas de los clientes, tales como los siguientes:

- *Cambiar las palabras o frases clave.* Por ejemplo, llamar «oportunidad» a una «necesidad» o a un «problema». En lugar de decir «entrega a tiempo», decir «entrega exactamente cuando se necesita».
- *Asociaciones aleatorias.* Por ejemplo, tome una palabra corriente como «manzana» o «circo» y describa su negocio, producto o problema con dicha palabra. Por ejemplo, «Nuestro producto es como un circo porque...».

- *Idea central.* Desvíe su pensamiento de una idea central hacia otra diferente. Por ejemplo, desvíe el centro desde el producto hacia el cliente diciendo «¿Qué daño puede sufrir un niño y cómo podemos evitarlo?», en vez de «¿Cómo puedo hacer más seguro el juguete?».
- *Ponerse en la piel de otra persona.* Examine la cuestión desde el punto de vista de la otra persona, su competidor, su cliente, y elabore su caso antes de elaborar el propio.
- *Soñar.* Imagine que tiene una varita mágica con la que puede remover todos los obstáculos para conseguir sus objetivos. ¿Qué parecería? ¿Qué haría primero? ¿Cómo cambiaría esto su enfoque?
- *El principio del espagueti.* Cuando usted tiene dificultades al considerar un concepto nuevo o al intentar responder a una necesidad particular, permita a su equipo que se sienta lo bastante libre para lanzar ideas nuevas, como si lanzase un espagueti contra la pared para ver cómo se queda pegado. Con frecuencia, las ideas «salvajes» pueden llevar a soluciones viables.

Las decisiones de diseño iniciales se mantienen tan sencillas como sea posible en este punto. Por ejemplo, la idea de colocar el panel central para la radio en el volante se consideraría una característica del producto de alto nivel. Su localización exacta, qué controles y cómo funcionarán se puede analizar en detalle más adelante. Puede convertirse en sujeto de características del producto más detalladas a medida que el proyecto de planificación avanza.

Normas, regulaciones y políticas. Es también el momento de asegurarse de que se han identificado y cumplimentado todas las normas, regulaciones y políticas relevantes. Algunos de estos requisitos son sólo pautas de cómo debe funcionar un producto o una característica de producto en particular; otros imponen la forma de funcionamiento. Unas pueden provenir de dentro de la organización y otras de gobiernos federales, estatales o locales, de agencias reguladoras o de asociaciones sectoriales. Se deben analizar todas las características del producto y las metas de las características del producto frente a estos requisitos, antes de hacer la selección final de las características del producto que se incluirán en el diseño.

Es importante notar que si existe conflicto al evaluar las características del producto frente a cualquier norma, regulación o política, no siempre es esto motivo para darse por vencido. Algunas veces se puede trabajar para recibir la aceptación de un cambio que cumplirá mejor con las necesidades del cliente. Esto ocurre sobre todo cuando se trata de políticas internas. Pero el defensor del cambio debe estar preparado para respaldar sus argumentos con los datos apropiados.

Criterios para el diseño. Como parte de la preparación de un diseño de alto nivel, el equipo de diseño debe acordar los criterios explícitos que se usarán para evaluar los diseños y características del diseño alternativos. Todos los diseños deben cumplir los criterios generales siguientes:

- Ajustarse a las necesidades de los clientes.
- Ajustarse a las necesidades de proveedores y productores.
- Igualar (o superar) a la competencia.
- Optimizar los costes combinados de clientes y proveedores.

Además de los cuatro criterios anteriores, los miembros del equipo deberán acordar explícitamente los criterios que usarán al hacer la selección. (Si las opciones son relativamente complejas, el equipo deberá considerar el uso de la técnica de una matriz de selección). Una fuente para estos criterios será la declaración de misión y las metas. Algunos otros tipos de criterios que el equipo puede desarrollar son:

- El impacto de cada característica sobre las necesidades.
- La importancia relativa de las necesidades que se quieren satisfacer.
- La importancia relativa de los clientes cuyas necesidades se verán afectadas.

- La viabilidad y riesgos de la característica propuesta.
- El impacto sobre el coste del producto.
- Las relaciones con las características de la competencia descubiertas en el benchmarking.
- Los requisitos de normas, regulaciones, políticas, obligaciones, etc.

Como parte de la decisión de cómo proceder con el diseño, los equipos deben considerar también ciertos puntos importantes relativos al tipo de característica del producto que sería la mejor respuesta a las necesidades de los clientes. Al seleccionar características del producto necesitan tener en cuenta si:

- Desarrolla una funcionalidad enteramente nueva.
- Sustituye a características seleccionadas ya existentes por otras nuevas.
- Mejora o modifica las características existentes.
- Elimina lo innecesario.

Regulaciones y normas para el Mustang de Ford. Las Normas Federales de Seguridad para Vehículos de Motor (FMVSS) tienen, por supuesto, un interés primordial al diseñar cualquier automóvil. Ford ha establecido sus propias normas de seguridad, que son más amplias que las obligaciones federales e incluyen un margen significativo de seguridad adicional en todas las normas cuantitativas.

Seleccionar metas y características del producto de alto nivel. Esta fase de la planificación de calidad estimulará al equipo a considerar una batería completa de características potenciales del producto y a ver cómo cada una respondería a las necesidades del cliente. Esta actividad deberá ser realizada sin estar limitada por prejuicios o nociones anteriores de lo que funcionó en el pasado y lo que no. Una respuesta que falló anteriormente en ajustarse a una necesidad de los clientes o en resolver un problema de los clientes puede estar disponible para ser tenida en cuenta de nuevo, a causa de cambios en la tecnología o en el mercado.

El equipo empieza por ejecutar su plan para identificar las posibles características del producto. Deberá aplicar entonces sus criterios explícitos de selección para identificar las características del producto más prometedoras.

El gráfico de diseño del producto de la Figura 3.9 es una buena orientación para este esfuerzo. Use el lado derecho del gráfico para determinar y documentar lo siguiente:

- Qué características del producto contribuyen a cumplir con las necesidades de los clientes.
- Que cada necesidad prioritaria de los clientes sea satisfecha al menos por una característica del producto.
- Que el impacto total de las características del producto asociadas con una necesidad de los clientes es probable que resulte *suficiente* para satisfacer esa necesidad.
- Que cada característica del producto contribuye a satisfacer por lo menos una necesidad importante de los clientes.
- Que cada característica del producto es *necesaria* para satisfacer por lo menos una necesidad importante de los clientes (v.g., quitar esa característica dejaría sin satisfacer una necesidad significativa).

Ahora el equipo debe fijar las metas para cada característica. En términos de calidad, una meta es un objetivo de calidad enfocado (por ejemplo, dirigido a valores y límites de especificación). Como se dijo anteriormente, difiere de las normas de calidad en que la norma es un modelo impuesto para ser seguido y que proviene normalmente de fuente externa. Mientras que las normas sirven como «requisitos» que normalmente dictan una uniformidad o cómo debe funcionar el producto, las metas de las características del producto son con frecuencia voluntarias o negociadas. Por lo tanto, el proceso de planificar la calidad debe proporcionar los medios para ajustarse tanto a las normas de calidad como a las metas de calidad.

Criterios para fijar las metas de las características del producto. Lo mismo que ocurre con todas las metas, las metas de las características del producto deben ajustarse a ciertos criterios. Aunque los criterios para establecer las metas de las características del producto difieren ligeramente de los criterios para las metas del proyecto verificado en el paso 1, existen muchas similitudes. Las metas de las características del producto deberán abarcar todos los casos importantes y ser:

- Medibles.
- Óptimas.
- Legítimas.
- Comprensibles.
- Aplicables.
- Alcanzables.

Medición de las metas de las características del producto. Establecer la medición de una meta de la característica del producto requiere las siguientes tareas:

- Determinar la unidad de medida: metros, segundos, días, porcentajes, etc.
- Determinar cómo medir la meta (v.g., determinar qué es el sensor).
- Fijar el valor para la meta.

El trabajo realizado en la medición de las necesidades del cliente deberá ser aplicado ahora. Las dos series de medidas se pueden relacionar de uno de los siguientes modos:

- La medición de la necesidad y de la meta de la característica del producto puede usar las mismas unidades y sensores. Por ejemplo, si la necesidad del cliente se relaciona con plazos concretos medidos en horas, una o más características del producto se medirá también normalmente en horas, con sus efectos combinados satisfaciendo las necesidades del cliente.
- La medición de la característica del producto puede derivarse de una manera técnica de la medición de la necesidad. Por ejemplo, la necesidad de un cliente de transportar cargas de tamaños y de pesos específicos puede traducirse en medidas de ingeniería específicas del sistema de transportes.
- La medición de la característica del producto puede derivarse de relaciones de comportamiento del cliente con la medida de la característica del producto. Por ejemplo, los fabricantes de automóviles han desarrollado los parámetros específicos de las dimensiones y estructura del asiento de un automóvil que se traducen en la calificación «cómodo» del cliente.

Dado que podemos medir tanto la necesidad del cliente como las metas de las características del producto relacionadas, el equipo de planificación de la calidad puede ahora asegurar que el diseño del producto lleva mucho camino ganado en la satisfacción de las necesidades del cliente, incluso antes de construir cualquier prototipo o realizar cualquier prueba de mercado.

Para proyectos largos y complejos, el trabajo de desarrollar las características del producto se reparte con frecuencia entre cierto número de individuos y grupos de trabajo diferentes. Después de que todos estos grupos hayan acabado su trabajo, el equipo de planificación de la calidad global necesitará integrar los resultados. La integración incluye:

- Combinar las características del producto cuando se han identificado las mismas características para más de un conjunto.
- Identificar y resolver las metas y características que suponen conflicto o competición entre los diferentes conjuntos.
- Validar que el diseño combinado se ajusta a los criterios establecidos por el equipo.

Desarrollar las metas y características detalladas del producto. Para productos largos y complejos, será normalmente necesario en un diseño detallado dividir el producto en cierto número de conjuntos e incluso subconjuntos. Cada conjunto tendrá generalmente su propio equipo de diseño que completará el diseño detallado descrito más adelante. Para conseguir que el diseño total permanezca integrado, coherente y eficaz para ajustarse a las necesidades del cliente, el proyecto descentralizado requiere:

- Un equipo central o directivo que proporcione la dirección e integración global.
- Gráficos explícitos que cuantifiquen las metas de cada conjunto.
- Revisiones regulares del diseño integrado para todos los conjuntos.
- Integración explícita de los diseños antes de la terminación de la fase de diseño del producto.

Una vez desarrolladas las metas y características detalladas iniciales del producto, los diseñadores técnicos prepararán un diseño preliminar, con especificaciones detalladas. Es un paso necesario antes de que un equipo pueda optimizar modelos de características del producto usando cierto número de herramientas de calidad y fije definitivamente y publique las metas y características finales del producto.

No es raro que los equipos de planificación de la calidad seleccionen características del producto a tan alto nivel que no sean lo bastante específicas para responder a las necesidades precisas del cliente. Del mismo modo que en la identificación de las necesidades principales del cliente, las características del producto necesitan descomponerse en términos que sean claramente definidos y que puedan ser medidos.

Optimizar las metas y características del producto. Una vez completado el diseño, debe ser optimizado. Es decir, se ha de ajustar el diseño para que cumpla tanto las necesidades del cliente como las del proveedor, al mismo tiempo que minimizase sus costes combinados e iguale o supere a la competencia.

Encontrar el punto óptimo puede ser un asunto complicado, a menos que se enfoque de una manera organizada y siguiendo disciplinas de calidad. Por ejemplo, existen muchos diseños en los que convergen numerosas variables para producir el resultado final. Algunos de estos diseños son de carácter empresarial, como el diseño de un sistema de información que implica el uso óptimo de servicios, personal, energía, capital, etc. Otros diseños son de carácter tecnológico, implicando el optimizar el rendimiento de hardware. De cualquier modo, encontrar el punto óptimo resulta más fácil con el uso de ciertas disciplinas de calidad.

Encontrar el punto óptimo implica equilibrar las necesidades, sean de un conjunto de empresas o internas de la empresa. Lo ideal sería que la búsqueda del punto óptimo se hiciera a través de la participación tanto de proveedores como de clientes. Existen varias técnicas que ayudan a conseguir este punto óptimo.

Revisión del diseño. Bajo este concepto, se da la oportunidad a los que se verán afectados por el producto de que revisen el diseño durante varias etapas formativas. Esto les permite usar su experiencia y conocimientos prácticos para hacer contribuciones tales como:

- Prevención de problemas futuros.
- Datos que ayudan a encontrar el punto óptimo.
- Objeciones a las teorías e hipótesis previas.

Las revisiones del diseño pueden ocurrir en diferentes etapas del desarrollo del nuevo producto. Pueden utilizarse para revisar conclusiones sobre necesidades del cliente y las especificaciones del producto consecuentes (datos de características del producto). Las revisiones del diseño también pueden tener lugar en el momento de la selección del diseño óptimo del producto. Características típicas de las revisiones del diseño incluyen las siguientes:

- La participación es obligatoria.
- Las revisiones son realizadas por especialistas, externos al equipo de planificación.
- Las decisiones últimas de los cambios se mantienen en manos del equipo de planificación.
- Las revisiones son formales, programadas y preparadas, con agenda.
- Las revisiones se basarán en criterios claros y parámetros predeterminados.
- Las revisiones se realizarán en distintas etapas del proyecto.

Entre las reglas básicas para una buena revisión del diseño están:

- Planificación adecuada y por adelantado de la agenda y documentos de la revisión.
- Estructura de la reunión y papeles a desempeñar claramente definidos.
- Reconocimiento por adelantado de los conflictos interdepartamentales.
- Énfasis en la entrada de datos constructivos, no críticos.
- Evitar el diseño competitivo durante la revisión.
- Regulación realista de la duración y del calendario de la revisión.
- Provisión de suficientes habilidades y recursos para la revisión.
- Foco de discusión en ideas de diseño no aprobadas o no probadas.
- Participación dirigida por la dirección.

Planificación conjunta. Los equipos de planificación deberán incluir a todo el que tenga un interés en el resultado del diseño del producto, junto con las personas especializadas en el diseño del producto. Bajo este concepto, el equipo, y no sólo los diseñadores del producto, asumen la responsabilidad del diseño final.

Negociación estructurada. Clientes y proveedores están a remolque de poderosas fuerzas locales en un grado que puede llevar fácilmente a un resultado distinto del óptimo. Para asegurar que estas sesiones negociadoras avancen de la forma más productiva posible, se recomienda que se establezcan antes de las reuniones unas normas básicas. He aquí algunos ejemplos:

- El equipo deberá guiarse hacia la consecución de una meta común por un espíritu de cooperación, no de competición.
- Las diferencias de opinión pueden ser saludables y pueden llevar a una solución más eficaz y efectiva.
- Todos deberán tener una oportunidad de contribuir y deberán tenerse en cuenta todas las ideas.
- Se deberán escuchar las opiniones de todos y se respetarán sin interrumpir.
- Se evitará el personalizar; se ponderarán los pros y los contras de cada idea, mirando sus ventajas antes que sus desventajas.
- Se cuestionarán las opiniones; se buscarán los hechos.
- Siempre que la discusión se estanque, se retrocederá y se definirán las áreas de acuerdo antes de discutir las áreas de desacuerdo.
- Si no se alcanza el consenso en un punto particular, deberá postergarse y traerlo más adelante a discusión.

Crear opciones nuevas. Con frecuencia, los equipos enfocan el diseño de un producto a partir de cómo se hicieron las cosas en el pasado. La optimización permite al equipo una mirada fresca al producto y crear opciones nuevas. Algunas de las herramientas de la calidad más corrientes y útiles para optimizar el diseño incluyen:

- *El análisis competitivo* proporciona una comparación característica por característica de los productos de los competidores (véase el punto siguiente como ejemplo).

- *El análisis de su capacidad de venta* evalúa qué características del producto estimulan el deseo del cliente por comprarlo y el precio que está dispuesto a pagar (véase el punto siguiente como ejemplo).
- *El análisis de valor* calcula no sólo el coste incrementado de características específicas del producto, sino también el coste de satisfacer las necesidades específicas del cliente y compara los costes de los diseños alternativos (véase el punto siguiente como ejemplo).
- *El análisis crítico* identifica las «pocas características vitales» que son vulnerables en el diseño, para que así reciban prioridad de atención y recursos.
- *El análisis de modo de fallos y sus efectos (AMFE)* calcula el impacto combinado de la probabilidad de un fallo particular, sus efectos y la probabilidad de que se pueda detectar y corregir el fallo, estableciendo, por lo tanto, una lista de prioridades para diseñar acciones de prevención de fallos (véase Capítulo 19 bajo Análisis de fiabilidad).
- *El análisis del árbol de fallos* ayuda a diseñar acciones preventivas mediante el trazado de todas las posibles combinaciones de causas que pueden provocar un fallo particular (véase Capítulo 19 bajo Análisis de fiabilidad; también Capítulo 48).

El diseño para la fabricación y el montaje evalúa la complejidad y los problemas potenciales durante la fabricación para conseguir un montaje lo más sencillo y libre de errores posible. El diseño para la mantenibilidad evalúa diseños particulares para un mantenimiento fácil y de bajo coste del producto durante toda su vida útil.

Análisis competitivo. La Figura 3.10 es un ejemplo de cómo se puede exponer un análisis competitivo. Los datos para un análisis competitivo pueden requerir una combinación de enfoques distintos, tales como el análisis de laboratorio de los productos de los competidores, prueba de campo de estos productos o entrevistas en profundidad e inspecciones *in situ* en las que clientes voluntarios están usando el producto del competidor.

Adviértase que al revisar este análisis, el equipo de planificación puede identificar aquellas áreas en las que el diseño es vulnerable a la competencia, lo mismo que aquellas en las que el equipo ha desarrollado una ventaja. Con base en este análisis, el equipo necesitará entonces decidir opciones de optimización sobre si mejora el producto o no. El equipo puede necesitar aplicar un análisis de valor para decidir entre alguna de estas opciones.

Análisis de la capacidad de venta. Un ejemplo del análisis de la capacidad de venta se muestra en la Figura 3.11. Este análisis es similar al análisis competitivo, excepto que el punto de referencia es la respuesta de los clientes al diseño propuesto, en vez de una comparación con las características del diseño de los competidores. Adviértase, sin embargo, que se pueden combinar elementos de los análisis competitivo y de capacidad de venta con el análisis de la capacidad de venta, incorporar la evaluación del cliente de ambos diseños, el nuevo propuesto y los existentes de la competencia.

Productos complejos tales como los automóviles, con múltiples características y configuraciones opcionales, ofrecen una oportunidad única para evaluar la capacidad de venta. La observación de los porcentajes de instalación de opciones, tanto en la línea del coche existente como en los coches de los competidores, proporciona información sobre el nivel de demanda de la característica en el mercado y también sobre el precio adicional que algunos segmentos del mercado pagarán por la característica, aunque los otros segmentos del mercado le den poco o ningún valor.

Análisis de valor. El análisis de valor ha sido muy corriente en el diseño arquitectónico y el desarrollo de los productos realizados con el enfoque en el cliente, pero también se puede aplicar con éxito a otros entornos, como se ilustra en la Figura 3.12. Comparando los costes para satisfacer las diferentes necesidades del cliente, el equipo de diseño puede tomar un cierto número de decisiones significativas de optimización. Si el coste de satisfacer necesidades de

Metas y características del producto	Chequear si la característica del producto está presente			Rendimiento de la característica vs. meta (*)			Identificar si hay riesgo u oportunidad significativos
	Producto A	Producto B	Nuestro	Producto A	Producto B	Nuestro	
Recuperar mensajes de todos los teléfonos de un toque fácilmente	Sí	Sí	Sí	4	5	4	—
Cambiar mensaje de cualquier localización remota	Sí	No	Sí	3	—	5	O
Dos líneas incorporadas	No	No	Sí	—	—	4	O
Añadir debajo las características del producto de los competidores no incluidas en el nuestro	Chequear si la característica del producto está presente			Rendimiento de la característica vs. meta (*)			Identificar si hay riesgo u oportunidad significativos
	Producto A	Producto B	Nuestro	Producto A	Producto B	Nuestro	
No se usa casete para registrar mensajes	Sí	Sí		4	—		R
Teléfono y contestador en un solo aparato	Sí	Sí		3	4		R

FIGURA 3.10 Análisis competitivo (Juran Institute, Inc. Copyright 1994. Uso autorizado).

Nombre del producto Servicio de reparación de coches: puesta a punto	¿Cómo clasifican los clientes el producto? Malo Regular Satisfactorio Bueno Excelente	Base para la clasificación Uso anterior vs. Opinión	¿Cómo ven los clientes las diferencias entre nuestros productos y los de la competencia?	¿Comprarian los clientes si el precio no fuera importante? Sí No	¿Compraría el cliente si el precio fuera importante?		De los productos listados, dé prioridad al que sus clientes comprarían y la base para ello Precio Características	Identificar si hay riesgo u oportunidad significativos
					Precio	Sí No		
Nuestro	E	U		S	175 \$	S	2-C	
Competidor A	B	O	+	N	145 \$	S	3-P	O
Competidor B	E	U	N	S	175 \$	S	1-C	R

Nombre del producto Recogida y entrega del coche a reparar Meta de la característica del producto: servicio el mismo día	¿Cómo clasifican los clientes el producto? Malo Regular Satisfactorio Bueno Excelente	Base para la clasificación Uso anterior vs. Opinión	¿Cómo ven los clientes las diferencias entre nuestras características frente a las de la competencia? Mejor (+) Peor (-) Igual	¿La característica añadida hace al producto: Más vendible Menos vendible Sin diferencia?	Identificar si hay riesgo u oportunidad significativos
Nuestro: Lo ofrece	B	U		O	
Competidor A: No lo ofrece	S	O	+	-	O
Competidor B: Lo ofrece. También proporciona coche prestado al cliente	E	U	-	+	R

FIGURA 3.11 Análisis de capacidad de venta para el servicio de mantenimiento del automóvil (Juran Institute, Inc. Copyright 1994. Uso autorizado).

Producto: Recepción de clínica prenatal							
Necesidades del cliente (listadas en orden de prioridad)	Metas y características del producto						Costo de satisfacer las necesidades
	Visitas sin cita tratadas por la enfermera, 5 días a la semana	Obstetra certificado por la dirección, 2 días a la semana	Asistente social, 5 días a la semana	Consejero nutricional, 5 días a la semana	Administrativo en el local recoge la tarjeta de Medicaid de todos los pacientes aceptables	Laboratorio en el local: la mayoría de resultados en menos de una hora	
Comodidad de uso	60.000	30.000	10.000	10.000	20.000	40.000	170.000
Confianza en el personal		70.000	10.000	15.000			95.000
Coste razonable						25.000	25.000
Sensibilidad			5.000	5.000			20.000
Información de opciones			15.000	15.000			20.000
Coste por característica	60.000	100.000	40.000	45.000	20.000	65.000	330.000

FIGURA 3.12 Análisis de valor para clínica prenatal (Juran Institute, Inc. Copyright 1994. Uso autorizado).

prioridad baja es alto, el equipo debe explorar modos alternativos de satisfacer estas necesidades e incluso considerar el no tomarlas en cuenta si el producto es altamente sensible al precio. Si las necesidades muy importantes no han consumido gran parte de los gastos, el equipo precisará cerciorarse de que ha satisfecho esas necesidades total y completamente. Aunque un gasto bajo para satisfacer una necesidad de prioridad alta no es necesariamente inadecuado, presenta a los diseñadores con el reto de cerciorarse de que las necesidades de prioridad baja no se han satisfecho usando recursos que estarían mejor empleados en las necesidades de prioridad más alta. No es raro que los productos estén sobrecargados de «perifollos», a expensas de la funcionalidad y rendimientos fundamentales.

Características del rendimiento de Mustang. Uno de los desafíos críticos de la ingeniería del rendimiento de Mustang consistió en desarrollar la relación ideal potencia-peso que satisficiera las necesidades de rendimiento de los clientes. No obstante, como en el caso de la mayoría de las relaciones de esta clase, se puede mejorar la relación o bien reduciendo el peso o bien aumentando la potencia. Además, el consumo de combustible también se ve afectado por el peso.

Los compromisos de diseño entre peso, potencia y consumo de combustible implicaron no sólo cálculos de ingeniería detallados, sino también evaluaciones cuidadosas de las reacciones del cliente y de los puntos de vista en conflicto de las diferentes funciones dentro de la empresa. Alcanzar un diseño final que satisficiera las necesidades del cliente y cumpliera los principios firmes de la ingeniería requirió un liderazgo fuerte del proyecto, además de la atención a los datos.

Fijar y documentar el diseño final del producto. Una vez que el diseño ha sido optimizado y probado, es el momento de seleccionar las metas y características del producto que se incluirán en el diseño final. Es también la fase en que se transmiten oficialmente a otras funciones los resultados del desarrollo del producto a través de varias formas de documentación. Se incluyen las especificaciones de las metas y de las características del producto, así como los gráficos y otros documentos de soporte. Todo esto se complementa con instrucciones, tanto orales como escritas. Para completar esta actividad, el equipo debe determinar el proceso de autorización y publicación de las metas y características del producto. Junto a las metas y características, el equipo deberá incluir cualquier procedimiento, especificación, diagrama de flujo u otro gráfico que estén relacionados con el diseño final del producto. El equipo deberá transmitir los resultados de experimentos, pruebas de campo, prototipos, etc., que sean pertinentes. Si una organización dispone de un proceso para autorizar las metas del producto, deberá revisarlo a la luz de la experiencia reciente. Pregunte estas cuestiones: ¿Garantiza el proceso de autorización la entrada de información de clientes clave, tanto internos como externos? ¿Tiene en cuenta la optimización del diseño? Si una organización no dispone de un proceso de autorización de las metas del producto, ahora es el momento de empezar uno.

PASO 5: DESARROLLAR EL PROCESO

Una vez desarrollado el producto, es necesario determinar los medios por los que se creará y entregará el producto de forma consistente. Estos medios son, en su conjunto, el «proceso». El «desarrollo del proceso» es la serie de actividades para definir los medios específicos que usará el personal de operaciones para alcanzar las metas de calidad del producto. Algunos conceptos relacionados incluyen:

- *Procesos parciales.* Los procesos largos pueden descomponerse en unidades más pequeñas para los procesos de desarrollo y operaciones.
- *Actividades.* Los pasos en un proceso o proceso parcial.
- *Tareas.* La descripción detallada y paso a paso para realizar una actividad.

Para que un proceso sea efectivo, se debe orientar a la meta, con resultados específicos medibles; debe ser sistemático, con la secuencia de actividades y tareas definida total y claramente y las entradas y salidas totalmente especificadas; debe ser capaz, es decir, susceptible de alcanzar las metas de calidad del producto en las condiciones de operación, y debe ser validado, con autoridad y responsabilidad claras en su operación.

Las once actividades principales comprendidas en el desarrollo de un caso son:

- Revisar las metas del producto.
- Identificar las condiciones de operación.
- Recoger información conocida sobre procesos alternativos.
- Seleccionar el diseño general del proceso.
- Identificar las metas y características del proceso.
- Identificar las metas y características detalladas del proceso.
- Diseñar teniendo en cuenta los factores críticos y el error humano.
- Optimizar las metas y características del proceso.
- Establecer la capacidad del proceso.
- Fijar y publicar las metas y características del proceso.
- Fijar y publicar el diseño final del proceso.

Revisar las metas del producto. Lo ideal es que esta revisión sea relativamente sencilla. Las metas de calidad del producto se han validado con la participación previa de los que se verán afectados. Sin embargo, en muchas empresas el diseño del proceso y el del producto son ejecutados con frecuencia por equipos distintos. No existe participación conjunta real por parte de ninguno de los grupos para contribuir a los resultados que se espera que ambos equipos produzcan. Esta falta de participación reduce normalmente el número de diseños alternativos que podrían haberse adoptado fácilmente en las fases primeras, pero que son más difíciles y más costosos de incorporar más tarde. Además, aquellos que fijan las metas del producto tienen un interés especial en sus propias decisiones y muestran una resistencia cultural a las propuestas del equipo de diseño de introducir cambios en el diseño del producto. Si los esfuerzos del diseño del proceso y del producto son ejecutados por grupos distintos, la revisión y confirmación de las metas de calidad del producto son entonces absolutamente críticas.

La revisión de las metas de calidad del producto asegura que son comprendidas por los más afectados por el diseño del proceso. La revisión ayuda a conseguir el punto óptimo. Los diseñadores del proceso son capaces de presentar a los diseñadores del producto algunas realidades relativas a los costes de alcanzar las metas de calidad. La revisión del proceso deberá proporcionar un camino válido y sin obstrucciones para cuestionar las metas que implican costes altos.

Identificar las condiciones de operación. La búsqueda de la comprensión de las condiciones de operación requiere investigar un cierto número de dimensiones.

Comprensión del proceso por los usuarios. Entendemos por «usuarios» bien aquellos que contribuyen a los procesos para satisfacer las metas del producto, o bien aquellos que emplean los procesos para satisfacer sus propias necesidades. Los usuarios son, en parte, clientes internos (unidades de organización o personas) responsables del funcionamiento de los procesos para satisfacer las metas del producto. Los operarios u otros trabajadores son usuarios. Los planificadores del proceso necesitan saber cómo entenderán estas personas el trabajo que debe hacerse. El proceso debe diseñarse para adaptar este nivel de comprensión o para mejorar el nivel de comprensión.

Cómo se usará el proceso. Los diseñadores saben siempre el uso *supuesto* del proceso que desarrollan. No obstante, pueden no conocer cómo lo usa (y usa mal) *realmente* el usuario

Capítulo 4

EL PROCESO DE CONTROL DE LA CALIDAD

J. M. Juran y A. Blanton Godfrey

INTRODUCCIÓN	4.2	ETAPAS DEL CONTROL DEL PROCESO	4.14
Definición de control de calidad ..	4.2	Control de inicio (arranque)	4.14
La relación con el aseguramiento de la calidad	4.3	Control en línea	4.14
El bucle de realimentación	4.4	Control del producto	4.14
LOS ELEMENTOS DEL BUCLE DE REALIMENTACIÓN	4.5	Control del equipamiento	4.14
Elegir el objeto de control	4.5	Concepto de dominio	4.15
Establecer la medida	4.6	Clasificación de importancia	4.16
Establecer los niveles de rendimiento: metas del producto y metas del proceso	4.6	Capacidad del proceso	4.16
Medir el rendimiento real	4.8	LA MATRIZ DE CONTROL	4.16
El sensor	4.8	¿Quién hace qué?	4.16
Comparar con las normas	4.8	CONFORMIDAD DEL PROCESO ..	4.17
Actuar sobre la diferencia	4.8	Causas especiales y comunes de variación	4.17
El proceso	4.8	El gráfico de control de Shewhart	4.18
El ciclo PDCA	4.9	Puntos dentro de los límites del control	4.18
LA PIRÁMIDE DE CONTROL	4.9	Puntos fuera de los límites del control	4.19
Control por medios no humanos ..	4.10	Límites estadísticos de control y tolerancias de calidad	4.19
Control por la fuerza de trabajo ..	4.11	Autocontrol; controlabilidad	4.20
Control por la jerarquía directiva ..	4.11	Efecto sobre la decisión de conformidad del proceso	4.22
PLANIFICACIÓN DEL CONTROL DE CALIDAD	4.11	CONFORMIDAD DEL PRODUCTO; ADECUACIÓN AL USO	4.22
Los clientes y sus necesidades ..	4.12	La decisión de conformidad del producto	4.22
¿Quién planifica?	4.12	Autoinspección	4.23
Conceptos del control de calidad	4.12		
El diagrama de flujo	4.12		
Puestos de control	4.13		

La decisión de adecuación al uso	4.24	EL MANUAL DEL CONTROL DE CALIDAD	4.28
Destino del producto no adecuado	4.24	Formato de los manuales de calidad	4.29
Acción correctora	4.25	CONTROL MEDIANTE EL SISTEMA DE RECOMPENSAS	4.29
Diagnóstico de cambios esporádicos	4.25	PROVISIÓN DE AUDITORÍAS	4.29
Acción correctora: solución	4.26	CONTROL DE CALIDAD: ¿QUÉ NOVEDADES HAY?	4.30
EL PAPEL DE LOS MÉTODOS ESTADÍSTICOS	4.27	RESUMEN	4.30
Control Estadístico del Proceso (CEP o SPC)	4.27	TAREAS PARA LOS DIRECTIVOS	4.31
Sus ventajas	4.27	REFERENCIAS	4.31
Sus riesgos	4.27		
Información para tomar decisiones	4.28		

INTRODUCCIÓN

Definición de control de calidad. Este capítulo describe el proceso de control de calidad. «Control de calidad» es un proceso universal de gestión para dirigir las operaciones de forma que proporcionen estabilidad, para prevenir cambios adversos y «mantener el *statu quo*».

Para mantener la estabilidad, el proceso de control de calidad evalúa el rendimiento, compara el rendimiento real con las metas y actúa sobre la diferencia.

El control de calidad es uno de los tres procesos básicos de gestión mediante los que se gestiona la calidad. Los otros son la planificación de la calidad y la mejora de la calidad, que se tratan, respectivamente, en los Capítulos 3 y 5. El diagrama de la trilogía de Juran (Figura 4.1) muestra la interrelación entre estos procesos.

La Figura 4.1 se usa en otros capítulos de este manual para describir las relaciones entre planificación de la calidad, mejora de la calidad y control de calidad y los procesos fundamentales de dirección en la gestión de la calidad total. En este capítulo, lo que importa es centrarse en las dos «zonas de control». En la Figura 4.1 podemos ver fácilmente que, aunque el proceso está en control en el centro del cuadro, estamos dirigiendo el proceso con un nivel inaceptable de desperdicio. Lo que es necesario aquí no es más control, sino mejora: acciones para cambiar el nivel del rendimiento.

Una vez hechas las mejoras, se ha conseguido un nuevo nivel de rendimiento. Ahora es importante establecer nuevos controles en este nivel para evitar que se deteriore el nivel del rendimiento hasta el anterior nivel o peor aún. Esto se indica con la segunda zona de control.

El término «control de calidad» apareció a principios del siglo xx (Radford 1917, 1922). El concepto iba a ensanchar el enfoque para conseguir calidad, desde la inspección después de los hechos entonces prevaleciente, hasta lo que ahora llamamos «prevención de defectos». Durante unas pocas décadas, la palabra «control» tuvo un amplio significado que incluía el concepto de planificación de la calidad. Luego ocurrieron hechos que estrecharon el significado de «control de calidad». El movimiento del «control estadístico de calidad» dio la impresión de que el control de calidad consistía en el uso de métodos estadísticos. El movimiento de la «fiabilidad» proclamó que el control de calidad se aplicaba sólo a la calidad en el momento de la prueba, pero no durante la duración del servicio.

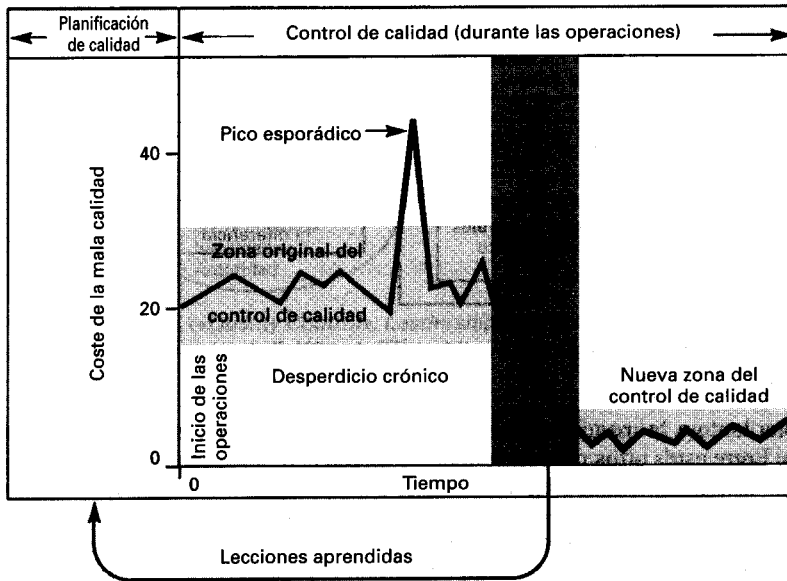


FIGURA 4.1 El diagrama de la trilogía de Juran (*Juran Institute, Inc., Wilton, CT*).

En Estados Unidos, el término «control de calidad» tiene ahora con frecuencia el significado limitado definido previamente. El término «gestión de la calidad total» (TQM) se usa ahora como término que abarca todo. En Europa, el término «control de calidad» está también adquiriendo su significado más limitado. Recientemente, la organización global europea de calidad cambió su nombre de Organización Europea de Control de Calidad a Organización Europea de Calidad. En Japón, el término «control de calidad» retiene su significado amplio. Su «control de calidad total» es más o menos equivalente a nuestro término «gestión de la calidad total». En 1997, la Unión Japonesa de Científicos e Ingenieros (JUSE) adoptó el término gestión de la calidad total (TQM) para sustituir a control de calidad total (TQC), para alinear-se mejor con la terminología más corrientemente usada en el resto del mundo.

El proceso de control de calidad es uno de los pasos en la secuencia global de planificación de la calidad descrita en el Capítulo 3, «El proceso de planificación de la calidad», y más brevemente también en el Capítulo 14, «Gestión de la calidad total». La Figura 4.2 muestra las características de entrada y de salida de este paso.

En la Figura 4.2 la entrada está constituida por las características operativas del proceso desarrolladas para producir las características del producto requeridas para satisfacer las necesidades del cliente. La salida consiste en un sistema de controles de producto y de proceso que pueden proporcionar estabilidad al proceso operativo.

La relación con el aseguramiento de la calidad. El control de calidad y el aseguramiento de la calidad tienen mucho en común. Los dos evalúan el rendimiento. Los dos comparan el rendimiento con las metas. Los dos actúan sobre la diferencia. Sin embargo, también difieren entre sí. El control de calidad tiene como objetivo principal mantener el control. El rendimiento se evalúa durante las operaciones y el rendimiento se compara con las metas durante las operaciones. La información resultante es recibida y usada por la mano de obra de operaciones.

El objetivo principal del aseguramiento de la calidad es verificar que se está manteniendo del control. El rendimiento se evalúa después de las operaciones y la información resultante se

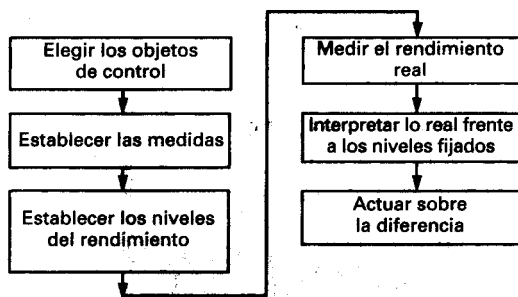


FIGURA 4.2 El diagrama de entrada-salida para el proceso de control de calidad.

proporciona tanto a la mano de obra de operaciones como a otros que tienen necesidad de conocerla. Entre estos otros pueden estar la dirección de planta, funcional o ejecutiva; el personal corporativo; organismos reguladores; clientes, y el público en general.

El bucle de realimentación. El control de calidad se produce con el uso del bucle de realimentación. En la Figura 4.3 se muestra una forma genérica del bucle de realimentación.

La secuencia de pasos de la Figura 4.3 es como sigue:

1. Se «conecta» un *sensor* para evaluar la calidad real del *objeto de control*, es decir, la característica del producto o proceso en cuestión. El rendimiento de un proceso puede determinarse directamente por evaluación de la característica del proceso, o indirectamente por evaluación de la característica del producto: el producto «habla» del proceso.
2. El sensor informa del rendimiento a un *árbitro*.
3. El árbitro recibe también información sobre cuál es la *meta* o nivel de calidad.
4. El árbitro compara el rendimiento real con la meta. Si la diferencia es demasiado grande, el árbitro pone en marcha un *actuador*.
5. El actuador estimula el *proceso* (sea humano o tecnológico) para cambiar el rendimiento de modo que su calidad se alinee con la meta de calidad.
6. El proceso responde restaurando el rendimiento.

Advierta que en la Figura 4.3 los elementos del bucle de realimentación son funciones. Estas funciones son universales para todas las aplicaciones, pero la responsabilidad de realizar estas funciones puede variar mucho. Gran parte del control se realiza a través de bucles de

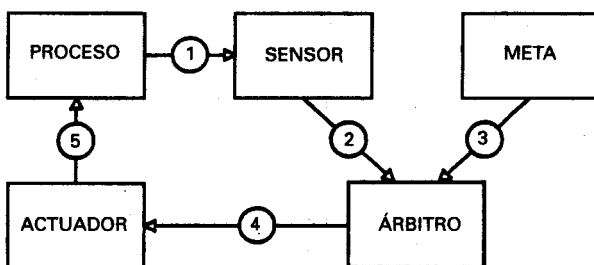


FIGURA 4.3 El bucle de realimentación genérico (*Making Quality Happen*, Juran Institute, Inc., senior executive workshop, p. F-3, Wilson, CT).

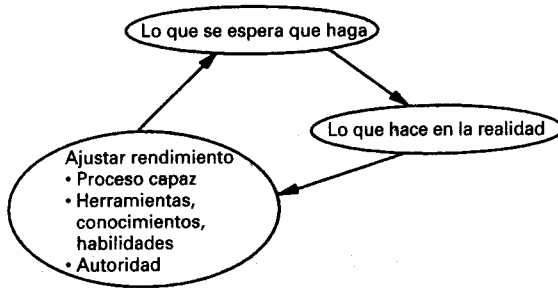


FIGURA 4.4 Autocontrol («Quality Control», *Leadership for the Quality Century*, Juran Institute, Inc., senior executive workshop, p. 5, Wilton, CT).

realimentación automatizados. No hay personas implicadas. Entre los ejemplos corrientes están el termostato utilizado para controlar la temperatura y el control de navegación utilizado en los coches para controlar la velocidad.

Otra forma frecuente de control es el autocontrol llevado a cabo por una persona. Un ejemplo de dicho autocontrol es el artesano de la aldea que realiza cada uno de los pasos del bucle de realimentación. El artesano elige los objetos de control, fija las metas de calidad, percibe cuál es el rendimiento real de calidad, juzga el resultado y se convierte en el actuador en caso de no conformidad. Véase en Lenehan (1982) un ejemplo de este caso que implica a numerosos artesanos fabricando pianos Steinway. Los equipos de trabajo autodirigidos también realizan el autocontrol tal como se entiende aquí. Más información sobre este concepto en el Capítulo 5.

Este concepto de autocontrol se ilustra en la Figura 4.4. Los elementos esenciales aquí son la necesidad del trabajador o de la mano de obra de operaciones de saber qué se espera que hagan ellos, saber que están haciendo en la realidad y tener los medios de ajustar su rendimiento. Esto implica que tienen un proceso capaz, tienen las herramientas, habilidades y conocimientos necesarios para hacer los ajustes y la autoridad para hacerlo.

Otra forma corriente de bucle de realimentación implica a los trabajadores administrativos o a los operarios de fabricación cuyo trabajo es revisado por árbitros en forma de inspectores. Este diseño de bucles de realimentación es en gran parte resultado del sistema taylorista de separar la planificación de la ejecución. El sistema de Taylor surgió hace un siglo y contribuyó en gran medida a aumentar la productividad. Sin embargo, su efecto sobre el control de calidad fue negativo.

LOS ELEMENTOS DEL BUCLE DE REALIMENTACIÓN

El bucle de realimentación es universal. Es fundamental para cualquier problema de control de calidad. Se aplica a todo tipo de operaciones, tanto en sectores de servicios como en sectores de fabricación, sea para obtener un lucro o no. Se aplica a todo nivel jerárquico, desde el máximo ejecutivo a la mano de obra de operaciones, inclusive. Sin embargo, existe una amplia variación en el carácter de los elementos del bucle de realimentación.

En la Figura 4.5, un sencillo diagrama de flujo describe el proceso de control de calidad con el bucle de realimentación simple y universal incorporado.

Elegir el objeto de control. Cada característica del producto (bienes y servicios) o del proceso se convierte en un *objeto de control*, un centro alrededor del cual se construye un bucle

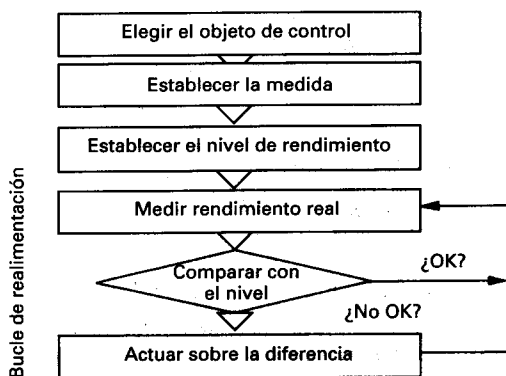


FIGURA 4.5 El proceso de control de calidad («Quality Control», *Leadership for the Quality Century*, Juran Institute, Inc., senior executive workshop, p. 2, Wilton, CT).

de realimentación. El primer paso crítico es elegir el objeto de control. Los objetos de control se derivan de múltiples fuentes, que incluyen:

- Necesidades de características del producto declaradas por los clientes.
- Análisis tecnológico para traducir las necesidades de los clientes a características del producto y del proceso.
- Características del proceso que influyen directamente sobre características del producto.
- Normas sectoriales y gubernamentales.
- Requisitos para proteger la seguridad humana y el medio ambiente.
- Requisitos para evitar efectos colaterales, como enfado de los empleados u ofensas a la comunidad vecinal.

A nivel de los trabajadores, los objetos de control consisten principalmente en características del producto y del proceso fijadas en especificaciones y manuales de procedimientos. A nivel de dirección, los objetos de control son más amplios y crecientemente orientados al negocio. El énfasis cambia a las necesidades de los clientes y a la competencia en el mercado. Este cambio en el énfasis exige objetos de control añadidos más amplios, que, a su vez, influyen sobre los restantes pasos del bucle de realimentación.

Establecer la medida. Tras elegir el objeto de control, el paso siguiente es establecer el medio de medir el rendimiento real del proceso o el nivel de calidad de los bienes o servicios. Medir es una de las tareas más difíciles de la gestión de calidad y se trata en casi todas las secciones de este manual, especialmente en las secciones sectoriales. Para establecer la medida necesitamos especificar claramente los medios de la medida (el sensor), la frecuencia de la medida, la forma en que se registrará, el formato de informe de los datos, el análisis que se hará de los datos para convertirlos en información utilizable y quién hará las medidas. Se debate el tema con detenimiento en el Capítulo 9, «Medición, información y toma de decisiones».

Establecer los niveles de rendimiento: metas del producto y metas del proceso. Es necesario establecer para cada objeto de control un nivel de rendimiento, una meta de calidad (llamadas también fines, objetivos, etc.). Un nivel de rendimiento es un logro al que se tiende y para el que se invierten esfuerzos. La Tabla 4.1 da algunos ejemplos de objetos de control y de sus metas asociadas.

TABLA 4.1 Ejemplos de objetos de control y metas de calidad asociadas

Objeto de control	Meta
Millaje del vehículo	Mínimo de 25 mi/gal conduciendo por autopista
Entrega en el día	99,5 % entregado antes de 10,30 mañana siguiente
Fiabilidad	Menos de 3 fallos en 25 años de servicio
Temperatura	Mínimo 505 ° F; máximo 515 ° F
Media de error en órdenes de compra	No más de 3 errores/1000 órdenes de compra
Rendimiento competitivo	Igual o mejor que los 3 mejores competidores en 6 factores
Satisfacción del cliente	Media de 90 % o más, servicio sobresaliente o excelente
Retención del cliente	Retención del 95 % de clientes clave a lo largo de los años
Fidelidad del cliente	100 % de cuota de mercado de más del 80 % de clientes

La principal meta de los *productos* es satisfacer las necesidades de los clientes. Los clientes industriales a menudo especifican sus necesidades con cierta precisión. Dichas necesidades específicas se convierten entonces en metas de calidad de la empresa productora. Por el contrario, los consumidores tienden a declarar sus necesidades en términos vagos. Tales declaraciones deben entonces traducirse al lenguaje del productor para poder convertirse en metas de producto.

Otras metas para los productos que también son importantes son las de fiabilidad y durabilidad. El que los productos cumplan dichas metas puede tener un impacto crítico sobre la satisfacción del cliente y su fidelidad y sobre los costes globales. Los fallos de los productos en garantía pueden influir gravemente sobre los beneficios de una empresa a través tanto de los costes directos como de los indirectos (pérdida de ventas repetidas, información de palabra, etc.).

Los *procesos* que producen productos tienen dos clases de metas de calidad:

1. Producir productos que se ajusten a las necesidades de los clientes. En teoría, cada unidad de producto debería ajustarse a las necesidades de los clientes.
2. Operar de una manera estable y predecible. Diciéndolo en palabras de un especialista de calidad, cada proceso deberá estar «bajo control». Más adelante ampliaremos esto, bajo el encabezamiento Conformidad del proceso. Estas metas pueden estar directamente relacionadas con los costes de producir los bienes o servicios.

Las metas de calidad pueden también establecerse para departamentos o personas. El rendimiento frente a dichas metas se convierte entonces en una entrada para el sistema de recompensa de la empresa. En teoría, dichas metas deberían ser:

- *Legítimas*. Deberán tener un *status* oficial indudable.
- *Medibles*. De forma que se puedan comunicar con precisión.
- *Alcanzables*. Como queda demostrado por el hecho de que han sido alcanzadas por otros.
- *Equitativas*. Personas con responsabilidades comparables deberán poder alcanzarlas de modo razonablemente parecido.

Se pueden fijar metas de calidad con una combinación de las siguientes bases:

- Las metas para características de producto y características de proceso se basan en su mayoría en el análisis *tecnológico*.
- Las metas para departamentos o personas deberán basarse en *benchmarking* más que en el rendimiento histórico. Véase el Capítulo 12, «Benchmarking, para más información».

Las metas de calidad en sus niveles más altos están en los primeros pasos de su desarrollo. La práctica actual es establecer metas sobre materias tales como satisfacer las necesidades

cambiantes de los clientes, responder a la competencia, mantener un alto ritmo de mejora de la calidad, mejorar la efectividad de los procesos de empresa y revisar el proceso de planificación de forma que se evite crear productos y procesos proclives a los fallos.

Medir el rendimiento real. El paso crítico en el control de calidad es medir el rendimiento real del producto o del proceso. Para tomar esta medida necesitamos un sensor, un dispositivo que haga la medida determinada.

El sensor. Un «sensor» es un dispositivo detector especializado. Está diseñado para reconocer la presencia e intensidad de ciertos fenómenos y convertir los datos resultantes en «información». Esta información se convierte entonces en la base de la toma de decisiones. En los niveles inferiores de la organización, la información está a menudo en una base de tiempo real y se usa para el control en curso. En los niveles superiores se resume la información de varias formas para proporcionar medidas más extensas, detectar tendencias e identificar los pocos problemas vitales.

La amplia variedad de objetos de control requiere una amplia variedad de sensores. Una categoría fundamental la constituyen los numerosos instrumentos tecnológicos usados para medir las características de producto y las características de proceso. Ejemplos familiares son los termómetros, relojes, varas de medir y balanzas. Otra categoría fundamental de sensores la constituyen los sistemas de datos y los informes asociados que suministran información resumida a la jerarquía directiva. Y todavía otra categoría es la que implica el uso de sensores humanos. También son formas de sensores los cuestionarios y entrevistas.

La captura de datos para el control se hace a gran escala. Esto ha llevado al uso de ordenadores que ayuden en la captura y en la conversión en información de los datos resultantes. Se puede ver un ejemplo en un entorno de oficina (control en centros de contestación por teléfono) en Bylinsky (1991). Y un ejemplo en un entorno de fábrica (moldeado plástico) en Umscheid (1991).

La mayor parte de los sensores proporciona su evaluación en términos de una *unidad de medida*, una cantidad definida de alguna característica de calidad, que permite evaluar esa característica en números. Ejemplos familiares de unidades de medida son grados de temperatura, horas, pulgadas y toneladas. Se tratan las unidades de medida en el Capítulo 9, «Medición, información y toma de decisiones». Gran cantidad de datos los toman de los seres humanos. Dicha captura está sujeta a numerosas fuentes de error.

Comparar con las normas. El acto de comparar con las normas se ve con frecuencia como papel propio de un árbitro. El árbitro puede ser humano o un dispositivo tecnológico. En ambos casos, el árbitro puede ser llamado a realizar alguna o todas las actividades siguientes:

1. Comparar el rendimiento de calidad real con la meta de calidad.
2. Interpretar la diferencia observada; determinar si existe conformidad con la meta.
3. Decidir la acción a tomar.
4. Promover una acción correctora.

Estas actividades requieren elaboración y se examinarán con más profundidad dentro de poco.

Actuar sobre la diferencia. En todo sistema de control de calidad que funcione bien necesitamos un medio de actuar sobre la diferencia entre los niveles deseados de rendimiento y el rendimiento real. Necesitamos un actuador. Este dispositivo (humano o tecnológico, o ambos) es el medio de iniciar la acción que restablezca el rendimiento. A nivel de trabajador puede ser un teclado que dé órdenes a un ordenador de oficina o un botón calibrado que ajuste la herramienta de una máquina herramienta. A nivel de directiva puede ser un memorándum a los subordinados.

El proceso. En todo lo tratado hasta ahora hemos asumido un proceso. También éste puede ser humano o tecnológico, o ambos. Es el medio para producir las características del producto, cada una de las cuales es un objeto de control. Todo trabajo se hace mediante un proceso que consta de unas entradas, trabajo, tecnología, procedimientos, energía, materiales y salidas. Véase el Capítulo 6, «Gestión de los procesos», para más información sobre el proceso.

El ciclo PDCA. Existen varios modos de dividir el bucle de realimentación en elementos y pasos. Algunos de ellos emplean más de seis elementos; otros emplean menos de seis. Un ejemplo popular de estos últimos es el ciclo llamado PDCA (también rueda de Deming), que se muestra en la Figura 4.6. Deming se refería a él como ciclo de Shewhart, que es el nombre que aún utilizan muchos cuando describen esta versión del bucle de realimentación.

En este ejemplo, el bucle de realimentación está dividido en cuatro pasos titulados Planificar, Hacer, Comprobar y Actuar. Estos pasos corresponden aproximadamente a los seis pasos de que se ha hablado anteriormente:

- «Planificar» abarca elegir los objetos de control y fijar las metas.
- «Hacer» abarca dirigir el proceso.
- «Comprobar» abarca percibir y arbitrar.
- «Actuar» abarca estimular el actuado para que emprenda acciones correctoras.

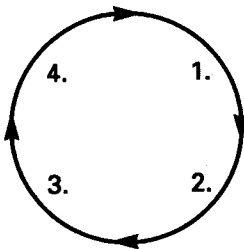
Una versión temprana del ciclo PDCA se incluyó en las primeras conferencias de Edwards Deming en Japón (Deming 1950). Desde entonces se han elaborado y publicado versiones adicionales. Para más detalles, véase Koura (1991).

Algunas de estas versiones han intentado etiquetar el ciclo PDCA de forma que sirva como una serie universal de pasos tanto para el control de calidad como para la mejora de la calidad. Los autores creen que esto confunde las cosas, ya que se ven envueltos dos procesos muy diferentes. (El proceso de mejora de la calidad se trata en el Capítulo 5).

LA PIRÁMIDE DE CONTROL

Los objetos de control son muy numerosos, pero el número de «cosas» a controlar es aún mayor. Entre estas cosas están los catálogos publicados y las listas de precios enviadas, multiplicados por el número de ítems en cada uno de ellos; las ventas hechas, multiplicadas por el número de ítems de cada venta, las unidades de productos producidas, multiplicadas por el número de características de calidad asociadas; y lo mismo para el número de ítems asociados con las relaciones de

Estudiar los resultados.
¿Qué aprendimos?
¿Qué podemos predecir?



Observar los efectos del
cambio o prueba.

¿Cuál puede ser el logro más importante de este equipo? ¿Qué cambios pueden ser deseables? ¿Qué datos están disponibles? ¿Se necesitan nuevas observaciones? Si la respuesta es sí, planificar un cambio o prueba. Decidir cómo usar las observaciones.

Realizar el cambio o prueba decididos, preferiblemente a pequeña escala.

Paso 5. Repetir paso 1, con el conocimiento acumulado.
Paso 6. Repetir paso 2 y siguientes.

FIGURA 4.6 El ciclo PDCA (Deming 1986).

los empleados, las relaciones de los proveedores, el control de costes, el control de inventario, el desarrollo de productos y procesos, etc.

Un estudio en una pequeña empresa que empleaba a 350 personas descubrió que había *más de mil millones de cosas a controlar* (Juran 1964, pp. 181-182).

No hay posibilidad de que la alta dirección controle las cifras enormes de objetos de control. En vez de eso, dividen el trabajo de control, usando un plan de delegación parecido al descrito en la Figura 4.7.

Esta división del trabajo establece tres áreas de responsabilidad del control: control por medios no humanos, control por la fuerza de trabajo y control por la jerarquía directiva.

Control por medios no humanos. En la base de la pirámide están los procesos automatizados de bucle de realimentación y a prueba de errores que operan con la única intervención humana de los servicios de mantenimiento (que, sin embargo, es crítica). Estos métodos no humanos proporcionan control sobre la gran mayoría de las cosas. Los objetos de control son exclusivamente tecnológicos y el control tiene lugar en tiempo real.

Los restantes controles de la pirámide requieren intervención humana. Por un amplio margen, el más asombroso logro en control de calidad tiene lugar durante un proceso biológico que tiene millones de años de edad: el crecimiento de un huevo fertilizado hasta convertirse en un organismo animal. En los seres humanos, las instrucciones genéticas que programan este crecimiento consisten en una secuencia de alrededor de tres mil millones de «letras». Esta secuencia, el genoma humano, está contenida en dos filamentos de ADN (la doble hélice), que «se desdoblán» y copian alrededor de mil billones de veces durante el proceso de crecimiento del huevo fertilizado hasta el nacimiento del ser humano.

Dadas cifras tan gigantescas, las oportunidades de error son enormes (algunos errores son inofensivos, pero otros son dañinos e incluso letales). Sin embargo, el promedio de errores en la realidad es del orden de uno por cada mil millones. Este promedio de errores increíblemente bajo se alcanza mediante un bucle de realimentación que implica tres procesos (Radman y Wagner 1988):

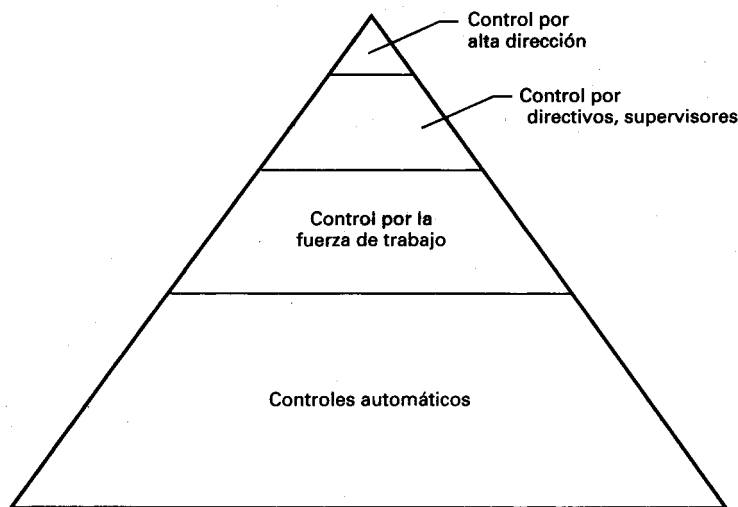


FIGURA 4.7 La pirámide de control (*Making Quality Happen*, Juran Institute, Inc., senior executive workshop, p. F-5, Wilton, CT).

- Un proceso de selección de alta fidelidad para enlazar las «letras» correctas, usando combinaciones químicas bajo llave.
- Un proceso de corrección de pruebas para leer la letra más reciente y eliminarla si es incorrecta.
- Un proceso de acción correctora para rectificar los errores que se han detectado.

Control por la fuerza de trabajo. Delegar tales decisiones a la fuerza de trabajo reporta importantes beneficios en las relaciones humanas y en la dirección de las operaciones. Estos beneficios incluyen acortar el bucle de realimentación; proveer a la fuerza de trabajo con un mayor sentido de propiedad de los procesos operativos, llamado frecuentemente «potenciación», y liberar a los supervisores y directivos para que dediquen más tiempo a planificación y mejora.

Es factible delegar la mayor parte de las decisiones de control de calidad a la fuerza de trabajo. Muchas empresas ya lo hacen. Sin embargo, delegar decisiones de *control de proceso* requiere satisfacer los criterios de «autocontrol». Delegar decisiones de *control de producto* requiere satisfacer los criterios de «autoinspección» (véase más adelante en este capítulo bajo Autocontrol y Autoinspección, respectivamente).

Control por la jerarquía directiva. La cima de la pirámide de control consiste en los «pocos objetos de control vitales». Se reparten en los distintos niveles de la jerarquía directiva, incluida la alta dirección.

Los directivos deberán evitar involucrarse en profundidad en la toma de decisiones sobre el control de calidad. En vez de eso, deberán:

- Tomar las pocas decisiones vitales.
- Proporcionar criterios para distinguir las pocas decisiones vitales del resto (véase un ejemplo de cómo proporcionar dichos criterios en la Tabla 4.3, bajo el encabezamiento La decisión de adecuación al uso).
- Delegar el resto mediante un proceso de toma de decisiones que proporcione las herramientas y formación esenciales.

La distinción entre los pocos asuntos vitales y los otros se origina en los objetos de control. La Tabla 4.2 muestra cómo afectan los objetos de control en dos niveles —fuerza de trabajo y alta dirección— a los elementos del bucle de realimentación.

PLANIFICACIÓN DEL CONTROL DE CALIDAD

Planificar el control es la actividad que proporciona el sistema —conceptos, metodología y herramientas— mediante el que puede el personal de la empresa mantener estables los proce-

TABLA 4.2 Contraste del control de calidad en dos niveles: fuerza de trabajo y alta dirección

	En los niveles de fuerza de trabajo	En los niveles de dirección
Metas de control	Características de producto y proceso en especificaciones y procedimientos.	Orientado al negocio, posibilidad de venta, competitividad del producto.
Sensores	Tecnológico.	Sistemas de datos.
Decisiones por tomar	¿Conformidad o no?	¿Satisface las necesidades de los clientes o no?

Fuente: Making Quality Happen, Juran Institute, Inc., senior executive workshop, p. F-3, Wilson, CT.

los operativos y así producir las características del producto requeridas para satisfacer las necesidades de los clientes. Las características de entrada-salida de este sistema (también plan, proceso) se describían en la Figura 4.2.

Los clientes y sus necesidades. Los principales clientes de los sistemas de control de calidad son el personal de la empresa implicado en el control, los que ejecutan los pasos que forman el bucle de realimentación. Dicho personal requiere (1) una comprensión de las necesidades de calidad de los clientes y (2) una definición de su propio papel para satisfacer dichas necesidades. Sin embargo, la mayoría de ellos carecen de contacto directo con los clientes. Planificar el control de calidad ayuda a salvar la brecha suministrando una traducción de lo que son las necesidades de los clientes, además de definir la responsabilidad de satisfacer dichas necesidades. De este modo, la planificación del control de calidad incluye proporcionar al personal operativo la información sobre las necesidades de los clientes (sea directa o traducida) y la definición de las responsabilidades de control relacionadas del personal operativo. Se puede tratar con mucho detalle de planificación del control de calidad; véanse, por ejemplo, Duyck (1989) y Goble (1987).

¿Quién planifica? La planificación del control de calidad se ha asignado en el pasado de manera variada a:

- Planificadores de este departamento que también planifican los procesos operativos.
- Especialistas de calidad de este departamento.
- Equipos multifuncionales de planificadores y personal operativo.
- Directores de departamento y supervisores.
- Fuerza de trabajo.

La planificación del control de calidad de procesos críticos ha sido tradicionalmente responsabilidad de quienes planificaban los procesos operativos. Para procesos no críticos se asignaba normalmente la responsabilidad a los especialistas de calidad del Departamento de Calidad. Sus borradores de planes eran luego sometidos a la aprobación de los jefes operativos.

Las últimas tendencias son aumentar el uso del concepto de equipo. Los miembros que componen el equipo vienen del personal de operaciones y pueden incluir también a los proveedores y clientes de los procesos operativos. Las últimas tendencias son también aumentar la participación de la fuerza de trabajo. Para más información, véase Juran (1992, pp. 290-291). El concepto de equipos de trabajo autodirigidos se ha extendido mucho en los últimos años e incluye muchas de estas ideas. Para más detalles sobre este tema, véase el Capítulo 15.

Conceptos del control de calidad. La metodología del control de calidad está elaborada en torno a varios conceptos, tales como bucle de realimentación, capacidad del proceso, autocontrol, etc. Algunos de estos conceptos tienen un origen antiguo; otros han evolucionado en este siglo. Durante la discusión de la planificación del control de calidad profundizaremos en algunos de los conceptos usados más extensamente.

El diagrama de flujo. Normalmente, el primer paso en la planificación del control de calidad es dibujar el flujo de los procesos operativos. (El diseño de dichos procesos se trató en el Capítulo 3, «El proceso de planificación de la calidad»). La herramienta para hacer el mapa es el «diagrama de flujo». La Figura 4.8 es un ejemplo de un diagrama de flujo. (Más ejemplos de esta herramienta en el Apéndice V).

El diagrama de flujo se usa profusamente durante la planificación de los controles de calidad. Ayuda al equipo a:

- Comprender los procesos operativos globales. Cada miembro del equipo conoce bien su segmento de proceso, pero sabe menos de otros segmentos y de las relaciones entre unos y otros.

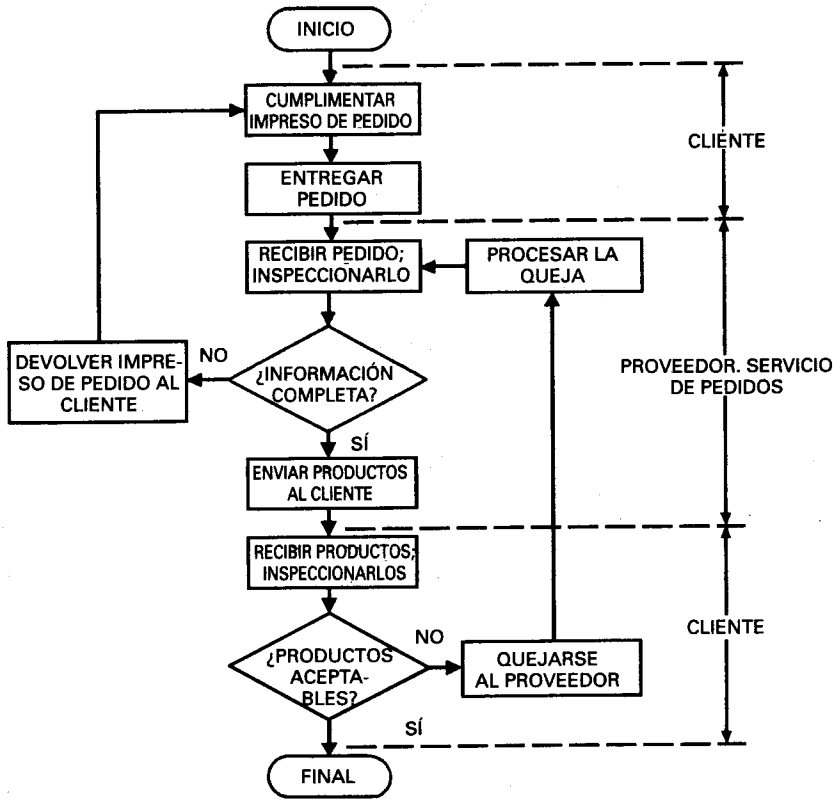


FIGURA 4.8 El diagrama de flujo.

- Identificar los objetos de control alrededor de los que se crea el bucle de realimentación [véase un ejemplo en Siff (1984)]. El carácter de estos objetos de control se discutió previamente bajo el encabezamiento El objeto de control.
- Diseñar los puestos de control (véase la sección siguiente).

Puestos de control. Un «puesto de control» es un área en la que tiene lugar el control de calidad. En los niveles inferiores de la organización, un puesto de control está normalmente confinado en un área física limitada. En otros casos, el puesto de control puede adoptar distintas formas, como una patrulla de vigilancia o una «torre de control». En los niveles superiores, los puestos de control pueden estar dispersos geográficamente, como ocurre con el alcance de la responsabilidad de un directivo.

Una revisión de numerosos puestos de control muestra que normalmente se diseñan para proporcionar evaluaciones y/o avisos en los siguientes casos:

- En los cambios de jurisdicción, cuando se transfiere la responsabilidad de una organización a otra.
- Antes de embarcarse en alguna actividad irreversible significativa, como la firma de un contrato.
- Tras la creación de una característica de calidad crítica.
- En el punto de variables de proceso dominantes.
- En áreas («ventanas») que permiten realizar una evaluación económica.

ETAPAS DEL CONTROL DEL PROCESO

El diagrama de flujo no sólo descubre el progreso de los sucesos en el proceso operativo, sino que también sugiere qué etapas deberán convertirse en los centros de la actividad de control. Varias de estas etapas se aplican a la mayoría de los procesos operativos.

Control de inicio (arranque). El resultado final de esta forma de control es la decisión de «apretar el botón de arranque» o no. Usualmente, este control implica:

- Una *cuenta atrás* listando los pasos de preparación necesarios para tener el proceso dispuesto a producir. Dicha cuenta atrás procede a veces de los proveedores. Las compañías aéreas proporcionan listas de comprobación para ayudar a los viajeros a planificar sus desplazamientos; las compañías eléctricas proporcionan listas de comprobación para ayudar a los dueños de casas a preparar las casas para el invierno.
- *Evaluación* de las características del proceso y/o del producto para determinar si el proceso, una vez iniciado, alcanzará las metas.
- *Criterios* que deberán seguir las evaluaciones.
- *Verificación* de que se han conseguido los criterios.
- *Asignación de responsabilidad.* Esta asignación varía, dependiendo en gran manera de lo críticas que sean las metas de calidad. Cuanto más críticas sean, mayor será la tendencia a asignar la verificación a especialistas, supervisores y verificadores «independientes», y no a trabajadores no supervisores.

Control en línea. Esta forma de control tiene lugar periódicamente durante la operación del proceso. Su propósito es tomar la decisión de «rodar o parar»: si el proceso debe continuar con la producción o debe parar.

El control en línea consiste en cerrar el bucle de realimentación una vez tras otra. El rendimiento de proceso y/o del producto se evalúa y compara con las metas. Si el proceso y/o el producto está conforme con las metas y si el proceso no ha sufrido ningún cambio adverso significativo, la decisión es «que continúe rodando». Si no existe conformidad o si ha habido un cambio significativo, entonces hay que recurrir a acciones correctoras.

El término «significativo» tiene más significados que los del diccionario. Uno de estos significados se aplica a si un cambio indicado es un cambio real o es una falsa alarma debida a una variación casual. El diseño del control del proceso deberá proporcionar las herramientas necesarias que ayuden a la mano de obra de operaciones a distinguir entre cambios reales y falsas alarmas. La metodología del control estadístico de procesos (SPC) tiene como objeto suministrar dichas herramientas (véase el Capítulo 45).

Control del producto. Esta forma de control tiene lugar después de que se haya producido cierta cantidad del producto. El propósito del control es decidir si el producto está o no conforme con las metas de calidad del producto. La asignación de responsabilidad de esta decisión difiere de una empresa a otra. Sin embargo, en todos los casos quienes tienen que tomar las decisiones deben disponer del equipamiento y formación que les permitan comprender las metas de calidad del producto, evaluar la calidad real del producto y decidir si hay conformidad.

Dado que todo esto supone tomar una decisión de hecho, puede en teoría ser delegado en cualquiera, incluidos los miembros de la mano de obra de operaciones. En la práctica, no se delega en aquellos cuyas prioridades asignadas puedan sesgar su opinión. En dichos casos, se delega normalmente en aquellos cuyas responsabilidades estén libres de tales sesgos, por ejemplo, en inspectores «independientes». El control estadístico de procesos (SPC) es una metodología usada frecuentemente para librar de sesgos.

Control del equipamiento. La mayoría de los procesos operativos emplea servicios físicos: equipos, instrumentos y herramientas. Ha aumentado la tendencia a usar procesos

automatizados, ordenadores, robots, etc. Esta misma tendencia hace que la calidad de los productos dependa cada vez más del mantenimiento del equipamiento.

Los elementos del diseño del control del equipamiento son bien conocidos:

- Establecer un programa para realizar el mantenimiento del equipamiento.
- Establecer una lista de comprobación, una lista de las tareas a realizar durante la acción de mantenimiento.
- Formar a las fuerzas de mantenimiento en la realización de las tareas.
- Asignar una responsabilidad clara para respetar el programa.

El eslabón más débil en el control del equipamiento ha sido el respeto al programa. Para asegurarse una más estricta fidelidad al programa se requiere una auditoría independiente.

En los casos en que se introduce una tecnología nueva, otro eslabón débil es la formación del personal de mantenimiento (White 1988).

Durante los años ochenta los fabricantes de coches empezaron a introducir en sus vehículos ordenadores y otros dispositivos electrónicos. Pronto se advirtió que muchos técnicos de talleres de reparación carecían de la base de educación tecnológica necesaria para diagnosticar y solucionar los fallos de campo asociados. Para empeorar las cosas, los fabricantes de coches no dieron prioridad a la normalización de los ordenadores. Como resultado, se acumuló un retraso masivo de formación.

Véase en Nowlan y Heap (1978) un excelente tratado sobre el mantenimiento del equipamiento.

Concepto de dominio. Los objetos de control son tan numerosos que los planificadores harán bien en identificar los pocos objetos de control vitales, de forma que reciban la adecuada prioridad. Una herramienta para identificar los pocos vitales es el concepto de dominio.

Los procesos operativos están influidos por muchas variables, pero frecuentemente una variable es más importante que todas las demás combinadas. De dicha variable se dice que es la «variable dominante». El conocimiento de cuál de las variables del proceso es la dominante ayuda a los planificadores en la asignación de recursos y prioridades. Entre las variables dominantes más corrientes están:

1. *Dominante ajuste inicial.* Algunos procesos muestran que los resultados tienen una alta estabilidad y son fácilmente reproducibles durante muchos ciclos de operación. Un ejemplo corriente es el proceso de imprenta. El diseño del control deberá proporcionar a la mano de obra de operaciones los medios de hacer el ajuste inicial y validarlo con precisión antes de seguir con las operaciones.
2. *Dominante tiempo.* Aquí se sabe que el proceso cambia progresivamente con el tiempo, por ejemplo, la disminución de los suministros consumibles, el calentamiento y deterioro de las herramientas. El diseño del control deberá proporcionar los medios para una evaluación periódica del efecto del cambio progresivo y para su reajuste cuando convenga.
3. *Dominante componentes.* Aquí la principal variable es la calidad de los materiales y componentes que lo integran. Un ejemplo es el ensamblaje de los equipos electrónicos o mecánicos. El diseño del control deberá dirigirse a las relaciones con el proveedor, incluyendo la planificación conjunta con los proveedores para mejorar la calidad de los componentes.
4. *Dominante trabajadores.* En estos procesos, la calidad depende principalmente de las habilidades y el tino que tengan los trabajadores. Los oficios especializados son ejemplos bien conocidos. El diseño del control deberá poner el énfasis en la prueba de aptitud de los trabajadores, la formación y certificación, la calificación de los trabajadores, y un proceso seguro para reducir los errores de los trabajadores.

5. *Dominante información.* Aquí los procesos tienen el carácter de un «taller», de forma que hay cambios frecuentes en los productos que se fabrican. Como resultado, la información de la tarea cambia con frecuencia. El diseño del control deberá concentrarse en proporcionar un sistema de información que pueda transmitir información exacta y actualizada de cómo difiere esta tarea de sus predecesoras.

Clasificación de importancia. Otra forma de identificar los pocos objetos de control vitales es mediante la clasificación de importancia. Bajo este concepto, cada característica de producto se clasifica en una de las varias clases definidas como crítica, importante, menor. Estas clasificaciones guían entonces a los planificadores en la asignación de recursos y prioridades, elección de medios, frecuencia de inspección y pruebas, etc.

(Para mayor información, véase el Capítulo 22, «Operaciones», bajo Clasificación de los defectos).

Capacidad del proceso. Uno de los conceptos más importantes en el proceso de planificación de la calidad es la «capacidad del proceso». La principal aplicación de este concepto está durante la planificación de los procesos operativos. Esta aplicación se trata con mayor profundidad en el Capítulo 22, «Operaciones».

Este mismo concepto tiene también aplicación en el control de calidad. Para explicarlo es necesario un breve repaso. Todos los procesos operativos tienen una uniformidad inherente para producir productos. Esta uniformidad puede a menudo ser cuantificada, incluso durante las etapas de planificación. Los planificadores del proceso pueden usar la información resultante para tomar decisiones sobre la adecuación de los procesos, elección de procesos alternativos, necesidad de revisión de los procesos, etc., con relación a la uniformidad inherente y a sus relaciones con las metas del proceso.

Aplicado a la planificación del control de calidad, el estado de la capacidad del proceso se convierte en un factor importante en las decisiones sobre la frecuencia de medir el rendimiento del proceso, de programar el mantenimiento del equipamiento, etc. Cuanto mayor sean la estabilidad y uniformidad del proceso, menor será la necesidad de medidas y mantenimiento frecuentes.

Quienes planifiquen el control de calidad deberán comprender totalmente el concepto de capacidad del proceso y su aplicación a las dos áreas de planificación: planificación de los procesos operativos y planificación de los controles.

LA MATRIZ DE CONTROL

El trabajo de los planificadores se resume normalmente en una matriz de control. Esta matriz es una herramienta de planificación importante. Se puede ver un ejemplo en la Figura 4.9.

En esta matriz las filas horizontales son los distintos objetos de control. Las columnas verticales son los elementos del bucle de realimentación más otras características necesarias para que la mano de obra de operaciones ejercite su control y cumpla con las metas de la calidad.

Algunos de los contenidos de las columnas verticales afectan a un solo objeto de control específico. Sin embargo, otras columnas verticales se aplican extensamente a muchos objetos de control. Entre ellos están las unidades de medida, el tipo de sensor, las metas de calidad, la frecuencia de las medidas, el tamaño de la muestra, los criterios para la toma de decisiones y la responsabilidad de la toma de decisiones.

¿Quién hace qué? El bucle de realimentación implica múltiples tareas, cada una de las cuales requiere una asignación clara de responsabilidad. En todo puesto de control existen numerosas personas disponibles para desempeñar estas tareas. Por ejemplo, a nivel de fuerza de trabajo, un puesto de control puede incluir especialistas de ajuste, operadores, personal de

OBJETO DE CONTROL	CARACTERÍSTICAS DE CONTROL DE PROCESO	UNIDAD DE MEDIDA	TIPO DE SENSOR	META	FRECUENCIA DE MEDIDA	TAMAÑO DE MUESTRA	CRITERIOS PARA TOMA DE DECISIONES	RESPONSABILIDAD DE TOMA DE DECISIONES	...
Condiciones de soldadura de ola. Temperatura de la soldadura		Grados F (°F)	Termo-par	505 °F	Continua	N/A	510 °F, reducir calor; 500 °F, aumentar calor	Operador	...
Velocidad de transportadora		Pies por minuto (ft/min)		4,5 ft/min	1/hora	N/A	5 ft/min, reducir velocidad; 4 ft/min, aumentar velocidad	Operador	...
Pureza de aleación		% total contaminantes	Análisis laboratorio químico	1,5 % máx.	1/mes	15 gramos	A 1,5%, vaciar baño, sustituir la soldadura	Ingeniero de proceso	..
		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	

FIGURA 4.9 Matriz para «¿Quién hace qué?» (*Making Quality Happen, Juran Institute, Inc., senior executive workshop, p. F-8, Wilton, CT.*)

mantenimiento, inspectores, etc. En tales casos es necesario estar de acuerdo en quién deberá tomar qué decisiones y quién deberá realizar qué acciones. Una ayuda para alcanzar dicho acuerdo se encuentra en una matriz similar a la de la Figura 4.9.

En esta matriz las decisiones y acciones esenciales están listadas en la columna de la izquierda. Las restantes columnas están encabezadas por los nombres de las categorías de tareas asociadas con el puesto de control. Luego, a través de la discusión entre el personal relevante, se alcanza el acuerdo sobre quién hace qué.

La matriz (Fig. 4.9) es un medio probado de hallar respuestas a la pregunta ya antigua, pero vaga, de «¿Quién es responsable de la calidad?». La pregunta nunca ha sido respondida porque por naturaleza no tiene respuesta. Sin embargo, si la pregunta se hace en términos de decisiones y acciones, se abre el camino para ponerse de acuerdo sobre las respuestas. Esto disipa la vaguedad.

CONFORMIDAD DEL PROCESO

¿Está el proceso conforme con sus metas de calidad? El árbitro contesta a esta pregunta interpretando la diferencia observada entre el rendimiento del proceso y las metas del proceso. Cuando el rendimiento real difiere de las metas de calidad, surge la pregunta: ¿Cuál es la causa de la diferencia?

Causas especiales y comunes de variación. Las diferencias se originan normalmente en una de estas dos maneras: (1) el cambio observado está causado por el comportamiento de una variable importante en el proceso (o por la entrada de una nueva variable importante), o (2) el cambio observado está causado por la interacción entre múltiples variables menores en el proceso.

Shewhart llamó a (1) y (2), respectivamente, causas «asignables» y «no asignables» de variación (Shewhart 1931). Deming acuñó más tarde los términos causas de variación «especiales» y «comunes» (Deming 1986). Usaremos la terminología de Deming en lo que sigue.

Las causas «especiales» son normalmente esporádicas y a menudo tienen su origen en variables únicas. En tales casos es comparativamente fácil realizar un diagnóstico y propor-

cionar soluciones. Las causas «comunes» son normalmente crónicas y a menudo tienen su origen en el juego entre múltiples variables menores. Como resultado, es difícil diagnosticarlas y proporcionar soluciones. Este contraste deja clara la importancia de distinguir las causas especiales de las causas comunes al interpretar las diferencias. La necesidad de hacer tales distinciones está muy extendida. Las causas especiales son el objeto del control de calidad; las causas comunes son el objeto de la mejora de calidad.

El gráfico de control de Shewhart. Es conveniente procurar a los árbitros herramientas que les ayuden a distinguir entre las causas especiales y las causas comunes. Una herramienta atractiva para este propósito es el gráfico de control de Shewhart (o simplemente gráfico de control) que se muestra en la Figura 4.10.

En la Figura 4.10, la escala horizontal es el tiempo y la escala vertical son los resultados de la calidad. Los puntos trazados muestran los resultados de la calidad a medida que pasa el tiempo.

En el gráfico aparecen también tres líneas horizontales. La línea central es la media de resultados pasados, y por tanto es el nivel de resultados esperado. Las otras dos líneas son «líneas de límite» estadísticas. Están para separar las causas especiales de las causas corrientes, basándose en algún nivel elegido de probabilidad, como puede ser de 20 a 1.

Puntos dentro de los límites del control. El punto A en el gráfico difiere de la media histórica. Sin embargo, dado que el punto A está dentro de las líneas de límite, esta diferencia podría ser debida a causas corrientes (con probabilidad de menos de 20 a 1). De aquí que supongamos que no hay causa especial.

En ausencia de causas especiales, las hipótesis predominantes incluyen:

- Sólo se dan causas comunes.
- El proceso está en un estado de «control estadístico».
- El proceso está saliendo todo lo bien que puede.
- Deben aceptarse las variaciones.
- *No se necesita emprender acciones.* Empezar acciones puede empeorar las cosas (un fenómeno conocido como «perseguir» o «estropear»).

Hay un amplio movimiento que busca mejorar la uniformidad de los procesos, que se opone a las hipótesis precedentes. En algunos procesos no aparecen puntos fuera de los límites del gráfico de control, pero el juego entre variables menores produce algunos defectos.

Por ejemplo, un proceso bajo control estadístico se mejoró a pesar de todo en un grado de magnitud. La mejora la realizó un equipo de mejora multifuncional que identificó y trató algu-

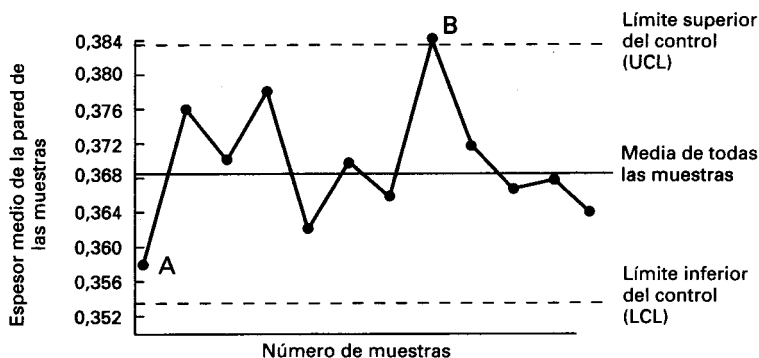


FIGURA 4.10 El gráfico de control de Shewhart («Quality Control», *Leadership for the Quality Century*, Juran Institute, Inc., senior executive workshop, p. 4, Wilton, CT).

nas de las variables menores. Este ejemplo es un desafío a la hipótesis tradicional de que deben aceptarse las variaciones debidas a causas corrientes (Pyzdek 1990).

En otros casos el desafío es más sutil. Una vez más no hay puntos fuera de los límites de control, y además *no se han producido defectos*. Sin embargo, los clientes demandan cada vez mayor uniformidad. Se encuentran ejemplos en los procesos de negocio (precisión en la estimación), así como en la fabricación (uniformidad de productos químicos entre lotes, uniformidad de componentes que van a un ensamblaje en orden aleatorio). Dichas demandas de los clientes van en aumento y fuerzan a los proveedores a emprender proyectos de mejora de la uniformidad de incluso las variables menores del proceso. Existen varios tipos de gráficos de control (véase en el Capítulo 45, «Control estadístico del proceso»), un tratamiento más detallado de esta importante herramienta).

Puntos fuera de los límites del control. El punto B también difiere de la media histórica, pero ésta fuera de los límites del control. Ahora las probabilidades están fuertemente en contra de que esto se deba a causas comunes, más de 20 a 1. De aquí que supongamos que el punto B es el resultado de causas especiales. Tradicionalmente, dichos puntos «fuera de control» se convierten en *candidatos* a una acción correctora.

En teoría, dichos candidatos deberán desencadenar una rápida acción correctora que restaure el *statu quo*. En la práctica, muchos cambios fuera de control no resultan en una acción correctora. El motivo habitual es que los cambios que implican causas especiales son demasiado numerosos y el personal disponible no puede ocuparse de ellos. De aquí que se establezcan prioridades basadas en su trascendencia económica o en otros criterios de importancia. Se emprende una acción correctora en los casos de alta prioridad; el reto debe esperar su turno. Algunos cambios en los niveles inferiores de prioridad deben esperar largo tiempo una acción correctora.

Otro motivo más que impide emprender una acción correctora está en la confusión subyacente entre límites estadísticos de control y tolerancias de calidad. Es fácil dejarse seducir por la belleza y sensibilidad del gráfico de control. Esto ocurrió a gran escala durante los años 1940 y 1950. He aquí dos ejemplos sacados de la experiencia personal de uno de los autores:

- Una gran fábrica de componentes de automoción situó un gráfico de control en cada máquina.
- Una fábrica de hilatura de viscosa creó un «centro de operaciones» con más de 400 gráficos de control.

En virtualmente todos estos casos, los gráficos de control eran mantenidos por los departamentos de calidad pero ignorados por el personal de operaciones. La experiencia con tales excesos ha llevado a directivos y planificadores a ser cautelosos al usar gráficos de control simplemente porque son detectores sensibles de los cambios. En lugar de eso, se deberán justificar los gráficos de control basándose en su valor añadido. Tales justificaciones incluyen:

- Las necesidades de los clientes están directamente implicadas.
- Hay riesgo para la seguridad humana y el medio ambiente.
- Están en juego factores económicos importantes.
- Su precisión añadida es necesaria para el control.

Límites estadísticos de control y tolerancias de calidad. En la mayor parte de la historia humana, las metas de calidad consistieron en las características del producto o en las características del proceso, habitualmente definidas en palabras. El crecimiento de la tecnología estimuló luego el crecimiento de la medida, más una tendencia a definir las metas de calidad en números. Además, surgió el concepto de límites o «tolerancias» en torno a las metas. Por ejemplo:

- Al menos un 95 por ciento de los envíos deberá cumplir con la fecha de entrega programada.
- La longitud de la barra deberá estar dentro de 1 mm del número especificado.

Tales metas de calidad tenían un status oficial. Fueron fijadas por diseñadores de producto o de proceso y publicadas como especificaciones oficiales. Los diseñadores fueron los legisladores oficiales de calidad, los que promulgaron las leyes. El personal operativo era responsable de obedecer las leyes de calidad, de cumplir con las metas y tolerancias especificadas.

Los límites estadísticos de control en forma de gráficos de control fueron virtualmente desconocidos hasta los años cuarenta. En aquella época, esos gráficos carecían de *status* oficial. Eran preparados y publicados por especialistas del Departamento de Calidad. Para la mano de obra de operaciones, los gráficos de control eran un concepto misterioso y extraño. Además, los gráficos de control amenazaban con crear trabajo añadido bajo la forma de acciones correctoras innecesarias. El personal de operaciones razonaba del siguiente modo: Ha sido siempre responsabilidad nuestra emprender acciones correctoras siempre que el producto resultaba no conforme. Estos gráficos de control son tan sensibles que detectan cambios del proceso que no resultan en un producto no conforme. Entonces nos piden que emprendamos acciones correctoras incluso cuando los productos cumplen con las metas y tolerancias de calidad.

De este modo surgió una confusión de responsabilidades. Los especialistas de calidad estaban convencidos de que los gráficos de control proporcionaban útiles señales de aviso temprano que no debían ignorarse. Sin embargo, los departamentos de calidad fallaron en reconocer que la mano de obra de operaciones se enfrentaba ahora a una confusión sobre la responsabilidad. Estas últimas creían que mientras los productos cumplieran con las metas, no había necesidad de acción correctora. La alta dirección entonces no ayudó, no se implicaba en tales asuntos. Dado que los gráficos de control carecían de *status* oficial, la mano de obra de operaciones resolvió el problema ignorando los gráficos. Esto contribuyó al colapso en los años cincuenta del movimiento conocido como «control estadístico de la calidad».

En los años ochenta se suscitó una nueva ola de interés en la aplicación de las herramientas estadísticas al control de la calidad. Numeroso personal operativo se formó en «control estadístico de procesos». Esta formación ayudó a reducir la confusión, pero algo de confusión permanece. Para librarse de ella, los directivos deberán:

- Clarificar la responsabilidad por acciones correctoras cuando hay puntos fuera de los límites de control. ¿Es esta acción obligatoria o discrecional?
- Establecer pautas sobre las acciones que deben emprenderse cuando los puntos están fuera de los límites de control mas el producto todavía cumple con las tolerancias de calidad.

La necesidad de pautas para la toma de decisiones es evidente en la Figura 4.11. Las pautas para los cuadrantes A y C son obvias. Si tanto el proceso como el producto están conformes con sus respectivas metas, el proceso puede continuar rodando. Si ni el proceso ni el producto están conformes con sus respectivas metas, el proceso deberá detenerse y emprenderse acciones correctoras. Las pautas para los cuadrantes B y D son con frecuencia vagas, y esta vaguedad ha sido la fuente de un buen cúmulo de confusión. Si se delega la elección de acción en la fuerza de trabajo, los directivos deberán establecer pautas claras.

Se han hecho numerosos esfuerzos para diseñar los límites del gráfico de control de forma que ayuden al personal operativo a detectar si la calidad del producto amenaza con exceder los límites de calidad del producto [véase un ejemplo reciente en Carr (1989)]. Otro enfoque, basado en la calidad del producto relacionada con los límites de calidad del producto, es «PRE-Control» [véase Juran (1988, pp. 24.31-24.38)].

Autocontrol; controlabilidad. Los trabajadores están en una situación de autocontrol cuando se les ha proporcionado todo lo esencial para hacer un buen trabajo. Lo esencial incluye:

		PRODUCTO	
PROCESO		CONFORME	NO CONFORME
	NO CONFORME	B VAGO	C CLARO
	CONFORME	A CLARO	D VAGO

FIGURA 4.11 Ejemplo de áreas de toma de decisiones (*Making Quality Happen*, Juran Institute, Inc., senior executive workshop, p. F-3, Wilton, CT).

- Medios de conocer cuáles son las metas de calidad.
- Medios de conocer cuáles son sus resultados reales.
- Medios de cambiar sus resultados en el caso de que no estén conformes con las metas. Cumplir con este criterio requiere un proceso operativo que (1) sea inherentemente capaz de alcanzar las metas y (2) posea características que hagan posible que la mano de obra de operaciones ajuste el proceso cuando sea necesario para que esté conforme con las metas.

Estos criterios de autocontrol son aplicables a los procesos en todas las funciones y a todos los niveles, desde el director general al trabajador corriente.

Les resulta demasiado fácil a los directivos dictaminar que los criterios anteriores se han cumplido. En la práctica, existen muchos detalles que deben comprobarse antes de poder cumplir los criterios. El carácter de estos detalles es evidente en las listas de comprobación que se han preparado para procesos específicos, de modo que aseguren el cumplimiento de los criterios de autocontrol. Ejemplos de estas listas de comprobación incluyen las diseñadas para los diseñadores de producto, para los trabajadores de producción y para el personal administrativo y de apoyo. Ejemplos de estas listas de comprobación se pueden encontrar consultando el índice de materias de este manual.

Si se han cumplido todos los criterios de autocontrol a nivel de los trabajadores, cualquier no conformidad de producto resultante se considerará *controlable por el trabajador*. Si no se ha cumplido alguno de los criterios de autocontrol, entonces la planificación de la gestión ha sido incompleta, la planificación no ha proporcionado los medios para desarrollar las actividades dentro del bucle de realimentación. Los productos no conformes resultantes de tan deficiente planificación se considerarán *controlables por la directiva*. En dichos casos es arriesgado para los directivos sostener que los trabajadores son responsables de la calidad.

La responsabilidad de los resultados deberá, por supuesto, armonizarse con la controlabilidad. Sin embargo, en el pasado muchos directivos no eran conscientes de la extensión de la controlabilidad tal como prevalecía a nivel de trabajador. Los estudios dirigidos por Juran durante los años treinta y cuarenta mostraron que, a nivel de trabajador, la proporción entre no

conformidades controlables por la directiva y las controlables por el trabajador era del orden de 80 a 20. Estos hallazgos fueron confirmados por otros estudios durante los años cincuenta y sesenta. Esta relación de 80 a 20 ayuda a explicar el fallo de tantos esfuerzos por resolver los problemas de calidad de las empresas solamente motivando a la fuerza de trabajo.

Efecto sobre la decisión de conformidad del proceso. En teoría, la decisión de si el proceso está conforme con las metas de calidad del proceso debería tomarla la fuerza de trabajo. No hay bucle de realimentación más corto. En muchos procesos ésta es la disposición real. En otros casos, la decisión de conformidad del proceso se asigna a personal no operativo, comprobadores o inspectores independientes. Los motivos son:

- El trabajador no está en situación de autocontrol.
- El proceso es crítico para la seguridad humana o el medio ambiente.
- La calidad no tiene la máxima prioridad.
- Existe una falta de confianza mutua entre los directivos y la fuerza de trabajo.

CONFORMIDAD DEL PRODUCTO; ADECUACIÓN AL USO

Existen dos niveles de características del producto que sirven propósitos diferentes. Uno de estos niveles sirve a propósitos de este tipo:

- Satisfacer las necesidades de los clientes.
- Proteger la seguridad humana.
- Proteger el medio ambiente.

Se dice que las características del producto poseen «adecuación al uso» si son capaces de servir los propósitos anteriores. El segundo nivel de características del producto sirve a propósitos de este tipo para:

- Proporcionar criterios de trabajo a quienes carecen de conocimientos sobre la adecuación al uso.
- Crear un ambiente de ley y orden.
- Proteger a los inocentes de reproches injustificados.

Dichas características del producto están normalmente contenidas en especificaciones internas, procedimientos, normas, etc. De las características del producto que sirven a la segunda lista de propósitos se dice que poseen *conformidad con las especificaciones*, etc. Nosotros usaremos el nombre más breve de «conformidad».

La presencia de dos niveles de características del producto da como resultado dos niveles de toma de decisiones: ¿Resulta conforme el producto? La Figura 4.12 muestra la interrelación de estas decisiones en el diagrama de flujo.

La decisión de conformidad del producto. Según las políticas prevalecientes, los productos que están conformes con las especificaciones se envían al destino siguiente o al cliente. La hipótesis es que el producto que está conforme con las especificaciones es también adecuado al uso. Esta hipótesis es válida en la gran mayoría de los casos.

La combinación de grandes cantidades de características del producto, cuando se multiplica por grandes cantidades de productos, crea grandes cantidades de decisiones a tomar sobre conformidad del producto. Idealmente, estas decisiones deberán delegarse en los niveles inferiores de la organización, en los dispositivos automáticos y en operaciones de la fuerza de trabajo. La delegación de estas decisiones en la fuerza de trabajo da lugar a lo que se llama «autoinspección».

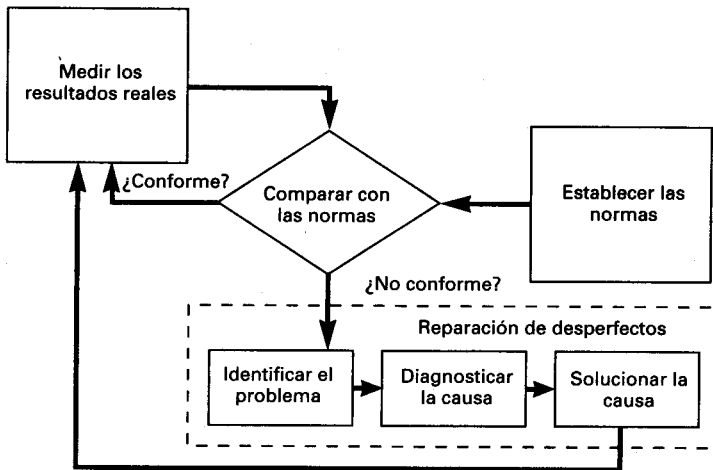


FIGURA 4.12 Diagrama de flujo de las decisiones sobre conformidad y adecuación al uso.

Autoinspección. Definimos la «autoinspección» como una situación en la que las decisiones sobre el *producto* se delegan en la fuerza de trabajo. Las decisiones delegadas consisten principalmente en ¿Qué calidad de producto está conforme con las metas de calidad? ¿Qué disposición hay que tomar con el producto?

Observe que la autoinspección es muy diferente del autocontrol, que implica decisiones sobre el *proceso*.

Las ventajas de la autoinspección son considerables:

- El bucle de realimentación es más breve; la realimentación va a menudo directamente al actuador, el que inicia la acción correctora.
- La autoinspección ensancha la tarea de la mano de obra de operaciones, le confiere una mayor sensación de ser el propietario de la tarea.
- La autoinspección elimina el ambiente policiaco creado con el uso de inspectores, comprobadores, etc.

Sin embargo, el uso de la autoinspección requiere cumplir con varios criterios esenciales:

- *La calidad es el número uno.* La calidad debe tener, sin sombra de duda, la máxima prioridad.
- *Confianza mutua.* Los directivos deben tener la suficiente confianza en la mano de obra de operaciones como para estar bien dispuestos a hacer la delegación, y la mano de obra de operaciones debe tener la suficiente confianza en los directivos como para estar bien dispuesta a aceptar la delegación.
- *Autocontrol.* Deberían darse las condiciones de autocontrol para que la mano de obra de operaciones tenga todos los medios necesarios para hacer un buen trabajo.
- *Formación.* Se deberá formar a los trabajadores en la toma de decisiones de conformidad del producto.
- *Certificación.* La tendencia reciente es incluir un procedimiento de certificación. Los trabajadores candidatos a la autoinspección se someten a un examen para asegurarse de que están calificados para tomar buenas decisiones. Los candidatos con éxito son certificados y pueden ser sometidos en adelante a una auditoría de decisiones. Se encuentran ejemplos en Nowak (1991, Military Airlift Command) y Pearl (1988, Corning Glass Works).

En muchas empresas no se cumplen totalmente estos criterios, especialmente el criterio de prioridad. Si algún parámetro distinto de la calidad tiene máxima prioridad, existe un riesgo real de que esté sesgada la evaluación de la conformidad del producto. Este problema ocurre frecuentemente cuando las metas de resultados del personal están en conflicto con las metas globales de calidad. Por ejemplo, una empresa química descubrió que estaba recompensando al personal de ventas sobre objetivos de beneficios, sin tener en cuenta la disponibilidad del producto o incluso el lucro producido. El personal de ventas estaba cumpliendo todas sus metas, pero la empresa tenía dificultades.

La decisión de adecuación al uso. La gran mayoría de productos está conforme con las especificaciones. Para los productos que no están conformes surge una pregunta nueva: ¿Es el producto no conforme, a pesar de todo, adecuado al uso?

Para tomar esta decisión sobre una buena base se requiere contestar a preguntas como las siguientes:

- ¿Quién será el usuario o usuarios?
- ¿Cómo se utilizará este producto?
- ¿Existen riesgos para la integridad estructural, la seguridad humana o el medio ambiente?
- ¿Cuál es la urgencia de la entrega?
- ¿Cómo afectan las alternativas a la economía del productor y del usuario?

Contestar dichas preguntas puede suponer un esfuerzo considerable. Las empresas han tratado de minimizar el esfuerzo mediante pautas de procedimiento. Los métodos usados incluyen:

- *Tratar todos los productos no conformes como inadecuados para el uso.* Este planteamiento se usa habitualmente para productos que plantean riesgos para la seguridad humana o el medio ambiente, productos como los farmacéuticos o la energía nuclear.
- *Crear un mecanismo para la toma de decisiones.* Un ejemplo lo tenemos en el Comité de Revisión de Materiales, tan extensamente usado en el sector de defensa. Este dispositivo es práctico para materias de importancia, pero es demasiado elaborado para los casos más numerosos en que poco está en juego.
- *Crear un sistema de delegación múltiple.* Según dicho sistema, se reservan las «pocas decisiones vitales» a un organismo formal de toma de decisiones tal como el Comité de Revisión de Materiales. El resto se delega en otras personas.

La Tabla 4.3 es un ejemplo de tabla de delegación usada por una empresa concreta. (Comunicación personal a uno de los autores).

Para más información sobre la decisión de adecuación al uso, véase Juran (1988, pp. 18.32-18.36).

Destino del producto no adecuado. El destino del producto inadecuado puede ser de varias maneras: chatarra, separación, reparación, devolución al proveedor, venta con descuento, etc. Los costes internos se pueden estimar para que lleguen a un óptimo económico. Sin embargo, los efectos van más allá del dinero: programas alterados, personas recriminadas, etc. Para minimizar el desgaste humano resultante, algunas empresas han establecido reglas de conducta tales como:

- Elegir la alternativa que minimice las pérdidas totales de todas las partes implicadas. Entonces habrá menos sobre lo que discutir y será más fácil ponerse de acuerdo en cómo compartir las pérdidas.
- Evitar la búsqueda de un culpable. En lugar de eso, tratar la pérdida como una oportunidad para mejorar la calidad.
- Usar muy pocas veces los «chivos expiatorios». Cargar las pocas pérdidas vitales a los departamentos responsables es válido desde una perspectiva contable. Sin embargo, cuando se aplica a las numerosas pérdidas menores, es con frecuencia antieconómico a la vez que pernicioso para los esfuerzos de mejora de la calidad.

TABLA 4.3 Delegaciones múltiples de la toma de decisiones sobre adecuación al uso*

El efecto de no conformidad afecta a	Cantidad de producto o de dinero que está en juego	
	Pequeña	Grande
La economía interna solamente	Jefe de departamento implicado directamente, ingeniero de calidad.	Directivos de planta implicados, director de calidad.
Las relaciones económicas con el proveedor	Proveedor, agente de compras, ingeniero de calidad.	Proveedor, directivo.
Las relaciones económicas con el cliente	Cliente, vendedor, ingeniero de calidad.	Cliente: con Marketing, Fabricación, Departamento Técnico, Calidad.
El rendimiento del producto en operación	Diseñador del producto, vendedor, ingeniero de calidad.	Cliente: directores de Marketing, Fabricación, Técnico, de Calidad.
Riesgo de daño a la sociedad o de no conformidad con regulaciones gubernamentales	Director de diseño de productos, responsable de conformidad, abogado, directivos de calidad.	Director general y equipo de alta dirección.

* En aquellos sectores cuya misión de calidad es realmente de conformidad con las especificaciones (por ejemplo, energía atómica, espacio), el que realmente toma la decisión de adecuación al uso es el cliente o el legislador gubernamental.

El fallo en el uso de productos que satisfagan las necesidades de los clientes es un desperdicio. Enviar productos que no satisfagan las necesidades de los clientes es peor. El personal asignado a tomar decisiones de conformidad del producto deberá estar provisto de definiciones claras de responsabilidad, así como de pautas para la toma de decisiones. Los directivos deberán asegurar, como parte de su auditoría, que el proceso de la toma de decisiones de conformidad del producto es apropiado a las necesidades de la empresa.

Acción correctora. El último paso para cerrar el bucle de realimentación es provocar un cambio que restituya la conformidad con las metas de calidad. Este paso es popularmente conocido como «eliminación de problemas» o «apagafuegos».

Advierta que el término «acción correctora» se ha venido aplicando imprecisamente a dos situaciones muy diferentes, como se muestra en la Figura 4.1. El bucle de realimentación está bien diseñado para eliminar la no conformidad *esporádica* como la del «pico» en la Figura 4.1; el bucle de realimentación *no* está bien diseñado para tratar con el área de desperdicios crónico en la figura. En vez de eso, se necesita emplear el proceso de mejora de la calidad del Capítulo 5.

Utilizaremos el término «acción correctora» en el sentido de eliminación de problemas, eliminación de no conformidades esporádicas.

La acción correctora requiere las fases del diagnóstico y de la solución. Estas fases son más sencillas que para la mejora de la calidad. Los problemas esporádicos son el resultado de un cambio adverso, de forma que la fase del diagnóstico intenta descubrir lo que ha cambiado. La fase de la solución intenta eliminar el cambio adverso y restituir la conformidad.

Diagnóstico de cambios esporádicos. Durante el transcurso del diagnóstico el enfoque está en «¿Qué ha cambiado?». Algunas veces las causas no son obvias, de modo que el principal obstáculo para la acción correctora reside en el diagnóstico. El diagnóstico utiliza métodos y herramientas como las siguientes:

- *Autopsias* para determinar con precisión los síntomas que manifiestan el producto y el proceso.
- *Comparación entre productos* elaborados antes y después de que los problemas empezaran, para ver lo que ha cambiado; también, comparación entre buenos y malos productos realizados desde que empezaron los problemas.
- *Comparación entre datos del proceso* antes y después de que los problemas empezaran, para ver qué condiciones del proceso han cambiado.
- *Reconstrucción de la cronología*, que consiste en listar en una escala temporal (de horas, días, etc.): (1) los sucesos que tuvieron lugar en el proceso antes y después del cambio esporádico, es decir, rotación de turnos, empleados nuevos en la tarea, acciones de mantenimiento, etc., y (2) la información del producto relacionada con el tiempo, es decir, códigos de fechas, duración del ciclo de proceso, tiempo de espera, fechas de movimientos, etc.

El análisis de los datos resultantes arroja normalmente mucha luz sobre la validez de las distintas teorías sobre las causas. Se refutan ciertas teorías. Otras teorías sobreviven para ser sometidas a nuevas pruebas.

El personal de operaciones que carezca de la formación necesaria para ejecutar dichos diagnósticos puede verse forzado a parar el proceso y a solicitar ayuda de especialistas, del departamento de mantenimiento, etc. También pueden continuar el proceso «como si» para cumplir con la programación y así arriesgarse a fallar en el cumplimiento de las metas de calidad.

Acción correctora: solución. Una vez conocida la causa del cambio esporádico, lo peor ha pasado. La mayor parte de las soluciones consiste en volver a lo que se hacía anteriormente. Esto es regreso a lo familiar, no un viaje a lo desconocido (como ocurre en el caso de los problemas crónicos). El personal local es normalmente capaz de emprender las acciones necesarias para restablecer el *statu quo*.

Los diseños de procesos deberán proporcionar medios para ajustar el proceso como se requiere para alcanzar la conformidad con las metas de calidad. Se necesitan dichos ajustes en el arranque y durante el transcurso del proceso. Este aspecto del diseño para controlar el proceso deberá sobre el papel cumplir los siguientes criterios:

- Deberá existir una relación conocida entre las variables del proceso y los resultados del producto.
- Se deberán proporcionar medios para un ajuste rápido del proceso para las variables clave del proceso.
- Deberá existir una relación predecible entre el valor de cambio en los ajustes del proceso y el valor de los efectos sobre las características del producto.

Si no se cumplen dichos criterios, el personal de operaciones se verá forzado, en un momento dado, a hacer pruebas para llevar a cabo una acción correctora. La frustración resultante se convertirá en un «desincentivo» para dar alta prioridad a la calidad. Burgam (1985) descubrió que:

En una fundición, el diseño del proceso automático para controlar la cantidad de metal a verter falló y no proporcionó la regulación adecuada. Los trabajadores entonces trabajaron sobre seguro vertiendo por exceso, ya que los moldes con defecto de metal tenían que desecharse. El resultado fue un gran despilfarro hasta que una nueva tecnología solucionó el problema.

Algunas empresas proporcionan procedimientos sistemáticos para solucionar los cambios esporádicos. Véanse, por ejemplo, Sandorf y Bassett (1993).

Para más opiniones sobre eliminación de problemas, véase el Capítulo 22.

EL PAPEL DE LOS MÉTODOS ESTADÍSTICOS

Una actividad esencial del bucle de realimentación es la recogida y análisis de los datos. Esta actividad forma parte de la disciplina científica conocida como «estadística». A los métodos y herramientas usados se les llama frecuentemente «métodos estadísticos». Estos métodos se han utilizado durante largo tiempo para ayudar en la recogida y análisis de los datos en muchos campos: biología, gobierno, economía, finanzas, gestión, etc. El Capítulo 44 trata en profundidad de los métodos estadísticos básicos, mientras que el Capítulo 4 tiene una buena discusión de estos métodos usados en el control estadístico del proceso.

Durante este siglo han ocurrido muchas cosas en la aplicación de la metodología estadística a los problemas orientados a la calidad. En esto se incluye el desarrollo de herramientas especiales como el gráfico de control de Shewhart. Una primera ola de tal aplicación tuvo lugar durante los años 1920, especialmente dentro de Bell Systems. Una segunda y más amplia ola se generó durante los años 1940 y 1950. Se conoció como control estadístico de la calidad. Una tercera ola, todavía más amplia, surgió durante los años 1980 y fue extensamente conocida como control estadístico del proceso. Se trata de esto en el Capítulo 45.

Control Estadístico del Proceso (CEP o SPC). El término tiene múltiples significados, pero en la mayoría de las empresas se considera que incluye la recogida básica de datos; el análisis mediante herramientas como distribuciones de frecuencia, principio de Pareto, diagrama de Ishikawa (espina), gráfico de control de Shewhart, etc., y la aplicación del concepto de capacidad del proceso.

Herramientas avanzadas, tales como el diseño de experimentos y análisis de varianza (véase el Capítulo 47), son parte de los métodos estadísticos, pero normalmente no se consideran parte del control estadístico de procesos.

Sus ventajas. Estos métodos y herramientas estadísticos han contribuido de forma importante al control de calidad y también a los otros procesos de la trilogía de Juran, mejora de la calidad y planificación de la calidad. Para algunos tipos de problemas de la calidad, las herramientas estadísticas son más que útiles, los problemas no podrían resolverse en absoluto sin usar las herramientas estadísticas apropiadas.

El movimiento por el SPC ha tenido éxito en la formación en herramientas estadísticas básicas de un buen número de supervisores y trabajadores. El aumento resultante en conocimientos estadísticos ha hecho posible que mejorara su comprensión del comportamiento de los procesos y de los productos. Además, muchos han aprendido que las decisiones basadas en la recogida y análisis de los datos dan resultados superiores.

Sus riesgos. Existe un peligro al asumir un enfoque de la calidad orientado a las herramientas en vez de un enfoque orientado a los problemas u orientado a los resultados. Durante los años 1950 esta preocupación se hizo tan extensiva que todo el movimiento de control estadístico de la calidad se colapsó; la palabra «estadística» tuvo que ser eliminada de los nombres de los departamentos.

La secuencia correcta de la gestión es establecer primero las metas y luego planificar cómo alcanzar dichas metas, incluyendo la elección de las herramientas apropiadas. De forma similar, al resolver los problemas, sean amenazas u oportunidades, los directivos experimentados empiezan por identificar primero los problemas. Luego intentan resolver estos problemas por varios medios, incluyendo la elección de las herramientas apropiadas.

Durante los años 1980 numerosas empresas intentaron, de hecho, un enfoque orientado a las herramientas al formar gran cantidad de su personal en el uso de las herramientas estadísticas. Sin embargo, no se dio un efecto significativo en el «resultado total». La razón estriba en que no se había creado una infraestructura para identificar qué proyectos asumir, para asig-

nar una responsabilidad clara en la asunción de dichos proyectos, para proporcionar los recursos necesarios, para revisar el progreso, etc.

Los directivos deberán asegurarse de que la formación en métodos estadísticos no se convierte en un fin en sí mismo. Una forma de asegurarse de ello es mediante las medidas del progreso. Estas medidas deberán diseñarse para evaluar el efecto sobre las operaciones, tales como la mejora de la satisfacción del cliente o en el rendimiento del producto, la reducción en el coste de la mala calidad, etc. El número de cursos realizados o el número de personas formadas *no* evalúan el efecto sobre las operaciones, por lo que deberán considerarse como medidas de carácter subsidiario.

Información para tomar decisiones. El control de calidad requiere una amplia toma de decisiones. Estas decisiones abarcan una gran variedad de temas y tienen lugar a todos los niveles de la jerarquía. La planificación del control de calidad deberá proporcionar una red de información que pueda servir a todos los que toman las decisiones. En algunos niveles de la jerarquía existe una necesidad importante de información en tiempo real que permita una pronta detección y corrección de las no conformidades con las metas. En otros niveles, el énfasis está en resúmenes que hagan posible a los directivos ejercer el control sobre los pocos temas vitales de control (véanse Capítulos 9 y 34). Además, la red deberá proporcionar información según sea necesaria para detectar las tendencias principales, identificar las amenazas y oportunidades, y evaluar el rendimiento de las unidades y personal de la organización.

En algunas empresas, el sistema de información de la calidad se diseña para ir más allá del control de las características del producto y de las características del proceso; el sistema se usa también para controlar el rendimiento de la calidad de las organizaciones e individuos, tales como departamentos y jefes de departamentos. Por ejemplo, muchas empresas preparan y hacen públicas regularmente tablas de puntuaciones que muestran datos resumidos de rendimiento de la calidad en varias áreas del mercado, líneas de producción, funciones operativas, etc. Estos datos de rendimiento se usan a menudo como indicadores del rendimiento de la calidad del personal a su cargo.

Proporcionar información que sirva a todos estos objetivos requiere una planificación dirigida específicamente al sistema de información. Dicha planificación la realiza mejor un equipo multifuncional cuya misión se centre en el sistema de información de la calidad. Este equipo incluye, como es debido, tanto a los clientes como a los proveedores de la información. La auditoría de gestión del sistema de control de calidad deberá incluir el aseguramiento de que el sistema de información de la calidad cumple con las necesidades de los distintos clientes. (Para una información adicional sobre el sistema de información de la calidad, véase el Capítulo 9, «Medición, información y toma de decisiones»).

EL MANUAL DEL CONTROL DE CALIDAD

Una gran parte de la planificación de la calidad se hace mediante «procedimientos», que son en realidad planes de uso repetitivo. Dichos procedimientos son pensados, redactados y aprobados formalmente. Una vez hechos públicos, se convierten en las formas autorizadas de llevar a cabo los asuntos de la empresa. Es muy normal que los procedimientos relativos a la gestión de la calidad se editen de forma conjunta en un «manual de calidad» (o título similar). Una parte importante del manual tiene relación con el control de calidad.

Los manuales de calidad aumentan la utilidad de los procedimientos de varios modos:

- *Legitimidad.* Los manuales son aprobados en los niveles superiores de la organización.
- *Fácilmente localizables.* Los procedimientos están reunidos en una fuente de referencia bien conocida y no diseminados entre memorandos, acuerdos verbales, informes, actas, etc.
- *Estables.* Los procedimientos sobreviven a pesar de los lapsos en la memoria o la rotación de trabajadores.

El estudio de los manuales de calidad de las empresas muestra que la mayoría de ellos tiene un contenido central que es muy similar entre unas empresas y otras. Con relación al control de calidad, este contenido central incluye procedimientos para:

- Aplicación del bucle de realimentación al control de procesos y de productos.
- Garantía de que los procesos operativos son capaces de cumplir con las metas de calidad.
- Mantenimiento del equipamiento y calibración de los instrumentos de medida.
- Relaciones con los proveedores en asuntos de calidad.
- Recogida y análisis de los datos requeridos para el sistema de información de la calidad.
- Formación del personal para ejecutar las resoluciones del manual.
- Auditoría para asegurar la adhesión a los procedimientos.

La necesidad de sistemas de control de calidad de uso repetitivo ha llevado a la elaboración de normas a nivel sectorial, nacional e internacional. [Para más información sobre esto, véase el Capítulo 11, «La familia de normas internacionales ISO 9000». Para ver un ejemplo del desarrollo de procedimientos de normas operativas, incluido el uso de videocasetes, véase Murphy y McNealey (1990)]. La participación de la fuerza de trabajo durante la preparación de los procedimientos ayuda a conseguir que se sigan los procedimientos [véase, con relación a esto, Gass (1993)].

Formato de los manuales de calidad. Aquí, una vez más, encontramos muchas coincidencias. Las secciones generales del manual incluyen:

1. Una declaración oficial del director general. Incluye la firma que confiere legitimidad.
2. El objetivo del manual y cómo usarlo.
3. Las políticas de calidad de la empresa (o de la división) pertinentes.
4. Los organigramas y cuadros de responsabilidad relacionados con la función de calidad.
5. Medidas para auditar el rendimiento según los mandatos del manual.

Las secciones adicionales del manual tratan de las aplicaciones a los departamentos funcionales, los productos y procesos tecnológicos, los procesos empresariales, etc. Para mayor detalle, véase Juran (1988, pp. 6.40-6.47).

Los directivos pueden influir sobre la adecuación del manual de control de calidad de varias formas:

- Participando en la definición de los criterios que debe cumplir el manual.
- Aprobando el borrador final del manual para hacerlo oficial.
- Auditando periódicamente la puesta al día del manual, así como la conformidad con el manual.

CONTROL MEDIANTE EL SISTEMA DE RECOMPENSAS

Una influencia importante sobre el control de calidad es el énfasis en la calidad del sistema de recompensas en relación con otros parámetros. Este aspecto del control de calidad se debate a lo largo del Capítulo 15. Véase también el Capítulo 40, bajo Motivación, reconocimiento y recompensa.

PROVISIÓN DE AUDITORÍAS

La experiencia enseña que los sistemas de control están sujetos a «deslices» de todas clases. La rotación del personal puede dar como resultado una pérdida de conocimientos esenciales.

La aparición de cambios no anticipados puede dar como resultado la obsolescencia. Las soluciones rápidas y el mal uso pueden socavar gradualmente el sistema hasta el punto de que ya no sea efectivo.

La principal herramienta para prevenir contra el deterioro de un sistema de control ha sido la auditoría. Bajo el concepto de auditoría se establece una revisión periódica independiente que proporcione las respuestas a las siguientes preguntas: ¿El sistema de control es todavía adecuado a la tarea? ¿Se está siguiendo el sistema?

Las respuestas son obviamente útiles para los directores de operaciones. Sin embargo, este no es el único propósito de la auditoría. Otro propósito es proporcionar esas respuestas a personas que, aunque no directamente implicadas en las operaciones, necesitan, no obstante, saberlas. Si la calidad ha de tener prioridad máxima, entre los que necesitan saber está la alta dirección.

En consecuencia, una de las responsabilidades de los directivos es ordenar que se realice una auditoría periódica del sistema de control de calidad.

CONTROL DE CALIDAD: ¿QUÉ NOVEDADES HAY?

Las últimas décadas han sido testigo de una tendencia creciente a mejorar la eficacia del control de calidad por medio de la adopción formal de conceptos, metodologías y herramientas modernos. Entre ellos están:

- Planificación sistemática del control de calidad con participación extensiva del personal de operaciones.
- Aplicación formal del bucle de realimentación y establecimiento de una responsabilidad clara sobre las decisiones y acciones asociadas.
- Delegación de las decisiones en la fuerza del trabajo mediante el autocontrol y la autoinspección.
- Amplia aplicación del control estadístico de procesos y de la formación del personal de operaciones asociada a ella.
- Red de información estructurada para proporcionar una base de hechos para la toma de decisiones.
- Proceso sistemático para acciones correctoras en el caso de un cambio esporádico adverso.
- Manuales formales de control de calidad de la empresa, con auditorías periódicas que aseguren su actualización y su conformidad.

RESUMEN

El proceso de control de calidad es un proceso de gestión universal para realizar operaciones proporcionándoles estabilidad, para prevenir un cambio adverso y para «mantener el *statu quo*». El control de calidad se lleva a cabo mediante el uso del bucle de realimentación. Cada característica del proceso o del producto se convierte en un *objeto de control*, es decir, un centro alrededor del cual se construye un bucle de realimentación. El control humano, tanto como sea posible, deberá ser hecho por la fuerza de trabajo: los empleados administrativos, los trabajadores de fábrica, el personal de ventas, etc. El diagrama de flujo se usa extensamente durante la planificación de los controles de calidad. El eslabón más débil en el control del equipamiento ha sido el respeto a la programación. Asegurarse de que se atiene estrictamente a la programación requiere una auditoría independiente. Saber qué variable del proceso es dominante ayuda a los planificadores durante la asignación de recursos y de prioridades. El trabajo

de los planificadores se resume normalmente en una hoja de control. Estas hojas constituyen una importante herramienta de planificación.

La pregunta «¿Quién es responsable de la calidad?» por naturaleza no tiene repuesta. Sin embargo, si la pregunta se replantea en términos de decisiones y acciones, se abre un camino para un acuerdo sobre las respuestas. El diseño del control del proceso deberá proporcionar las herramientas necesarias que ayuden a las fuerzas de operaciones a distinguir entre cambios reales y falsas alarmas. Es deseable proporcionar a los árbitros herramientas que les ayuden a distinguir entre causas especiales y causas comunes. Una herramienta atractiva para este objetivo es el gráfico de control de Shewhart (o simplemente gráfico de control). Los criterios de autocontrol son aplicables a los procesos en todas las funciones y a todos los niveles, desde el director general al trabajador de base. La responsabilidad por los resultados deberá ligarse a la controlabilidad. Idealmente, la decisión de si el proceso está conforme con las metas de calidad deberán hacerla los trabajadores. No hay bucle de realimentación más corto.

Para hacer uso de la autoinspección se requiere cumplir varios criterios esenciales: la calidad es el número uno; confianza mutua, autocontrol, formación y certificación son los otros. Se deberá proporcionar al personal asignado a la toma de decisiones de conformidad del producto, definiciones claras de la responsabilidad, así como pautas para la toma de decisiones. La secuencia correcta en la gestión es establecer primero las metas y luego planificar cómo cumplir con esas metas, incluyendo la elección de las herramientas apropiadas. La planificación del control de calidad deberá proporcionar una red de información que pueda servir a todos los que toman las decisiones.

TAREAS PARA LOS DIRECTIVOS

Los directivos deberán evitar implicarse en profundidad en la toma de decisiones sobre control de calidad. Deberán tomar las pocas decisiones vitales, proporcionar los criterios para distinguir las pocas vitales del resto y delegar el resto bajo un proceso de toma de decisiones.

Para eliminar la confusión relativa a los límites del control y la tolerancia de calidad del producto, los directivos deberán clarificar la responsabilidad para tomar acciones correctoras fuera de los límites del control y establecer pautas de acción a tomar cuando los puntos estén fuera de los límites del control, pero el producto todavía cumpla con las tolerancias de calidad.

Los directivos deberán, como parte de su auditoría, asegurar que los procesos de toma de decisiones sobre conformidad del producto son adecuados a las necesidades de la empresa. Deberán también asegurar que la formación en las herramientas estadísticas no se convierte en un fin en sí mismo. La auditoría que haga la dirección del sistema del control de calidad deberá incluir el aseguramiento de que el sistema de información de la calidad cumple con las necesidades de los distintos clientes.

Los directivos tienen la posibilidad de influir sobre la adecuación del manual de control de calidad de varios modos: participando en la definición de criterios a cumplir, aprobando el borrador final para hacerlo oficial y auditando periódicamente la puesta al día del manual, así como la conformidad con el manual.

REFERENCIAS

- Burgam, Patrick M. (1985). «Application: Reducing Foundry Waste». *Manufacturing Engineering*, March.
- Bylinsky, Gene (1991). «How Companies Spy on Employees». *Fortune*, November, pp. 131-140.
- Carr, Wendell E. (1989). «Modified Control Limits». *Quality Progress*, January, pp. 44-48.
- Deming, W. Edwards (1986). *Out of the Crisis*, MIT Center for Advanced Engineering Study. Cambridge, MA.

- Deming, W. Edwards (1950). *Elementary Principles of the Statistical Control of Quality*, Nippon Kagaku Gijutsu Renmei (Japanese Union of Scientists and Engineers), Tokyo.
- Duyck, T. O. (1989). «Product Control Through Process Control and Process Design». *1989 ASQC Quality Congress Transactions*, pp. 676-681.
- Gass, Kenneth C. (1993). «Getting the Most Out of Procedures». *Quality Engineering*, June.
- Goble, Joann (1987). «A Systematic Approach to Implementing SPC» *1987 ASQC Quality Congress Transactions*, pp. 154-164.
- Juran, J. M. (1992). *Juran on Quality by Design*, The Free Press, A Division of Macmillan, Inc., New York.
- Juran, J. M., ed. (1988). *Juran's Quality Control Handbook*, McGraw-Hill, New York.
- Juran, J. M. (1964). *Managerial Breakthrough*, McGraw-Hill, New York.
- Koura, Kozo (1991). «Deming Cycle to Management Cycle». *Societas Qualitas*, Japanese Union of Scientists and Engineers, Tokyo, May-June.
- Lenahan, Michael (1982). «The Quality of the Instrument, Building Steinway Grand Piano K 2571». *The Atlantic Monthly*, August, pp. 32-58.
- Murphy, Robert W., and McNealey, James E. (1990). «A Technique for Developing Standard Operating Procedures to Provide Consistent Quality». *1990 Juran IMPRO Conference Proceedings*, pp. 3D1-3D6.
- Nowlan, F. Stanley, and Heap, Howard F. *Reliability Centered Maintenance*. Catalog number ADA 066579, National Technical Information Service, Springfield, Va.
- Nowak, Major General John M. (1991). «Transitioning from Correction to Prevention». *1991 Juran IMPRO Conference*, pp. 1-15/1-20.
- Pearl, Daniel H. (1988). «Operator Owned SPC, How to Get it and Keep It». *1988 ASQC Congress Transactions*, pp. 817-821.
- Pyzdek, Thomas (1990). «There's No Such Thing as a Common Cause». *ASQC Quality Congress Transactions*, pp. 102-108.
- Radford, G. S. (1922). *The Control of Quality of Manufacturing*, Ronald Press Company, New York.
- Radford, G. S. (1917). «The Control of Quality». *Industrial Management*, vol. 54, p. 100.
- Radman, Miroslav, and Wagner, Robert (1988). «The High Fidelity of DNA Duplication». *Scientific American*, August, pp. 40-46.
- Sandorf, John P., and Bassett, A. Thomas III (1993). «The OCAP: Predetermined Responses to Out-of-Control Conditions». *Quality Progress*, May, pp. 91-95.
- Shainin, Dorian, and Shainin, Peter D. (1988). «PRE-Control». *Juran's Quality Control Handbook*, 4th ed., McGraw-Hill, New York.
- Siff, Walter C. (1984). «The Strategic Plan of Control—A Tool For Participative Management». *1984 ASQC Quality Congress Transactions*, pp. 384-390.
- Shewhart, W. A. (1931). *Economic Control of Quality of Manufactured Product*, Van Nostrand, New York, 1931. Reprinted by ASQC, Milwaukee, 1980.
- Umscheid, Thomas E. (1991). «Production Monitoring Enhances SPC». *Quality Progress*, December, pp. 58-61.
- White, Joseph B. (1988). «Auto Mechanics Struggle to Cope With Technology in Today's Cars. *The Wall Street Journal*, July 26, p. 37.

Capítulo 5

EL PROCESO DE MEJORA DE LA CALIDAD¹

J. M. Juran

EL PROPÓSITO DE ESTE CAPÍTULO	5.4	La mejora de la calidad se extiende a todos los parámetros	5.11
¿QUÉ ES MEJORA?	5.4	La acumulación de proyectos de mejora es enorme	5.11
Dos clases de cambio beneficioso	5.4	La mejora de la calidad no resulta gratis	5.12
Desarrollo estructurado del producto	5.5	La reducción del desperdicio crónico no requiere inversiones de capital	5.12
Reducción no estructurada del desperdicio crónico	5.5	El retorno sobre la inversión está entre los más altos	5.12
EL CRECIMIENTO DEL DESPERDICIO CRÓNICO	5.6	Las mayores ganancias proceden de los pocos proyectos vitales ..	5.12
LAS INICIATIVAS DE LOS AÑOS OCHENTA	5.6	MEJORA DE LA CALIDAD: ALGUNOS INHIBIDORES	5.13
Lecciones aprendidas	5.6	Desilusión con los fallos	5.13
El ritmo de mejora es decisivo ..	5.7	«Calidad más alta cuesta más» ..	5.13
LA PREVISIÓN PARA EL SIGLO XXI	5.8	La apariencia de la delegación ..	5.13
El consenso emergente	5.8	Recelos de los empleados	5.13
EL RESTO DE ESTE CAPÍTULO ...	5.9	ASEGURAR LA APROBACIÓN Y PARTICIPACIÓN DE LA ALTA DIRECCIÓN	5.14
MEJORA DE LA CALIDAD: LOS CONCEPTOS BÁSICOS	5.9	Concienciación: Prueba de la necesidad	5.14
Mejora diferenciada de control ..	5.9	El volumen del desperdicio crónico	5.15
Toda mejora tiene lugar proyecto a proyecto	5.9	El retorno potencial sobre la inversión	5.15
La mejora de la calidad es universalmente aplicable	5.10		

¹ En la cuarta edición, el capítulo sobre mejora de la calidad fue preparado por Frank M. Gryna.

Uso de proyectos modelo	5.16	Propósito de las declaraciones de misión	5.34
Obtención de las cifras de costes	5.16	Las metas numéricas	5.34
Lenguajes en la jerarquía	5.17	La perfección como meta	5.34
Presentaciones a la alta dirección	5.18	Publicación de las declaraciones de misión	5.35
MOVILIZAR PARA LA MEJORA DE CALIDAD	5.19	Revisión de las declaraciones de misión	5.35
La necesidad de estructura formal	5.19	EL EQUIPO DEL PROYECTO	5.36
EL COMITÉ DE CALIDAD	5.20	¿Por qué un equipo	5.36
Miembros	5.20	Nombramiento de los equipos; patrocinadores	5.36
Responsabilidades	5.21	Responsabilidades y derechos ..	5.37
Anticiparse a las preguntas	5.21	Miembros	5.37
Recelos sobre la eliminación de puestos de trabajo	5.21	Miembros de la fuerza de trabajo	5.38
Ayuda desde el Departamento de Calidad	5.22	Altos directivos en los equipos ..	5.39
METAS DE MEJORA DE LA CALIDAD EN EL PLAN DE EMPRESA ..	5.22	Modelo de la infraestructura	5.39
Despliegue de las metas	5.22	ORGANIZACIÓN DEL EQUIPO ...	5.40
El concepto de proyecto	5.23	El líder del equipo	5.40
Uso del Principio de Pareto	5.23	El secretario del equipo	5.40
Los muchos proyectos útiles	5.27	Los miembros del equipo	5.41
EL PROCESO DE PROPUESTA Y SELECCIÓN	5.27	Encontrar el tiempo para trabajar en los proyectos	5.41
Fuentes de propuestas	5.27	FACILITADORES	5.41
Efecto del concepto de la Big Q (calidad integral)	5.28	Los papeles	5.41
Los procesos de propuestas	5.28	Las cualificaciones	5.43
Propuestas de los trabajadores ..	5.28	Fuentes y desempeño	5.43
Proyectos conjuntos con proveedores y clientes	5.29	LA SECUENCIA UNIVERSAL DE LA MEJORA DE LA CALIDAD	5.44
FILTRADO DE PROYECTOS	5.30	Los dos viajes	5.44
Criterios para los primeros proyectos	5.30	Definición de las palabras clave ..	5.44
Criterios para los proyectos posteriores	5.30	El diagnóstico deberá preceder al remedio	5.45
SELECCIÓN DE PROYECTOS	5.31	EL VIAJE DE DIAGNÓSTICO	5.45
Pocos vitales y muchos útiles ...	5.31	Entender los síntomas	5.45
Cifras del coste de los proyectos ..	5.32	Autopsias	5.46
Coste frente a porcentaje de deficiencias	5.32	FORMULACIÓN DE TEORÍAS	5.46
Proyectos tamaño elefante y tamaño mosca	5.32	Generación de teorías	5.46
Clonación	5.33	Disposición de las teorías	5.47
DECLARACIONES DE MISIÓN PARA LOS PROYECTOS	5.34	Elección de teorías para someter las a tests	5.48
		TEST DE LAS TEORÍAS	5.48
		El planteamiento factual	5.49
		Diagramas de flujo	5.49
		Análisis de la capacidad del proceso	5.49

Dissección del proceso	5.49	Errores no advertidos	5.66
Dissección simultánea	5.50	Remedios para errores no advertidos	5.67
Análisis de la concentración de defectos	5.50	Errores técnicos	5.67
Búsquedas por correlación	5.51	Remedios para errores técnicos ..	5.69
Abrir ventanas nuevas	5.52	Errores conscientes	5.69
Diseño de experimentos	5.54	Remedios para errores conscientes	5.70
Medición para el diagnóstico ...	5.55	Errores de comunicación	5.71
Responsabilidad del diagnóstico ..	5.56	Remedios para errores de comunicación	5.72
ANÁLISIS RETROSPECTIVO; LECCIONES APRENDIDAS	5.57	RESISTENCIA AL CAMBIO	5.73
La revisión de Santayana	5.57	Modelos culturales	5.73
La influencia de la duración del ciclo y la frecuencia	5.57	Reglas prácticas	5.73
Aplicación a ciclos de alta frecuencia	5.57	Resolver las diferencias	5.74
Aplicación a ciclos de frecuencia intermedia	5.58	EL CICLO DE VIDA DE UN PROYECTO: RESUMEN	5.75
Aplicación a ciclos de baja frecuencia	5.58	INSTITUCIONALIZAR EL MOVIMIENTO DE LA CALIDAD	5.75
Algunos ejemplos de casos famosos	5.59	LOS PAPELES NO DELEGABLES DE LA ALTA DIRECCIÓN	5.76
El potencial para sucesos de ciclo largo	5.60	REVISIÓN DEL PROGRESO	5.77
EL VIAJE DE REMEDIO	5.61	Revisión de los resultados	5.77
Elección de alternativas	5.61	Datos para la revisión del progreso	5.77
Remedios: Eliminar las causas ..	5.61	Evaluación del rendimiento	5.77
Remedios: Optimizar los costes ..	5.62	RECONOCIMIENTO	5.78
Remedios: Aceptabilidad	5.62	RECOMPENSAS	5.78
El remedio para defectos raros pero críticos	5.63	FORMACIÓN	5.79
Remedio mediante replicación ..	5.63	RESUMEN DE LAS RESPONSABILIDADES DE LA MEJORA DE LA CALIDAD	5.79
Test bajo condiciones de operación	5.63	AGRADECIMIENTOS	5.80
Control a un nuevo nivel; afianzar las ventajas	5.64	REFERENCIAS	5.80
ERROR HUMANO: DIAGNÓSTICO Y REMEDIO	5.64	Algunas historias de la movilización por la mejora de la calidad	5.82
Extensión de los errores de los trabajadores	5.64		
Clases de errores de los trabajadores	5.65		

EL PROPÓSITO DE ESTE CAPÍTULO

El propósito de este capítulo es explicar el carácter de la mejora de la calidad y su relación con la gestión de la calidad, mostrar cómo establecer la mejora de la calidad como un proceso continuo que sigue año tras año, y definir el plan de acción y los papeles a jugar, incluyendo los de la alta dirección.

¿QUÉ ES MEJORA?

Tal como se usa aquí, «mejora» significa «la creación organizada de un cambio beneficioso; el logro de niveles de rendimiento sin precedentes». Un sinónimo es «ruptura».

Dos clases de cambio beneficioso. Mejor calidad es una forma de cambio beneficioso. Es aplicable a las dos clases de calidad resumidas en el Capítulo 2, Figura 2.1:

- *Características del producto.* Pueden aumentar la satisfacción del cliente. Para la empresa productora, están orientadas a los ingresos.
- *Sin deficiencias.* Éstas pueden crear insatisfacción en el cliente y desperdicio crónico. Para la empresa productora, están orientadas a los costes.

La mejora de la calidad para aumentar los ingresos puede consistir en acciones tales como:

- Desarrollo del producto para crear nuevas características que proporcionen mayor satisfacción al cliente y con ello puedan incrementar los ingresos.
- Mejora del proceso del producto para reducir la duración del ciclo y así proporcionar mejor servicio a los clientes.
- Creación de una «ventanilla única» para reducir la frustración del cliente por tener que tratar con varias personas para ser servido.

La mejora de la calidad para reducir las deficiencias que crean un desperdicio crónico puede consistir en acciones tales como:

- Incremento del rendimiento de los procesos de fabricación.
- Reducción de la tasa de errores en las oficinas.
- Reducción de los fallos en operaciones.

A los resultados finales de ambos casos se les llama «mejora de la calidad». Sin embargo, los procesos utilizados para asegurar estos resultados son fundamentalmente diferentes, y por un motivo sutil.

La mejora de la calidad para aumentar los ingresos empieza con la fijación de nuevas metas, como nuevas características de un producto, duraciones de ciclo más breves y una ventanilla única. Cumplir con dichas nuevas metas requiere varias clases de planificación, incluida la planificación de calidad. Esta planificación de calidad se hace mediante una serie universal de pasos: identificar a los «clientes» que se verán afectados si se cumplen las metas, determinar las necesidades de esos clientes, desarrollar las características del producto requeridas para cumplir esas necesidades, etc. En conjunto, esta serie de pasos constituye el «mapa de la planificación de la calidad», que es la materia objeto del Capítulo 3, «El proceso de planificación de la calidad».

En el caso del desperdicio crónico, las metas del producto están ya dispuestas; también lo están los procesos para cumplir esas metas. Sin embargo, los productos resultantes (bienes y servicios) no cumplen todos esas metas. Algunos lo hacen y otros no. Como consecuencia, el planteamiento para reducir el desperdicio crónico es diferente de la guía de planificación de la

calidad. En vez de eso, el planteamiento consiste en (1) descubrir las causas (por qué algunos productos cumplen con las metas y otros no) y (2) aplicar remedios para eliminar las causas. *Es este planteamiento de la mejora de la calidad el que constituye el tema de esta sección.*

Se necesita mejorar la calidad para ambas clases de calidad, ya que las presiones competitivas se aplican a cada una de ellas. Las necesidades del cliente son un objetivo móvil. Los costes competitivos también son un objetivo móvil. No obstante, la mejora para estas dos clases de calidad ha progresado en el pasado a muy distintos ritmos. La principal razón es que muchos altos directivos, quizá la mayoría, dan mayor prioridad al incremento de las ventas que a la reducción de costes. Esta diferencia en la prioridad se refleja habitualmente en la estructura de sus receptivas organizaciones. Tenemos un ejemplo en el planteamiento del desarrollo de un nuevo producto.

Desarrollo estructurado del producto. Muchas empresas mantienen un planteamiento organizado para la evolución de nuevos modelos de productos, año tras año. Según este planteamiento organizado:

- Los proyectos de desarrollo del producto forman parte del plan de empresa.
- Un comité de nuevos productos mantiene una vigilancia sobre estos proyectos.
- Los departamentos a tiempo completo de desarrollo de procesos y productos están equipados con personal, laboratorios y otros recursos, para llevar a cabo el trabajo tecnológico.
- Existen responsabilidades claras para llevar a cabo el trabajo tecnológico esencial.
- Se utiliza un procedimiento estructurado para hacer progresar los nuevos desarrollos a través de los departamentos de operaciones.
- La existencia continua de esta estructura favorece el desarrollo del nuevo producto en ciclos anuales.

Esta estructura especial de la organización, aunque es necesaria, no es suficiente para asegurar buenos resultados. En algunas empresas, la duración del ciclo para llevar nuevos productos hasta el mercado es larga, los nuevos modelos compiten mal en el mercado o se crean nuevos desperdicios crónicos. Tales debilidades se pueden achacar habitualmente a puntos débiles en el proceso de planificación de la calidad, como se dijo en el Capítulo 3, «El proceso de planificación de la calidad».

Reducción no estructurada del desperdicio crónico. En la mayoría de las empresas, el impulso para reducir el desperdicio crónico ha sido mucho menor que el impulso para incrementar las ventas. Como resultado:

- El plan de empresa no ha incluido metas de reducción del desperdicio crónico.
- La responsabilidad por esa mejora de la calidad ha sido vaga. El inicio de las acciones se ha dejado en manos de voluntarios.
- No se han proporcionado los recursos necesarios, ya que dicha mejora no ha formado parte del plan de empresa.

La falta de prioridad de la alta dirección es achacable en gran parte a dos factores que influyen sobre el proceso de pensamiento de muchos altos directivos.

1. No sólo muchos altos directivos dan prioridad máxima al incremento de las ventas, sino que algunos incluso consideran la reducción de coste como una forma de trabajo de segunda categoría, que no es merecedora del tiempo de los altos directivos. Este es el caso sobre todo en el sector de la alta tecnología.
2. Los altos directivos no son conscientes del volumen del desperdicio crónico, ni del potencial asociado para un gran retorno sobre la inversión. El «panel de instrumentos» a disposición de la alta dirección ha puesto el énfasis en medidas del rendimiento como ventas, beneficios, *cash flow*, etc., pero no en el volumen del desper-

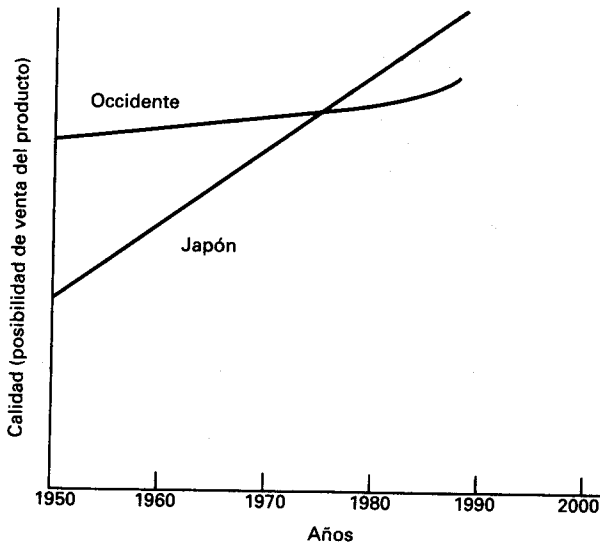


FIGURA 5.2 Estimación de los ritmos de mejora de la calidad en el sector del automóvil (*Making Quality Happen, 1988, Juran Institute, Wilton, CT, p. D4*).

LA PREVISIÓN PARA EL SIGLO XXI

A finales de los años noventa las iniciativas para enfrentarse a la competencia en calidad estaban avanzando en dos líneas basadas en dos filosofías diferentes:

1. Los líderes políticos se centraron en las soluciones políticas: cuotas de importación, tarifas, legislación sobre «comercio equitativo», etc.
2. Los líderes industriales se convencieron progresivamente de que la respuesta necesaria a la competencia estaba en ser más competitivos. Este planteamiento requería aplicar las lecciones aprendidas de los modelos en toda la economía nacional. Tan masiva ampliación se extenderá probablemente hasta bien entrado el siglo XXI.

El consenso emergente. La experiencia de las últimas décadas y las lecciones aprendidas llevaron a un consenso emergente sobre el *status* de la gestión de la calidad, las amenazas y oportunidades resultantes y las acciones que se necesita emprender. En relación con la mejora de la calidad, los puntos primordiales de este consenso incluyen lo siguiente:

- La competencia en calidad se ha intensificado y se ha convertido en un hecho permanente de la realidad. Una respuesta necesaria e importante es un alto ritmo de mejora de la calidad, año tras año.
- Los clientes están demandando crecientemente mejor calidad a sus proveedores. Estas demandas se transmiten luego a toda la cadena de suministradores. Las demandas pueden ir más allá de la mejora del producto y extenderse a la mejora del sistema de gestión de la calidad. (Para ver un ejemplo, Krantz 1989. Por ejemplo, una empresa utilizó la inspección del producto para evitar que los clientes recibieran productos defectuosos. A pesar de ello, un cliente importante requirió de la empresa que revisara su sistema de gestión de la calidad, como condición para continuar siendo un proveedor).

- Se sabe que el desperdicio crónico es enorme. En Estados Unidos, durante los primeros años 1980, alrededor de un tercio de lo que se hizo consistió en volver a hacer lo que se había hecho previamente, debido a las deficiencias en calidad (estimación del autor). El consenso emergente es que no deben continuar tales desperdicios, ya que reducen la competitividad en los costes.
- La mejora de la calidad deberá dirigirse a todas las áreas que influyan en el rendimiento de la empresa, tanto procesos del negocio como procesos de fabricación.
- La mejora de la calidad no deberá dejarse sólo a la iniciativa voluntaria, deberá desarrollarse dentro del sistema.
- El logro del liderazgo de la calidad requiere que la alta dirección tome a su cargo personalmente la gestión de la calidad. En las empresas que lograron alcanzar el liderazgo de la calidad, la alta dirección guiaba personalmente la iniciativa. No conozco ninguna excepción.

EL RESTO DE ESTE CAPÍTULO

El resto de este capítulo se centra en «cómo hacerlo». La división de los temas incluye:

- Los conceptos básicos que subrayan la mejora de la calidad.
- Cómo movilizar los recursos de la empresa para hacer de la mejora de la calidad una parte integral de la gestión de la empresa.
- El proceso de mejora en sí: la secuencia universal de pasos para hacer cualquier mejora.
- Cómo institucionalizar la mejora, de forma que siga y siga, año tras año.

MEJORA DE LA CALIDAD: LOS CONCEPTOS BÁSICOS

El proceso de mejora de la calidad descansa sobre la base de ciertos conceptos fundamentales. Para la mayoría de las empresas y directivos, la mejora anual de la calidad no es sólo una nueva responsabilidad, sino también un cambio radical en el estilo de gestión: un cambio en la cultura empresarial. Por tanto, es importante captar los conceptos básicos antes de meterse en el propio proceso de mejora.

Mejora diferenciada de control. La mejora difiere del control. El diagrama de la trilogía de Juran (Fig. 5.3) muestra esta diferencia. (Adviértase que la Figura 5.3 es idéntica a la de la Figura 2.3 del Capítulo 2). En esta figura, el nivel de desperdicio crónico (el coste de la baja calidad) era originalmente de alrededor de un 23 por ciento del volumen producido. Este desperdicio crónico estaba engranado en el proceso: «Fue planificado así». Más tarde, un proyecto de mejora de la calidad redujo este desperdicio hasta alrededor de un 5 por ciento. Según mi definición, esta reducción de desperdicio crónico fue una mejora: alcanzó un nivel de rendimiento desacostumbrado.

La Figura 5.3 muestra también un «pico esporádico», un aumento súbito de desperdicio de alrededor de un 40 por ciento. Dichos picos no están planificados, surgen de varias fuentes inesperadas. El personal se libró rápidamente de este pico y restableció el nivel cónico previo de alrededor de un 23 por ciento. Esta acción no satisfizo la definición de mejora: no alcanzó un nivel de rendimiento desacostumbrado. Los nombres habituales para dichas acciones son «resolución de problemas», «acción correctora» o «apagafuegos».

Toda mejora tiene lugar proyecto a proyecto. No existe la mejora en general. Toda mejora tiene lugar proyecto a proyecto, y no de otro modo.

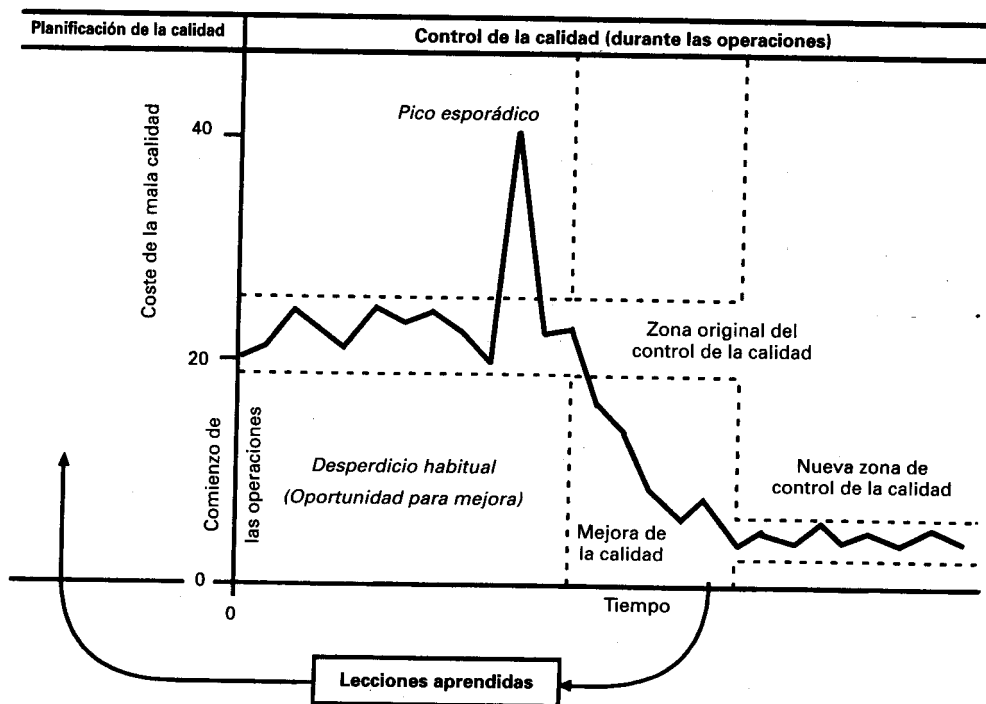


FIGURA 5.3 Diagrama de la trilogía de Juran [Adaptado de Juran, J. M. (1989). *The Quality Trilogy: A Universal Approach to Managing for Quality*. Juran Institute, Inc., Wilton, CT].

Tal como se emplea aquí, «proyecto de mejora» significa «un problema crónico programado para su solución». Dado que el proyecto de mejora tiene múltiples significados, el glosario de la empresa y los manuales de formación deberán definirlo. La definición se completa con la inclusión de algunos ejemplos de casos que se llevaron a cabo con éxito en la empresa.

La mejora de la calidad es universalmente aplicable. El enorme número de proyectos llevados a cabo durante los años 1980 y 1990 demostró que la mejora de la calidad es aplicable:

- Tanto al sector de servicios como al sector de fabricación.
- Tanto a los procesos de la empresa como a los procesos de fabricación.
- Tanto a las actividades de apoyo como a las operaciones.
- Tanto al software como al hardware.

Durante los años 1980 y 1990, la mejora de la calidad se aplicó virtualmente a todos los sectores, incluidos gobierno, educación y salud. [Para un libro original relacionado con el sector de la salud, véase Berwick et al. (1990)].

Además, la mejora de la calidad se ha aplicado con éxito a todo el espectro de funciones de la empresa: finanzas, desarrollo del producto, marketing, legal, etc.

En una empresa, el vicepresidente jurídico tenía sus dudas de que la mejora de la calidad se pudiera aplicar al trabajo jurídico. Sin embargo, al cabo de dos años había reducido en más de un 50 por ciento la duración del ciclo de archivo de una patente (Comunicación privada al autor).

(Para información más detallada y muchos ejemplos de casos, véase las Actas de las Conferencias Anuales IMPRO sobre Gestión de la Calidad).

La mejora de la calidad se extiende a todos los parámetros. Los informes sobre mejora de la calidad que se han hecho públicos muestran que sus efectos se han extendido a todos los parámetros:

- *Productividad.* El rendimiento por persona y hora.
- *Duración del ciclo.* El tiempo requerido para llevar a cabo los procesos, especialmente aquellos que suponen varios pasos ejecutados secuencialmente en distintos departamentos. En el Capítulo 6, «Gestión de los procesos», se habla más de la mejora aplicada a dichos procesos.
- *Seguridad personal.* Muchos proyectos mejoran la seguridad personal mediante la corrección de errores, diseños a prueba de fallos, etc.
- *Medio ambiente.* Igualmente, muchos proyectos están dirigidos a proteger el medio ambiente al reducir las emisiones tóxicas, etc.

Algunos proyectos proporcionan beneficios por medio de múltiples parámetros. Un ejemplo clásico fue el aparato de televisión en color (Juran 1979). La empresa japonesa Matsushita había comprado una fábrica estadounidense (Quasar). Matsushita introdujo entonces varias mejoras, que incluían:

- Rediseño del producto para reducir los fallos de operaciones.
- Rediseño del proceso para reducir la tasa de defectos internos.
- Acción conjunta con los proveedores para mejorar la calidad de los componentes comprados.

Los resultados de estos y otros cambios se detallan en los datos anteriores y posteriores:

	1974	1977
Porcentaje de fallos, es decir, defectos (en los aparatos ensamblados) que requieren reparación	150 por 100 aparatos	4 por 100 aparatos
Número de personas de reparación e inspección	120	15
Porcentaje de averías durante el periodo de garantía	70 %	10 %
Coste de las llamadas de servicio	22 millones \$	4 millones \$

El fabricante se benefició de múltiples maneras: costes más bajos, productividad más alta, entregas más fiables y mayor posibilidad de venta. Los usuarios últimos también se beneficiaron: el porcentaje de fallos en operaciones se redujo en más del 80 por ciento.

La acumulación de proyectos de mejora es enorme. La existencia de una enorme acumulación de proyectos es evidente por el número de mejoras realmente realizadas por las empresas que llevaron a cabo iniciativas exitosas durante los años 1980 y 1990. Algunas informaron de que realizaron mejoras a miles, año tras año. En las empresas muy grandes, las cifras son aún muchísimo mayores.

La acumulación de proyectos de mejora existe en parte porque la planificación de nuevos productos y procesos ha sido deficiente durante largo tiempo. Efectivamente, el proceso de planificación ha sido una incubadora dual. Ha incubado nuevos planes. También ha incubado nuevos desperdicios crónicos y los ha acumulado año tras año. Cada desperdicio crónico de éstos se convertía en un proyecto potencial de mejora.

Otra razón más para la existencia de la enorme acumulación es el carácter del ingenio humano, que parece no tener límites. Toyota Motor Company ha informado de que sus 80.000 empleados ofrecieron 4 millones de sugerencias de mejora durante un solo año: una media de 50 sugerencias por persona y año (Sakai 1994).

La mejora de la calidad no resulta gratis. La reducción del desperdicio crónico no resulta gratis, requiere gastar esfuerzos en varias formas. Es necesario crear una infraestructura que movilice los recursos de la empresa al objetivo de mejora anual de la calidad. Esto implica fijar las metas específicas a alcanzar, elegir los proyectos a abordar, asignar las responsabilidades, seguir el progreso, etc.

También hay necesidad de emprender una formación extensiva sobre el carácter del proceso de mejora, cómo apoyar a los equipos de mejora, cómo usar las herramientas, etc.

Además de todo este esfuerzo preparatorio, cada proyecto de mejora requiere un esfuerzo añadido de realizar diagnósticos para descubrir las causas del desperdicio crónico y proporcionar los remedios para eliminarlas.

Todo lo anterior suma un desembolso considerable, pero los resultados pueden ser asombrosos. *Han sido* asombrosos en las empresas con éxito los modelos a copiar. Se han publicado ampliamente relatos detallados de dichos resultados, especialmente en las actas de las conferencias anuales celebradas por el Instituto Nacional de Normas y Tecnología (NIST) de Estados Unidos, que concede el Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige.

La reducción del desperdicio crónico no requiere inversiones de capital. La reducción del desperdicio crónico rara vez requiere inversiones. El diagnóstico para descubrir las causas emplea habitualmente el tiempo de los equipos del proyecto de mejora de la calidad. Los remedios para eliminar las causas habitualmente implican afinar el proceso. En la mayoría de los casos, un proceso que está ya produciendo más de un 80 por ciento de trabajo bueno se puede elevar hasta el 90 por ciento sin invertir capital. Tal ahorro de inversión de capital es una razón importante del alto retorno sobre la inversión (ROI) que ofrece la reducción del desperdicio crónico.

En cambio, los proyectos de desarrollo de productos para aumentar las ventas suponen desembolsos para descubrir las necesidades de los clientes, diseñar productos y procesos, crear equipamientos, etc. Tales desembolsos están en general clasificados como inversiones y por lo tanto bajan las estimaciones del ROI.

El retorno sobre la inversión está entre los más altos. Esto es evidente por los resultados hechos públicos por los ganadores de los premios nacionales en Japón (Premio Deming), Estados Unidos (Premio Baldrige) y otros lugares. Más y más empresas han estado publicando informes que describen sus mejoras de calidad, incluyendo las ganancias obtenidas. [Para ejemplos, véase las Actas de las Conferencias Anuales IMPRO sobre Gestión de la Calidad, del Instituto Juran, de 1983 y años siguientes. Véanse especialmente Kearns y Nadler (1995)].

Mientras estos y otros ejemplos de casos abundan, no se ha investigado bien sobre el retorno real de la inversión en los proyectos de mejora de la calidad. Yo examiné una vez 18 documentos publicados por empresas y encontré que el proyecto medio de mejora de la calidad había rendido alrededor de 100.000\$ en reducción de costes (Juran 1985). Las empresas eran grandes, con ventas en la escala de más de 1.000 millones de dólares por año.

También he calculado que para proyectos en el nivel de 100.000\$, la inversión en diagnóstico y remedio está alrededor de los 15.000\$. El ROI resultante está entre los más altos a disposición de los directivos. Esto ha motivado que algunos directivos bromearan: «El mejor negocio es el de mejora de la calidad».

Las mayores ganancias proceden de los pocos proyectos vitales. El mayor volumen de las ganancias mensurables viene de una minoría de proyectos de mejora de la calidad: los «pocos vitales». Éstos son multifuncionales por naturaleza, así que necesitan equipos multifuncionales que los lleven a cabo. En cambio, la mayoría de los proyectos están en la categoría de los «muchos útiles», que son desempeñados por los equipos propios de los departamentos. Dichos proyectos producen normalmente resultados muchísimo menores que los pocos vitales.

Aunque los muchos proyectos útiles contribuyen sólo en menor parte a las ganancias mensurables, proporcionan una oportunidad a los niveles inferiores de la jerarquía, incluidos los trabajadores, de participar en la mejora de la calidad. En la mente de muchos directivos, la ganancia resultante en calidad de vida laboral es tan importante como las ganancias tangibles en el rendimiento de las operaciones.

MEJORA DE LA CALIDAD: ALGUNOS INHIBIDORES

Mientras las empresas modelo alcanzaron resultados asombrosos mediante la mejora de la calidad, la mayoría de las empresas no los consiguieron. Algunos de estos fallos se debieron a franca ignorancia de cómo movilizarse para la mejora, pero existen también algunos inhibidores inherentes para establecer la mejora sobre una base anual. Es útil comprender el carácter de algunos de los principales inhibidores antes de lanzarse.

Desilusión con los fallos. La falta de resultados mencionada anteriormente ha llevado a algunas revistas influyentes a la conclusión de que las iniciativas de mejora están inherentemente condenadas al fracaso. Dichas conclusiones ignoran los resultados asombrosos conseguidos por las empresas modelo. (Sus resultados prueban que tales resultados son alcanzables). Además, los modelos han explicado cómo obtuvieron esos resultados, proporcionando así lecciones aprendidas para que otras empresas las siguieran. No obstante, las conclusiones de los medios de comunicación han vuelto cautelosos a algunos altos directivos a la hora de buscar mejoras de la calidad.

«Calidad más alta cuesta más». Algunos directivos tienen la idea fija de que «la calidad más alta cuesta más». Esta idea fija puede estar basada en la creencia pasada de moda de que el modo de mejorar la calidad es aumentar la inspección de forma que menos defectos escapen hasta el cliente. Puede también estar basada en la confusión motivada por los dos significados de la palabra «calidad».

La calidad más alta, en el sentido de características del producto mejoradas (mediante el desarrollo del producto), normalmente requiere inversión de capital. En este sentido, efectivamente, *cuesta* más. No obstante, la calidad más alta, en el sentido de menor desperdicio crónico, normalmente cuesta menos, mucho menos. Quienes sean responsables de la preparación de las propuestas para la aprobación de la dirección deberán tener cuidado con la definición de las palabras clave: ¿De qué clase de calidad estamos hablando?

La apariencia de la delegación. Los directivos son gente ocupada, sin embargo están siendo constantemente bombardeados con nuevas demandas de su tiempo. Intentan mantener equilibrada su carga de trabajo por medio de la delegación. El principio de que «un buen directivo es el que sabe delegar» tiene una extensa aplicación, pero se ha abusado de él en su aplicación a la mejora de la calidad. Las lecciones aprendidas de las empresas modelo muestran que abordar programas de mejora de la calidad anualmente añade, como mínimo, un 10 por ciento a la carga de trabajo de todo el equipo directivo, *incluidos los altos directivos*.

La mayor parte de los altos directivos han intentado evitar esta carga de trabajo añadida mediante una delegación generalizada. Algunos establecieron vagas metas y luego exhortaron a todos a hacerlo mejor, «Hágalo bien a la primera». En las empresas modelo fue distinto. En cada una de dichas empresas, los altos directivos se hicieron cargo de la iniciativa y llevaron a cabo personalmente ciertas tareas no delegables (véase más adelante, bajo Los papeles no delegables de la alta dirección).

Rcelos de los empleados. Abordar la mejora de la calidad implica cambios profundos en el estilo de vida de la empresa, mucho más de lo que parece superficialmente. Añade nue-

vos papeles a las descripciones de las tareas y más trabajo a los encargados de las tareas. Requiere aceptar el concepto de equipo para acometer los proyectos, un concepto extraño en muchas empresas y que invade la jurisdicción de los departamentos funcionales. Eleva la prioridad de la calidad, con efectos perjudiciales para otras prioridades. Requiere formación sobre cómo hacer todo eso. En conjunto, es un cambio ingente que perturba la paz y engendra muchos efectos laterales no deseados.

Para los empleados, el efecto más aterrador de este conjunto de cambios es la amenaza a sus puestos de trabajo y a su categoría. La reducción del desperdicio crónico reduce la necesidad de volver a hacer el trabajo anterior y, por tanto, las tareas de las personas encargadas de dicha repetición. La eliminación de dichas tareas se convierte así en una amenaza a la categoría y/o puesto de trabajo de la supervisión asociada. No deberá constituir una sorpresa que las iniciativas para reducir el desperdicio encuentren resistencia por parte de los trabajadores, los sindicatos y otros grupos.

A pesar de eso, la mejora de la calidad es esencial para mantenerse competitivo. El fallo en avanzar pone en riesgo todos los puestos de trabajo; por tanto, la empresa deberá abordar la mejora, siendo consciente de que el recelo de los empleados es la reacción lógica de personas preocupadas ante propuestas preocupantes. Lo que se necesita es abrir una línea de comunicación para explicar por qué, comprender las preocupaciones y buscar soluciones óptimas. En ausencia de una comunicación sincera, los canales informales ocupan su lugar, engendrando sospechas y rumores. Para un tratamiento de la cuestión más detallado, véase más adelante, bajo Comité de Calidad: anticiparse a las preguntas.

Otros recelos tienen su origen en modelos culturales (véase más adelante, bajo Resistencia al cambio, modelos culturales). (Los recelos citados no se aplican a la mejora de las características del producto para aumentar las ventas. Éstas son bien recibidas por tener el potencial de proporcionar nuevas oportunidades y mayor seguridad del puesto de trabajo).

ASEGURAR LA APROBACIÓN Y PARTICIPACIÓN DE LA ALTA DIRECCIÓN

Las lecciones aprendidas durante los años 1980 y 1990 incluyeron un hallazgo importante: la participación personal de los altos directivos es indispensable para obtener un ritmo anual alto de mejora de la calidad. Este hallazgo sugiere que quien abogue por iniciativas de calidad deberá moverse para convencer a los altos directivos de:

- Los méritos de la mejora anual de la calidad.
- La necesidad de la participación activa de la alta dirección.
- El carácter exacto de la participación que se necesita de la alta dirección.

Concienciación: Prueba de la necesidad. Los altos directivos responden mejor cuando se les muestra una amenaza u oportunidad importantes. Tenemos un ejemplo de amenaza importante en el caso de la empresa G, un fabricante de electrodomésticos. La empresa G y sus competidores R y T eran todos proveedores de un gran cliente para cuatro modelos de electrodoméstico (véase Tabla 5.1). La tabla muestra que en 1980 la empresa G suministró dos de los cuatro modelos. La empresa G era competitiva en precio, entrega a tiempo y características del producto, pero era claramente inferior en la percepción de la calidad por el cliente, siendo su principal problema las averías. En 1982, la falta de respuesta le había costado a la empresa G el contrato para el modelo número 1. En 1983, la empresa G también había perdido el contrato para el modelo número 3.

La concienciación se puede conseguir también mostrando a los altos directivos otras oportunidades, como la reducción de costes mediante la disminución del desperdicio crónico.

TABLA 5.1 Proveedores de un gran cliente

Número de modelo	1980	1981	1982	1983
1	G	G	R	R
2	R	R	R	R
3	G	G	G	R
4	T	R	R	R

El volumen del desperdicio crónico. Una oportunidad importante muy extendida para los altos directivos es la reducción del coste de la baja calidad. En la mayoría de los casos, este coste es mayor que el beneficio anual de la empresa, a menudo mucho mayor. La cuantificación de este coste puede hacer mucho para probar la necesidad de un cambio radical en el planteamiento de la mejora de la calidad. Se muestra un ejemplo en la Tabla 5.2. Esta tabla muestra el coste estimado de la baja calidad para una empresa en un proceso industrial que use la clasificación contable tradicional. La tabla plantea varias cuestiones de importancia a los altos directivos:

- *Su magnitud.* El total de los costes se calculó en 9,2 millones por año. Para esta empresa, esta suma representaba una oportunidad importante. (Cuando dichos costes nunca se han reunido antes, el total es normalmente mucho mayor de lo que nadie podría esperar).
- *Las áreas de concentración.* La tabla está dominada por los costes de los fallos internos, que son un 79,4 por ciento del total. Claramente, cualquier reducción importante de costes debe proceder de los fallos internos.
- *Las limitadas iniciativas de prevención.* La cifra de 1,9 por ciento para la prevención sugiere que una mayor inversión en prevención tendría un gran efecto en los costes.

(Para más detalles, véase el Capítulo 8, «Calidad y costes»).

El retorno potencial sobre la inversión. Una responsabilidad importante de los altos directivos es hacer el mejor uso posible de los activos de la empresa. Una medida clave para juzgar lo que es mejor es el retorno *sobre la inversión* (ROI). En general, ROI es la relación entre (1) la ganancia estimada y (2) los recursos necesarios estimados. Calcular el ROI para proyectos que reduzcan el desperdicio crónico requiere reunir estimaciones tales como:

- Los costes del desperdicio crónico asociados con los proyectos.
- Las reducciones potenciales de costes si los proyectos tienen éxito.
- Los costes del diagnóstico y remedios necesarios.

Muchas propuestas para abordar la mejora de la calidad no han logrado ganar el apoyo de la dirección porque nadie ha cuantificado el ROI. Dicha omisión es un *handicap* para los altos directivos, que no pueden comparar (1) el ROI potencial de la mejora de la calidad con (2) el ROI potencial de otras oportunidades de inversión.

TABLA 5.2 Análisis del coste de la baja calidad

Categoría	Suma en \$	Tanto por ciento del total
Fallos internos	7.279.000	79,4
Fallos externos	283.000	3,1
Valoración	1.430.000	15,6
Prevención	170.000	1,9
	9.162.000	100,0

Los directivos de calidad y otros que preparan tales propuestas harán bien en preparar la información sobre ROI en colaboración con quienes tienen los conocimientos prácticos de los intrínsecos del ROI. El cálculo del ROI se complica porque en él entran dos clases de dinero: capital y gastos. Cada uno de ellos es dinero, pero en algunos países (incluidos los Estados Unidos) se gravan de manera distinta. Las inversiones se deducen del dinero después de pagar impuestos, mientras que los gastos se deducen del dinero antes de pagar impuestos.

Esta diferencia en los gravámenes se refleja en las reglas de contabilidad. Los gastos se registran directamente, reduciendo así los beneficios declarados y por tanto los impuestos sobre los beneficios. Los gastos de capital se deducen gradualmente, normalmente durante un periodo de años. Esto aumenta los beneficios declarados y con ello los impuestos sobre éstos. Todo esto supone una ventaja para las propuestas de abordar la mejora de calidad, porque la mejora de calidad raras veces requiere grandes inversiones. (Algunos altos directivos tienden a usar la palabra *inversión* sólo para aplicarla a la inversión de capital).

Uso de proyectos modelo. La presentación de las cifras del coste resulta aún más efectiva si se acompaña de un «proyecto modelo»: un caso ejemplar de mejora de calidad ejecutada realmente con éxito dentro de la empresa. Tal fue el planteamiento de la empresa ABC, un gran fabricante de instrumentos electrónicos.

Históricamente, el coste de la baja calidad en ABC iba por los 2.000 millones de dólares anuales. Una parte notable de esto eran los 9 millones de dólares de coste anual de chatarra de cierto componente electrónico. El principal tipo de defecto era el defecto X. Había estado costando 3 millones de dólares al año.

La empresa había lanzado un proyecto para reducir la frecuencia del defecto X. El proyecto tuvo un éxito asombroso: rebajó el coste del defecto X de 3 millones a 1 millón de dólares: una mejora anual de 2 millones de dólares. La inversión necesaria para introducir esta mejora fue modesta, alrededor de un cuarto de millón para afinar los procesos y sus controles. El beneficio durante el primer año de aplicación había sido ocho veces la inversión.

Este proyecto modelo se usó entonces para convencer a la alta dirección de que la expansión de la mejora de la calidad podía reducir en gran medida los costes de la baja calidad de la empresa y hacerlo con un alto retorno sobre la inversión.

En la mayoría de las empresas, las mejoras de la calidad que han tenido éxito previamente pueden servir como proyectos modelo. La metodología es la siguiente:

- Identificar los proyectos de mejora de la calidad completados en el último o dos últimos años.
- En cada proyecto, estimar (1) lo que se ganó y (2) el gasto asociado.
- Resumirlo y determinar el ROI compuesto.
- Comparar este compuesto con los retornos obtenidos por otras actividades de la empresa. (Tales comparaciones muestran habitualmente cómo la mejora de la calidad proporciona la tasa de retorno más alta).

Obtención de las cifras de costes. Los sistemas contables de las empresas normalmente cuantifican sólo una minoría de los costes de la baja calidad. La mayoría está diseminada por los diferentes gastos generales. Como resultado, los especialistas de calidad han buscado medios de suministrar lo que faltaba. Sus principales iniciativas para solucionarlo han sido las siguientes:

1. *Hacer estimaciones.* Es el planteamiento «rápido y chapucero». Habitualmente se hace mediante muestreo e implica sólo una pequeña cantidad de esfuerzo. Puede, en unos pocos días o semanas, proporcionar (a) una evaluación del coste aproximado del desperdicio crónico y (b) indicar dónde está concentrado.
2. *Expandir el sistema contable.* Esto es mucho más elaborado. Requiere un montón de trabajo de los distintos departamentos, especialmente los de Contabilidad y Calidad. Se desarrolla durante bastante tiempo, a menudo dos o tres años. (Para más detalles, véase el Capítulo 8, «Calidad y costes»).

Según mi experiencia, las estimaciones suponen mucho menos trabajo, se preparan en mucho menos tiempo, e incluso son adecuadas para la toma de decisiones de la directiva.

Adviértase que la demanda de «exactitud» de las cifras del coste depende del uso que se haga de dichas cifras. Cuadrar las cuentas demanda un alto grado de exactitud. Tomar decisiones de gestión puede tolerar a veces un margen de error. Por ejemplo, se ha estimado que un proyecto potencial de mejora incurrirá en un coste de baja calidad de unos 300.000\$ anuales. Se impugna esta cifra. Las estimaciones contendientes van desde 240.000\$ a 360.000\$, una gama bastante amplia. Entonces alguien hace una observación penetrante: «No importa cuál sea la estimación correcta. Incluso con la cifra más baja, es una buena oportunidad para la mejora, así que abórdemola». En otras palabras, la decisión de la dirección de abordar el proyecto es idéntica dentro de la amplia gama de estimaciones.

Lenguajes en la jerarquía. Un aspecto sutil para asegurar la aprobación de la alta dirección es la elección del lenguaje. Las empresas industriales utilizan dos lenguajes estándar, el lenguaje del dinero y el lenguaje de las cosas. (Existen también dialectos locales, cada uno peculiar de una función específica). Sin embargo, como se ve en la Figura 5.4, el uso del lenguaje estándar no es uniforme.

La Figura 5.4 muestra el uso de los lenguajes estándar en los diferentes niveles de una jerarquía típica. En la cima, el principal lenguaje de la alta dirección es el lenguaje del dinero. En la base, el principal lenguaje de los supervisores de primera línea y los trabajadores es el lenguaje de las cosas. En medio, los directivos de los niveles medios y los especialistas necesitan entender ambos lenguajes, *los directivos de los niveles medios deberán ser bilingües*.

Es muy normal que el desperdicio crónico se mida en el lenguaje de las cosas: porcentaje de errores, rendimiento del proceso, horas de repetición del trabajo, etc. Convertir estas medidas en el lenguaje del dinero permite a la alta dirección relacionarlas con las medidas financieras que han dominado durante largo tiempo el «panel de instrumentos» de la gestión.

Hace años, fui invitado a visitar a un gran fabricante británico para estudiar su planteamiento de la gestión de la calidad y dar mi opinión. Hallé que el coste de la baja calidad de la empresa era enorme, que era factible rebajarlo en 2 a 5 años y que el retorno sobre la inversión resultante sería mucho mayor que el de fabricar y vender los productos de la empresa. Cuando

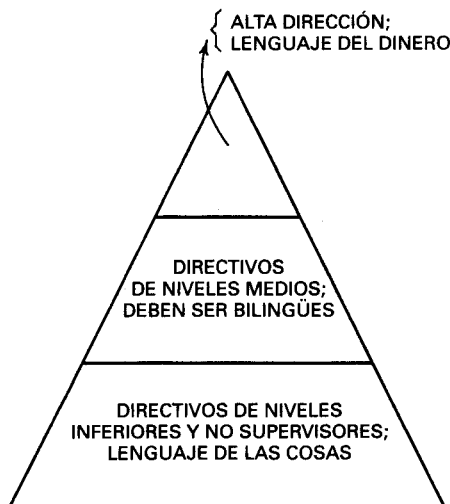


FIGURA 5.4 Lenguajes comunes en la jerarquía.

explicué esto al director general, se quedó muy impresionado, era la primera vez que le explicaban el problema del desperdicio crónico en el lenguaje del retorno sobre la inversión. Rápidamente reunió a sus directores (vicepresidentes) para discutir qué hacer con esta oportunidad.

Presentaciones a la alta dirección. Las presentaciones a la alta dirección deberán enfocarse en las metas de la alta dirección, no en las metas de los que las presentan. La alta dirección necesita satisfacer las necesidades de varios grupos con intereses: clientes, propietarios, empleados, proveedores, público en general (v.g., seguridad, salud, medio ambiente), etc. Ayuda mucho que las propuestas identifiquen los problemas específicos de los grupos con intereses y estimen los beneficios que se pueden obtener.

La alta dirección recibe numerosas propuestas para asignar los recursos de la empresa: ocupar mercados extranjeros, desarrollar productos nuevos, comprar equipamiento nuevo para aumentar la productividad, hacer adquisiciones, entrar en *joint ventures*, etc. Estas propuestas compiten entre sí por la prioridad, y una prueba esencial es su retorno sobre la inversión (ROI). Ayuda que la propuesta de abordar la mejora de la calidad incluya las estimaciones de ROI.

La explicación de las propuestas se mejora a veces convirtiendo los datos de apoyo en unidades de medida familiares a la alta dirección. Por ejemplo:

- El coste de la baja calidad del último año fue cinco veces el beneficio del último año de 1,5 millones de dólares.
- Recortar el coste de la baja calidad a la mitad aumentaría los beneficios en 13 centavos por acción.
- El 13 por ciento de las órdenes de ventas del último año fue cancelado debido a la baja calidad.
- El 32 por ciento del tiempo de ingeniería se empleó en encontrar y corregir puntos débiles del diseño.
- El 25 por ciento de la capacidad de fabricación se dedicó a corregir problemas de calidad.
- El 70 por ciento del inventario realizado es achacable a la baja calidad.
- El 25 por ciento de todas las horas de fabricación se consumieron en encontrar y corregir defectos.
- El coste de la baja calidad del último año fue el equivalente de que la fábrica X sacara productos defectuosos al 100 por ciento durante todo el año.

La experiencia en las presentaciones a la alta dirección ha proporcionado algunos consejos útiles sobre qué hacer y qué no hacer:

- *Resume* el total del coste estimado de la baja calidad. El total será lo bastante grande como para llamar la atención de la alta dirección.
- *Muestre* dónde se concentran estos costes. Una forma usual de agruparlos está en la Tabla 5.2. Normalmente (como en este caso), la mayoría de los costes está asociado a fallos, internos y externos. La Tabla 5.2 muestra también la falacia de intentar empezar reduciendo la inspección y prueba. Los costes debidos a fallos deberán reducirse los primeros. Una vez que los niveles de defectos hayan descendido, se podrán reducir también los costes de la inspección.
- *Describe* los principales proyectos que forman el núcleo de la propuesta.
- *Estime* el beneficio potencial, así como el retorno sobre la inversión. Si la empresa nunca ha emprendido un planteamiento organizado para reducir los costes relacionados con la calidad, *entonces una meta razonable será rebajar estos costes a la mitad* en el espacio de 5 años.
- *Tenga* las cifras revisadas por adelantado por aquellas personas de finanzas (y de otras funciones) que comprueban la validez de las cifras financieras para la alta dirección.

- *No hinche* los costes actuales mediante la inclusión de ítems cuestionables o que estén en el límite. El riesgo está en que las reuniones de revisión decisivas se verán bloqueadas por el debate sobre la validez de las cifras, sin llegar a la discusión de los méritos de las propuestas.
- *No dé a entender* que los costes totales se reducirán a cero. Una implicación así probablemente distraerá la atención de los méritos de las propuestas.
- *No imponga* los primeros proyectos a directivos que no estén realmente convencidos o a sindicatos que estén fuertemente en contra. En vez de eso, empiece en áreas que muestren un clima más receptivo. Los resultados obtenidos en estas áreas determinarán que la iniciativa global se expanda o perezca.

Las necesidades de mejora de la calidad van más allá de la satisfacción de los clientes o de las reducciones de costes. Nuevas fuerzas aparecen por el horizonte. Ejemplos recientes incluyen: aumento de la responsabilidad por el producto, el movimiento de los consumidores, la competencia extranjera y la legislación de todas clases. La mejora de la calidad ha proporcionado gran parte de la respuesta a estas fuerzas.

Igualmente, los medios de convencer a la alta dirección de la necesidad de la mejora de la calidad van más allá de los informes de sus defensores. Para añadir más convicción, se puede visitar empresas de éxito, atender las ponencias presentadas en conferencias, leer los informes publicados por las empresas de éxito y escuchar a los expertos, tanto internos como externos. Sin embargo, nada es tan persuasivo como los resultados conseguidos dentro de la propia empresa.

Un elemento final de la presentación a la alta dirección es explicar sus responsabilidades personales en el lanzamiento y perpetuación de la mejora de la calidad (véase más adelante, bajo Los papeles no delegables de la alta dirección).

MOVILIZAR PARA LA MEJORA DE CALIDAD

Hasta los años 1980 la mejora de la calidad en Occidente no era obligatoria, no formaba parte del plan de negocio ni era parte de las descripciones de las tareas. Se produjeron algunas mejoras de la calidad, pero de forma voluntaria. Aquí y allá un directivo o no directivo, por cualquier razón, decidía abordar alguna mejora de la calidad. Podía persuadir a otros para formar un equipo informal. El resultado podía ser favorable o no. Este planteamiento voluntario e informal proporcionó pocas mejoras. El énfasis se mantuvo en la inspección, el control y la solución de problemas.

La necesidad de estructura formal. La crisis de calidad que siguió a la revolución japonesa de la calidad exigió estrategias nuevas, una de las cuales fue un ritmo mucho más alto de mejora de la calidad. Se hizo evidente entonces que un planteamiento informal no produciría miles (o más) de mejoras año tras año. Esto condujo a experimentar con planteamientos estructurados, que, a su debido tiempo, ayudaron a algunas empresas a convertirse en modelos.

Algunos altos directivos protestaron contra la estructura formal. «¿Por qué no lo hacemos, sin más?». La respuesta depende de cuántas mejoras sean necesarias. Para sólo unos pocos proyectos cada año, la falta de estructura formal vale; no es necesaria la movilización. Sin embargo, las mejoras a cientos o miles requieren una estructura formal. (Algunos informes publicados de experiencias empresariales en la movilización por la mejora de la calidad se pueden ver bajo Referencias, algunos relatos de la movilización por la mejora de la calidad).

Se vio que la movilización por la mejora de la calidad requería dos niveles de actividad, como se muestra en la Figura 5.5. La figura muestra los dos niveles de actividad. Uno de éstos moviliza los recursos de la empresa para tratar los proyectos de mejora *colectivamente*. Así se convierte en responsabilidad de la dirección. La otra actividad se necesita para desempeñar los proyectos *individualmente*. Así se convierte en responsabilidad de los equipos de mejora de la calidad.

Actividades de la dirección	Actividades de los equipos
Establecer los comités de calidad.	Analizar los síntomas.
Seleccionar los proyectos; redactar las declaraciones de misión.	Teorizar sobre las causas.
Asignar los equipos.	Someter a test las teorías.
Revisar el progreso.	Establecer las causas.
Proporcionar reconocimiento y recompensas.	Impulsar los remedios y controles.

FIGURA 5.5 Movilización para la mejora de calidad.

EL COMITÉ DE CALIDAD

El primer paso en la movilización por la mejora de la calidad es establecer el comité de calidad (o nombre similar) de la empresa. La responsabilidad básica de este comité es lanzar, coordinar e «institucionalizar» la mejora anual de la calidad. Se han establecido tales comités en muchas empresas. Sus experiencias proporcionan guías útiles.

Miembros. Los miembros del comité proceden normalmente de las filas de los altos directivos. Con frecuencia, el comité de dirección es también el comité de calidad. La experiencia ha demostrado que los comités de calidad son más efectivos cuando los altos directivos son personalmente líderes y miembros de los comités de calidad superiores.

En las grandes empresas es habitual establecer comités a nivel de división, así como a nivel corporativo. Además, algunos centros de trabajo pueden ser también tan grandes que exigen establecer un comité de calidad local. Cuando se establecen múltiples comités, normalmente están vinculados: miembros de los comités de alto nivel sirven como presidentes de los comités de niveles más bajos. La Figura 5.6 es un ejemplo de dicho vínculo.

La experiencia ha demostrado que organizar comités de calidad sólo en los niveles inferiores de dirección es ineficaz. Dicha organización limita los proyectos de mejora de la calidad a los «muchos útiles», mientras que descuida los «pocos vitales», aquellos que pueden pro-

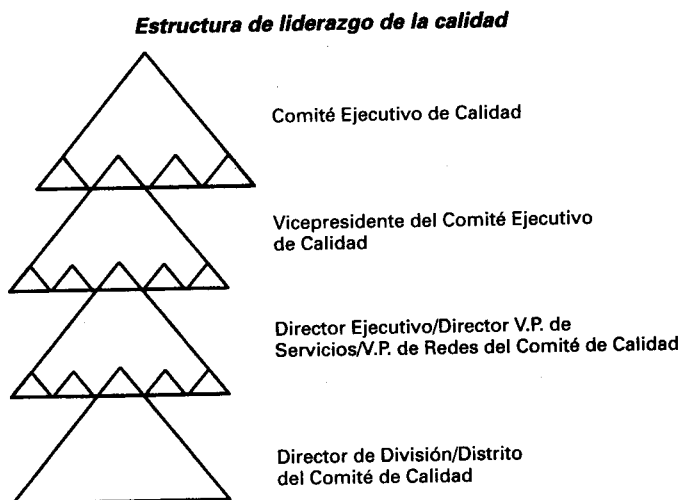


FIGURA 5.6 Cómo están vinculados los comités de calidad (Fuente: *Making Quality Happen*, 1988, Juran Institute, Wilton, CT, p. D17).

ducir los mayores resultados. Además, los comités de calidad sólo en los niveles inferiores envían un mensaje a todos: «La mejora de la calidad no es prioritaria en la agenda de la alta dirección».

Responsabilidades. Es importante que cada comité defina y publique sus responsabilidades, de forma que (1) los miembros estén de acuerdo con su misión y (2) el resto de la organización pueda estar informado de los sucesos futuros.

Muchos comités de calidad han hecho públicas sus declaraciones de responsabilidad. Los principales elementos comunes han incluido los siguientes puntos:

- Formular las políticas de calidad, tales como el enfoque en el cliente, la calidad tiene máxima prioridad, la mejora de la calidad debe seguir año tras año, la participación deberá ser universal, o el sistema de recompensas deberá reflejar los resultados de las mejoras.
- Calcular las principales dimensiones, tales como *status* de calidad comparada con los competidores, extensión del desperdicio crónico, adecuación de los principales procesos del negocio, o resultados conseguidos por mejoras anteriores.
- Establecer los procesos para seleccionar los proyectos, tales como solicitud y filtro de las propuestas, elección de los proyectos a abordar, preparación de las declaraciones de misión, o creación de un clima favorable a la mejora de la calidad.
- Establecer los procesos para llevar a cabo los proyectos, tales como selección de los líderes y miembros del equipo o definición de los papeles de los equipos del proyecto.
- Proporcionar apoyo a los equipos del proyecto, tales como formación (véase el Capítulo 16, «Formación para la calidad»), tiempo para trabajar en los proyectos, apoyo en el diagnóstico, apoyo de facilitador o acceso a equipamientos para tests y pruebas.
- Establecer medidas del progreso, tales como satisfacción del cliente, efectos sobre el rendimiento financiero o extensión de la participación en los equipos.
- Revisar el progreso, ayudar a los equipos en caso de obstáculos y asegurarse de que se implantan las medidas.
- Proporcionar el reconocimiento público a los equipos.
- Revisar el sistema de recompensas para que refleje los cambios demandados por la introducción de mejoras anuales de la calidad.

Anticiparse a las preguntas. El anuncio de la intención de una empresa de abordar mejoras anuales de la calidad siempre provoca preguntas de los niveles subordinados, preguntas como:

- ¿Cuál es el propósito de esta nueva actividad?
- ¿Qué relación tiene con las iniciativas ya en marcha para hacer mejoras?
- ¿Cómo afectará a otras actividades orientadas a la calidad?
- ¿Qué tareas se verán afectadas y cómo?
- ¿Qué acciones se emprenderán y en qué secuencia?
- En vista de esta nueva actividad, ¿qué deberemos hacer que sea distinto a lo que estamos haciendo?

Los comités de calidad se deberán anticipar a las cuestiones problemáticas y, en la medida de lo posible, dar respuestas en el momento de anunciar la intención de abordar mejoras anuales de la calidad. Algunos directivos superiores han llegado al extremo de crear una cinta de vídeo que permite a la audiencia escuchar el mismo mensaje de una fuente de autoridad indiscutible.

Recelos sobre la eliminación de puestos de trabajo. Los empleados no sólo desean respuestas a estas preguntas, también desean que se les disipen sus recelos, especialmente con el riesgo de pérdida de puestos de trabajo debido a la mejora de la calidad. La mayoría de los

altos directivos se muestran renuentes a deshacer estos recelos. Es comprensible esta renuencia. Es arriesgado dar seguridades cuando el futuro es incierto.

No obstante, algunos directivos han estimado con alguna profundidad los dos ritmos pertinentes de cambio:

1. El ritmo de creación de nuevos puestos de trabajo debido a bajas: jubilaciones, ofertas de jubilación anticipada, renunciaciones, etc.
2. El ritmo de eliminación de puestos de trabajo debido a la reducción del desperdicio crónico. Esta estimación es más especulativa: es difícil predecir cuánto tardará el ritmo de la mejora en acelerarse. En la práctica, las empresas han sido sumamente optimistas en sus estimaciones.

El análisis de estas estimaciones puede ayudar a los directivos a juzgar qué seguridades pueden dar, si es que pueden. Esto también puede arrojar luz sobre la elección de alternativas para la acción: volver a dar formación para nuevos puestos de trabajo, reasignar a áreas que tienen ofertas de trabajo, ofrecer jubilación anticipada, ayudar a encontrar trabajo en otras empresas, y/o proporcionar ayuda en el caso de rescisión del contrato.

Ayuda desde el Departamento de Calidad. Muchos comités de calidad se aseguran la ayuda del Departamento de Calidad para:

- Proporcionar datos que el comité necesita para planificar la introducción de la mejora de la calidad.
- Redactar propuestas y procedimientos.
- Realizar detalles esenciales tales como el filtrado de las propuestas para los proyectos.
- Elaborar materiales de formación.
- Elaborar nuevas medidas de calidad.
- Preparar informes del progreso.

También es usual, pero no invariable, que el director de calidad sirva como secretario del comité de calidad.

METAS DE MEJORA DE LA CALIDAD EN EL PLAN DE EMPRESA

Las empresas que se han convertido en líderes de la calidad (las empresas modelo) han adoptado todas la práctica de ampliar su plan de empresa para incluir metas orientadas a la calidad. En efecto, tradujeron las amenazas y oportunidades a que se enfrentaban sus empresas en metas de calidad, tales como:

- Incrementar las entregas a tiempo de un 83 a un 98 por ciento en los 2 años siguientes.
- Reducir el coste de la baja calidad en un 50 por ciento en los 5 años siguientes.

Tales metas son claras, cada una de ellas está cuantificada y cada una de ellas tiene un calendario. Convencer a la alta dirección de que establezca dichas metas es un gran paso, pero sólo es el primer paso.

Despliegue de las metas. Las metas son meramente una lista de deseos hasta que se *despliegan*, hasta que se descomponen en proyectos específicos para ser ejecutados y asignados a individuos o equipos específicos, que son provistos entonces de los recursos necesarios para emprender la acción. La Figura 5.7 muestra la anatomía del despliegue del proceso. En la figura, las metas (estratégicas) amplias de calidad son establecidas por el comité de calidad y se convierten en parte del plan de negocio de la empresa. Estas metas se dividen entonces y se

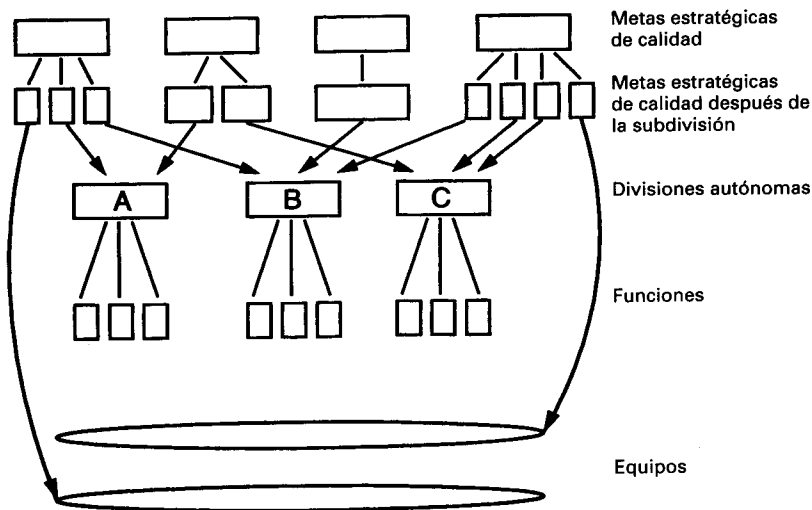


FIGURA 5.7 Anatomía del proceso de despliegue (Fuente: *Visual OPQ9-2, Juran Institute, Inc., Wilton, CT*).

asignan a los niveles inferiores para que las traduzcan en acción. En las grandes organizaciones puede haber más subdivisiones antes de alcanzar los niveles de acción. El nivel final de acción puede consistir en individuos o equipos.

En respuesta, los niveles de acción seleccionan *proyectos* de mejora que satisfarán colectivamente las metas. Estos proyectos se proponen luego a los niveles superiores junto con las estimaciones de recursos necesarios. Las propuestas y las estimaciones se discuten y revisan hasta alcanzar la decisión final. El resultado final es un acuerdo sobre los proyectos a abordar, qué recursos proporcionar y quiénes serán los responsables de llevar a cabo los proyectos.

Este planteamiento de empezar por arriba con las metas estratégicas de la calidad puede parecer como una simple actividad de arriba abajo. Sin embargo, el proceso del despliegue apunta a proporcionar una discusión abierta en ambas direcciones antes de tomar la decisión final, y normalmente ésta es la forma en que funciona.

El concepto de metas estratégicas de la calidad implica a los pocos asuntos clave, pero no se limita al nivel corporativo. Las metas de la calidad también pueden ser incluidas en los planes de negocio de las divisiones, los centros de beneficio, las oficinas de operaciones y otros centros. El proceso del despliegue es aplicable a todos ellos. (Para más información sobre el proceso del despliegue, véase el Capítulo 13, «Despliegue estratégico»).

El concepto de proyecto. Tal como se usa aquí, un *proyecto* es un problema crónico programado para su solución. El proyecto es el foco de las acciones de mejora de la calidad. Toda mejora tiene lugar proyecto a proyecto y no de otra forma.

Algunos proyectos se derivan de metas de calidad que están en el plan de negocio de la empresa. Son relativamente pocas en número, pero todas son muy importantes. Colectivamente, están entre los pocos proyectos vitales (véase más adelante, bajo Uso del Principio de Pareto). No obstante, la mayor parte de los proyectos se derivan no del plan de negocio de la empresa, sino del proceso de propuesta-selección, como se dice más adelante.

Uso del Principio de Pareto. Una ayuda valiosa para seleccionar proyectos durante el proceso de despliegue es el *Principio de Pareto*. Este principio dice que en cualquier población que contribuye a un efecto común, unos pocos de sus contribuyentes, los pocos vitales, son res-

TABLA 5.3 Análisis de Pareto por cuentas

Categoría contable	Pérdida anual de calidad* (miles de \$)	Porcentaje de pérdida de calidad total	
		Esta categoría	Acumulado
Broke	5.560	61	61
Reclamación de clientes	1.220	14	75
Lote atípico	780	9	84
Coste alto de material	670	7	91
Tiempo de paro	370	4	95
Exceso de inspección	280	3	98
Coste alto de pruebas	190	2	100
TOTAL	9.070		

* Ajustado a la inflación estimada desde la época del estudio original.

ponsables del grueso del efecto. El principio se aplica ampliamente en los asuntos humanos. Un porcentaje relativamente pequeño de individuos escribe la mayor parte de los libros, comete la mayor parte de los crímenes, posee la mayor parte de la riqueza, etc.

Un ejemplo del uso del Principio de Pareto para la selección de proyectos lo vemos en la meta de reducción del coste de la baja calidad de una papelería. El total estimado era de 9.070.000\$ al año, dividido entre siete categorías contables (véase Tabla 5.3). Una de estas siete categorías se llama «broke». Su monto es 5.560.000\$ o 61 por ciento del total. Claramente, no habrá mejoras importantes en el total a menos que se dirija un ataque con éxito contra el «broke», que es donde está concentrado el dinero (broke es una palabra del dialecto papelerero para un papel tan defectuoso que debe ser devuelto a los molinos para su reprocesado).

Esta papelería hace 53 tipos de papel. Cuando se analiza el «broke» por tipo de papel, el Principio de Pareto se pone en evidencia (véase Tabla 5.4). Seis de los 53 tipos de productos suponen 4.480.000\$, que es el 80 por ciento de los 5.560.000\$. No habrá mejora importante en el «broke» a menos que se dirija un ataque con éxito contra estos seis tipos de papel. Adviértase que el estudio del 12 por ciento de los tipos de productos consigue atajar el 80 por ciento del coste del «broke».

Finalmente, el análisis se extendió a los tipos de defectos que causaban la mayor parte del coste de «broke». Hay numerosos tipos de defectos, pero dominan cinco (véase Tabla 5.5). El mayor coste es 612.000\$ por «desgarro» en papel del tipo B. El siguiente es 430.000\$ por

TABLA 5.4 Análisis de Pareto por productos

Tipo de producto	Pérdida anual de broke* (miles de \$)	Porcentaje de pérdida de broke	Porcentaje acumulado de pérdida de broke
A	1.320	24	24
B	960	17	41
C	720	13	54
D	680	12	66
E	470	8	74
F	330 (4.480)	6	80
Otros 47 tipos	1.080	20	100
TOTAL 53 tipos	5.560	100	

* Ajustado a la inflación estimada desde la época del estudio original.

TABLA 5.5 Matriz de los costes de calidad*

Tipo	Acabado (miles de \$)	Defectos visuales † (miles de \$)	Calibrado (miles de \$)	Desgarro (miles de \$)	Porosidad (miles de \$)	Todas las otras causas (miles de \$)	Total (miles de \$)
A	270	94	Ninguno ‡	162	430	364	1.320
B	120	33	Ninguno ‡	612	58	137	960
C	95	78	380	31	74	62	720
D	82	103	Ninguno ‡	90	297	108	680
E	54	108	Ninguno ‡	246	Ninguno ‡	62	470
F	51	49	39	16	33	142	330
TOTAL	672	465	419	1.157	892	875	4.480

* Ajustado a la inflación estimada desde la época del estudio original.

† Manchas, agujeros, arrugas, etc.

‡ Sin requisito específico para este tipo.

Clave	Pérdidas	Pérdidas acumuladas	% categoría	% acumulado
BK	5.560.000	5.560.000	61	61
CC	1.220.000	6.780.000	13	75
OL	780.000	7.560.000	9	83
MC	670.000	8.230.000	7	91
DT	370.000	8.600.000	4	95
XI	280.000	8.880.000	3	98
TC	190.000	9.070.000	2	100
Total	9.070.000		100	

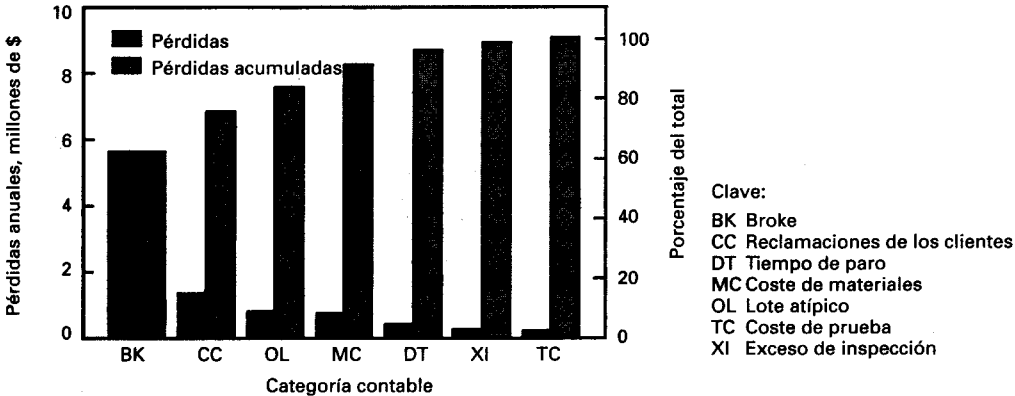


FIGURA 5.8 Análisis de Pareto: pérdidas anuales por categoría.

Clave	Pérdidas	Pérdidas acumuladas	Tipo	% de pérdidas	% acumulado		
A	1.320.000	1.320.000	A	24	24	1.320	1.320
B	960.000	2.280.000	B	17	41	960	2.280
C	720.000	3.000.000	C	13	54	720	3.000
D	680.000	3.680.000	D	12	66	680	3.680
E	470.000	4.150.000	E	8	75	470	4.150
F	330.000	4.480.000	F	6	81	330	4.480
Otras	1.080.000	5.560.000	Otros	19	100	1.080	5.560
TOTAL	5.560.000			100		5.560	

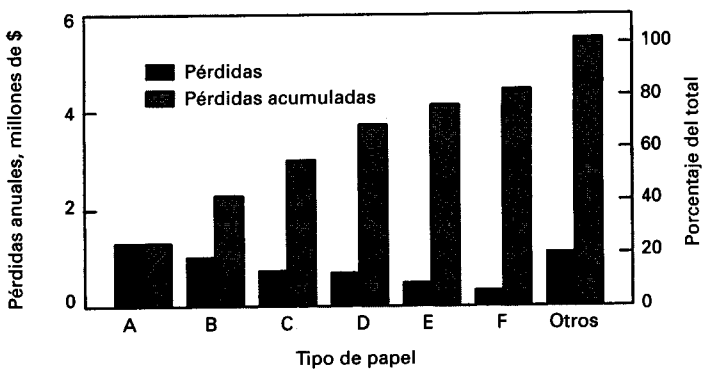


FIGURA 5.9 Análisis de Pareto: pérdidas anuales por tipo de papel.

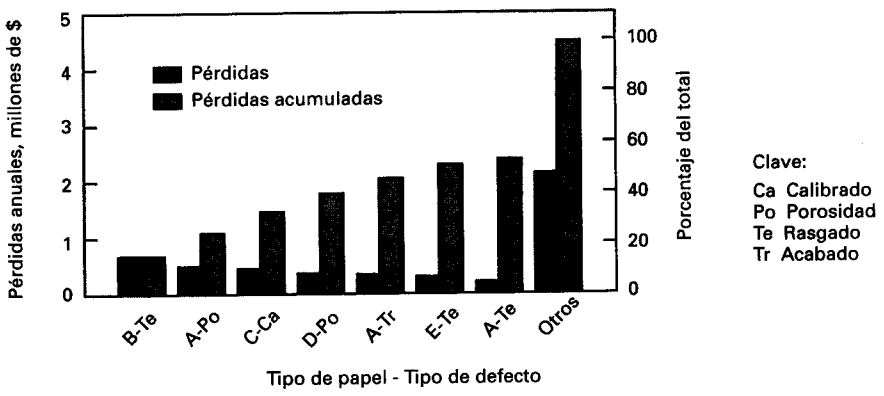


FIGURA 5.10 Análisis de Pareto: pérdidas anuales por tipo de defecto.

«porosidad» en papel del tipo A, y así sucesivamente. Cada uno de estos grandes números tiene una alta probabilidad de ser seleccionado para un proyecto de mejora.

La identificación de los pocos vitales (en este caso, categorías contables, tipos de papel y tipos de defectos) resulta más fácil si los datos tabulares se presentan de forma gráfica. Las Figuras 5.8, 5.9 y 5.10 presentan los datos de la papelería gráficamente. Como sus contrapartidas tabulares, cada uno de estos gráficos consta de tres elementos:

1. Los contribuyentes al efecto total, clasificados por el grado de su contribución.
2. El grado de contribución de cada uno expresado numéricamente y como porcentaje de un total.
3. El porcentaje acumulado de la contribución total de los contribuyentes clasificados.

Además de facilitar el análisis, la presentación de datos en forma de diagrama de Pareto realiza la comunicación de la información, especialmente para convencer a la alta dirección de la fuente de un problema y para ganar su apoyo para una propuesta de línea de acción que remedie el problema. [Para conocer un relato de cómo me equivoqué al nombrar el principio de Pareto, véase Juran (1975)].

Los muchos proyectos útiles. Según el principio de Pareto, los pocos proyectos vitales proporcionan el grueso de las mejoras, por lo que reciben la máxima prioridad. Más allá de los pocos proyectos vitales existen los muchos proyectos útiles. Colectivamente, contribuyen sólo a la menor parte de la mejora, pero contribuyen a la mayor parte de las oportunidades de participación de los empleados. La elección de estos proyectos se hace mediante el proceso de propuesta y selección.

EL PROCESO DE PROPUESTA Y SELECCIÓN

La mayor parte de los proyectos se elige mediante el proceso de propuesta y selección, que supone varios pasos:

- Propuesta del proyecto.
- Filtrado y selección del proyecto.
- Preparación y publicación de las declaraciones de misión del proyecto.

Fuentes de propuestas. Las propuestas de proyectos pueden proceder de todos los niveles de la organización. En los niveles altos, las propuestas tienden a ser extensas en tamaño (los pocos vitales) y de alcance multifuncional. En los niveles inferiores, las propuestas son más pequeñas en tamaño (los muchos útiles) y tienden a limitarse en su alcance al espacio de un solo departamento.

Las propuestas proceden de muchas fuentes, como:

- *Los sistemas organizados de datos*, tales como informes de operaciones sobre rendimiento del producto, quejas de los clientes, reclamaciones, devoluciones, etc.; informes contables sobre demandas por garantías y sobre costes internos de la baja calidad; e informes de llamadas al servicio de mantenimiento. (Algunos de estos sistemas de datos proporcionan el análisis de los datos para identificar las áreas con problemas) [véase un ejemplo de propuesta de proyecto basada en quejas de clientes, en Rassi (1991)].
- *Los estudios especiales*, como encuestas a los clientes, encuestas a los empleados, auditorías, evaluaciones, benchmarking de la calidad competitiva, etc.
- *Las reacciones de los clientes* que se han sentido insatisfechos con el producto son frecuentemente orales e insistentes. Por contraste, los clientes que juzgan que las caracte-

rísticas del producto no son competitivas pueden simplemente convertirse sin ruido en ex clientes.

- *La investigación de campo* derivada de visitas a los clientes, proveedores y otros; acciones emprendidas por los competidores, y relatos publicados en los medios de comunicación (como las reseñas de los servicios de ventas, servicio al cliente, servicio técnico y otros).
- *El impacto de la calidad en la sociedad*, como nueva legislación, extensión de la reglamentación gubernamental y aumento de las demandas jurídicas por responsabilidad por el producto.
- *La jerarquía directiva*, como el comité de calidad, los directores, supervisores, especialistas profesionales y equipos de proyectos.
- *Los trabajadores* mediante ideas informales presentadas a los supervisores, sugerencias formales, ideas de los círculos de calidad, etc.
- *Propuestas relativas a los procesos de empresa.*

Efecto del concepto de la Big Q (calidad integral). Desde principios de los años ochenta, el alcance de las propuestas de proyectos se ensanchó considerablemente bajo el concepto de la calidad integral (big Q) (véase información más detallada sobre el concepto de la calidad integral en el Capítulo 2, Figura 2.1).

La amplitud del concepto de la calidad integral es evidente a la vista de la gran variedad de proyectos ya abordados:

- Mejorar la precisión del pronóstico de ventas.
- Reducir la duración del ciclo de desarrollo de nuevos productos.
- Aumentar la tasa de éxito en las licitaciones a concursos.
- Reducir el tiempo requerido para formalizar los pedidos de los clientes.
- Reducir el número de cancelaciones de ventas.
- Reducir los errores en las facturas.
- Reducir el número de cuentas de morosos.
- Reducir el tiempo requerido para reclutar empleados nuevos.
- Mejorar la tasa de llegada a tiempo (para los servicios de transporte).
- Reducir el tiempo requerido para registrar patentes.

(Véanse ejemplos de muchos sectores en las conferencias IMPRO. Véase también *The Juran Report*). (Para más información sobre los proyectos en los procesos de empresa, véase el Capítulo 6, «Gestión de los procesos»).

Los procesos de propuestas. Las propuestas deben proceder de seres humanos. Los sistemas de datos son impersonales; no hacen propuestas. Se usan varios medios para estimular las propuestas de proyectos de mejora de la calidad:

- *Peticiones de propuestas.* Se utilizan cartas o boletines para invitar a todo el personal a presentar propuestas, bien a través de la cadena de mando o bien a un receptor designado, como el secretario del comité de calidad.
- *Hacer rondas.* Con este planteamiento, se encarga a especialistas (como los ingenieros de calidad) que visiten los distintos departamentos, hablen con las personas clave y consigan sus puntos de vista y propuestas.
- *Los mismos miembros del comité.* Se convierten en un punto central para los análisis de datos y propuestas.
- *Reuniones de tormenta de ideas.* Se organizan con el objetivo específico de hacer propuestas.

Cualquiera que sea el método, producirá el mayor número de propuestas si incita al uso del concepto de la calidad integral: la gama completa de actividades, productos y procesos.

Propuestas de los trabajadores. Los trabajadores son potencialmente una fuente de numerosas propuestas. Los trabajadores permanecen mucho tiempo en el lugar de trabajo. Allí están expuestos a muchos ciclos locales de actividad. A causa de esta exposición, están bien situados para identificar la existencia de problemas de claridad y teorizar sobre sus causas. En cuanto a los detalles de lo que ocurre en el lugar de trabajo, nadie está mejor informado que los trabajadores. «Esta máquina no ha visto a nadie de mantenimiento en los últimos seis meses». Además, muchos trabajadores están bien situados para identificar oportunidades y proponer nuevos modos de trabajo.

Las propuestas de los trabajadores consisten principalmente en muchos proyectos locales útiles, junto con propuestas del campo de las relaciones humanas. Para dichas propuestas, los trabajadores pueden suministrar teorías útiles sobre las causas, así como propuestas prácticas de remedio. Para proyectos de carácter multifuncional, la mayor parte de los trabajadores se ven dificultados por su conocimiento limitado del proceso global y de las interacciones entre los pasos que colectivamente constituyen el conjunto.

En algunas empresas, la petición de propuestas a los trabajadores llevaba implícito que dichas propuestas recibirían la máxima prioridad. El efecto fue que los trabajadores estaban decidiendo qué proyectos debería abordar primero la dirección. Debería haberse aclarado que las propuestas de los trabajadores debían competir con propuestas de otras fuentes.

Proyectos conjuntos con proveedores y clientes. Todas las empresas compran bienes y servicios a los proveedores; más de la mitad del contenido del producto acabado puede proceder de los proveedores. En otras décadas era corriente que los clientes sostuvieran que «el proveedor deberá resolver sus problemas de calidad». Actualmente existe una creciente concienciación de que estos problemas requieren un planteamiento compartido, basado en:

- Establecimiento de una confianza mutua.
- Definición de la calidad tanto en términos de necesidades de los clientes como de especificaciones.
- Intercambio de datos esenciales.
- Comunicación directa tanto en el nivel técnico como en el nivel comercial.

Este planteamiento gana impulso con los proyectos conjuntos entre proveedores y clientes. Ejemplos publicados incluyen:

- Alcoa y Kodak, relativo a placas fotográficas (Kegarise y Miller 1985).
- Alcoa y Nalco, relativo a lubricantes para los rebobinadores (Boley y Petska 1990).
- Alcoa y Phifer, relativo a cable de aluminio (Kelly et al. 1990).
- NCR y sus clientes, estableciendo un código universal para rastrear los fallos de producto a medida que avanzan por la cadena de clientes (Daughton 1987).

Los esfuerzos para servir a los clientes se ven retardados a veces por las acciones de los propios clientes.

Un fabricante de instrumentos tecnológicos se encontró con retrasos al instalar los instrumentos en los locales de los clientes, debido a la falta de preparación del emplazamiento. Cuando los instaladores llegaban al emplazamiento, no estaba colocada la cimentación, las líneas de suministro, como la del aire comprimido, no estaban todavía en su sitio, etc. La empresa analizó cierto número de estos retrasos y luego elaboró un vídeo sobre preparación del emplazamiento. La empresa envió este vídeo a los clientes en el momento de firmar el contrato. Una vez que el emplazamiento estaba preparado, los clientes enviaban un certificado notificándolo. El resultado fue una fuerte disminución del tiempo de instalación, mejora en la entrega a los clientes, así como reducción de costes (Comunicación al autor).

(Para más información sobre Comités de Calidad, véanse el Capítulo 13, «Despliegue estratégico», y el Capítulo 14, «Gestión de la calidad total»).

FILTRADO DE PROYECTOS

La petición de propuestas puede producir un gran número de respuestas, número que está más allá de la capacidad digestiva de la organización. En tales casos, un paso posterior esencial consiste en el *filtrado* para identificar aquellas propuestas que prometen más beneficios por el esfuerzo empleado.

Empezar con una larga lista de propuestas y terminar con una lista de proyectos acordados requiere un planteamiento organizado, una infraestructura y una metodología. El proceso de filtrado consume mucho tiempo, así que normalmente el comité de calidad lo delega en un secretariado, a menudo el Departamento de Calidad. El secretariado filtra las propuestas, juzga en qué medida las propuestas cumplen con los criterios establecidos más adelante. Estos juicios dan como resultado alguna toma de decisiones preliminar. Algunas propuestas son rechazadas. Otras son aplazadas. El resto se analiza en mayor profundidad para estimar sus beneficios potenciales, los recursos necesarios, etc.

El comité de calidad y/o el secretariado han encontrado útil establecer criterios para usar durante el proceso de filtrado. La experiencia ha mostrado que se necesitan dos clases de criterios:

1. Criterios para elegir los primeros proyectos que abordarán cada uno de los equipos de proyectos.
2. Criterios para elegir los proyectos posteriores.

Criterios para los primeros proyectos. Durante las etapas iniciales de la mejora proyecto a proyecto, todo el mundo se encuentra en la fase de aprendizaje. Se asignan los proyectos a equipos de proyectos que están aprendiendo. Completar un proyecto es parte de esta formación. La experiencia con dichos equipos ha desarrollado un criterio amplio: *El primer proyecto deberá ser un ganador*. Más específicamente:

- El proyecto deberá abordar un problema *crónico*, uno que ha estado esperando solución durante largo tiempo.
- El proyecto deberá ser *factible*. Deberá haber una gran probabilidad de completarlo dentro de unos pocos meses. Los datos de las empresas sugieren que la razón más frecuente del fallo del primer proyecto ha sido no cumplir con el criterio de ser factible.
- El proyecto deberá ser *significativo*. El resultado final deberá ser suficientemente útil como para merecer atención y reconocimiento.
- Los resultados deberán ser *medibles*, bien sea en dinero o en otros términos significativos.

Criterios para los proyectos posteriores. Estos criterios intentan seleccionar los proyectos que darán a la empresa el máximo beneficio:

- *Retorno sobre la inversión*. Este factor tiene mucho peso y es decisivo, en caso de que lo demás sea igual. Los proyectos que no se prestan a calcular el retorno sobre la inversión deberán confiarse a la opinión de la dirección para su prioridad.
- *El volumen de mejora potencial*. Un proyecto grande tendrá prioridad sobre varios pequeños.
- *Urgencia*. Puede haber necesidad de responder rápidamente a presiones asociadas con la seguridad del producto, la moral de los empleados o el servicio al cliente.
- *Facilidad de una solución tecnológica*. Proyectos para los que la tecnología esté bien desarrollada tendrán precedencia sobre proyectos que requieran investigación para descubrir la tecnología necesaria.
- *Salud de la línea de producto*. Proyectos que involucren a líneas de producto florecientes tendrán precedencia sobre proyectos que involucren a líneas de producto obsoletas.

- *Probable resistencia al cambio.* Proyectos que encontraren una acogida favorable tendrán precedencia sobre proyectos que puedan encontrar fuerte resistencia, sea de los sindicatos o de un directivo apegado a su sistema.

Algunas empresas usan un planteamiento sistemático para evaluar las propuestas según estos criterios. Esto proporciona una evaluación combinada que entonces se convierte en una indicación de las prioridades relativas de las propuestas. [Para un ejemplo, véase Hartman (1983); también De Wollf et al. (1987)].

SELECCIÓN DE PROYECTOS

El resultado final del proceso de filtrado es una lista de proyectos recomendados, por su orden de prioridad. Cada recomendación es defendida con la información disponible sobre compatibilidad con los criterios, beneficios potenciales, recursos requeridos, etc. Esta lista está normalmente limitada a materias en las que el comité de calidad tiene un interés directo.

El comité de calidad revisa las recomendaciones y toma la determinación final sobre qué proyectos han de abordarse. Estos proyectos se convierten entonces en parte oficial del negocio de la empresa. Otros proyectos recomendados quedan fuera del alcance del interés directo del comité de calidad. Dichos proyectos son recomendados a subcomités adecuados, directores, etc. Nada de lo anterior impide que los proyectos sean emprendidos a niveles locales por supervisores o por trabajadores.

Pocos vitales y muchos útiles. Durante los años ochenta, algunas empresas completaron muchos proyectos de mejora de la calidad. Luego, cuando se plantearon preguntas como «¿Qué hemos conseguido con todo este esfuerzo?», quedaron consternados al comprobar que no había efecto notable en los beneficios. La investigación mostró entonces que la razón era achacable al proceso usado para la selección de proyectos. Los proyectos finalmente seleccionados habían consistido en:

- *Proyectos apagafuegos.* Se trata de proyectos especiales para librarse de *picos* esporádicos. Tales proyectos no atacaron al desperdicio crónico y por tanto no podían mejorar los resultados financieros.
- *Muchos proyectos útiles.* Por definición, tienen sólo un efecto menor sobre los resultados financieros.
- *Proyectos para mejorar las relaciones humanas.* Pueden ser muy efectivos en su campo, pero los resultados financieros habitualmente no son medibles.

Conseguir un efecto significativo en los beneficios requiere seleccionar tanto los «pocos proyectos vitales» como los «muchos útiles». Es factible trabajar con ambos, ya que se asignan a cada uno distintas personas.

Existe una escuela de pensamiento que sostiene que la clave para el liderazgo en calidad es «pequeñas mejoras en mil sitios»; dicho de otro modo, los muchos útiles (Gross 1989). Otra escuela propugna el enfoque en los pocos vitales. Según mi experiencia, ninguna de las dos escuelas tiene toda la razón.

Los pocos proyectos vitales son los que más contribuyen al liderazgo en calidad y a los beneficios. Los muchos proyectos útiles son los que más contribuyen a la participación de los empleados y a la calidad de la vida laboral. Cada uno de ellos es necesario; ninguno por sí solo es suficiente.

Los pocos proyectos vitales y los muchos proyectos útiles pueden ejecutarse simultáneamente. Las empresas de éxito han hecho exactamente eso. Lo hicieron reconociendo que aunque hay estos dos tipos de proyectos, requieren el tiempo del personal de distintas categorías

de la empresa. La relación entre estos dos tipos de proyectos se muestra en la Figura 5.11. En esta figura, la escala horizontal es el tiempo. La escala vertical es el desperdicio crónico. Lo que va hacia arriba es malo. Las muchas mejoras útiles crearon colectivamente una línea gradualmente descendente. Las pocas mejoras clave, aunque menos frecuentes, constituyen el grueso de la mejora total.

Cifras del coste de los proyectos. Para cumplir con los criterios anteriores (especialmente los del retorno sobre la inversión) se necesita información sobre varios costes:

- El coste del desperdicio crónico asociado a una propuesta dada.
- La reducción potencial de costes si el proyecto tiene éxito.
- El coste del diagnóstico y remedios necesarios.

(Para ver la metodología que proporciona las cifras de costes, véase más arriba en el apartado Obtención de las cifras de costes).

Coste frente a porcentaje de deficiencias. Es arriesgado juzgar las prioridades basándose sólo en el porcentaje de deficiencias (errores, defectos, etc.). Según esto, cuando el porcentaje es bajo, la prioridad de la propuesta debería también ser baja. En algunos casos esto es verdad, pero en otros puede ser engañoso.

En una gran empresa de electrónica, el porcentaje de facturas rechazadas por los clientes era del 2,4 por ciento. Aunque resultaba incómodo, estaba por debajo de la media de procesos similares en el sector. Entonces un estudio mostró que casi la mitad del tiempo del personal de ventas se empleaba apaciguando a los clientes que protestaban y consiguiendo arreglar las facturas. Durante este tiempo, el personal de ventas no vendía nada (Comunicación al autor).

Más clamoroso aún fue el caso de las facturas de Florida Power and Light Company. Las facturas rechazadas llegaron a unas 60.000 al año, que era un 0,2 por ciento del total de facturas. El coste de arreglarlas llegó a ser de 2,1 millones de dólares al año. Entonces, un proyecto de mejora de la calidad rebajó el porcentaje de errores a un 0,05 por ciento, con un ahorro anual de más de un millón de dólares. Más importante aún fue la mejora de las relaciones con los clientes y la reducción de quejas ante la Public Utility Commission (Florida Power and Light Company 1984).

Proyectos tamaño elefante y tamaño mosca. Algunos proyectos son de «tamaño elefante», es decir, abarcan un área de actividad tan amplia que deben subdividirse en múltiples proyectos «tamaño mosca». En tales casos, se puede asignar un equipo de proyectos a «partir el elefante». Se asignan luego otros equipos a abordar los proyectos tamaño mosca resultan-

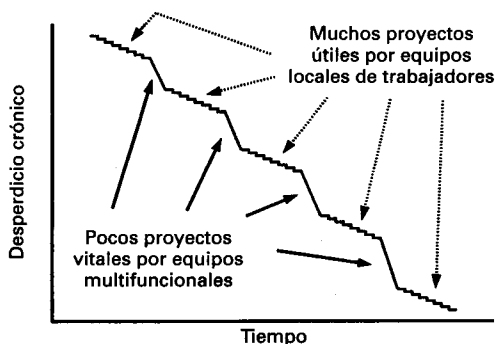


FIGURA 5.11 Interrelación de proyectos, pocos vitales y muchos útiles.

tes. Este planteamiento reduce el tiempo de completar el proyecto, ya que los equipos trabajan simultáneamente. Por el contrario, el uso de un solo equipo alarga el tiempo varios años. Aparece la frustración, los miembros del equipo cambian debido a las renunciaciones, el proyecto se eterniza y la moral baja.

En el caso de las facturas de Florida Power and Light Company, el proyecto requirió varios equipos, cada uno asignado a un segmento del proceso de facturación.

En Honeywell, Inc., un proyecto para mejorar el sistema de seguridad de la información requirió la creación de siete equipos, implicando a 50 miembros (véase Parvey 1990).

Una herramienta utilísima para partir el elefante es el análisis de Pareto. Para su aplicación, véase el ejemplo de la papelería dado anteriormente en Uso del Principio de Pareto.

Para los proyectos tamaño elefante se preparan declaraciones de misión separadas (véase más adelante) para el amplio equipo de coordinación y para cada equipo asignado a un proyecto tamaño mosca.

Clonación. Algunas empresas constan de múltiples unidades autónomas que muestran muchos puntos en común. Ejemplos muy extendidos son las cadenas de almacenes al por menor, los talleres de reparaciones, los hospitales, etc. En tales empresas, un proyecto de mejora de la calidad realizado con éxito en una unidad operativa se convierte lógicamente en una propuesta de aplicación a las otras unidades. Esto se conoce como *clonar el proyecto*.

Es muy frecuente que las otras unidades se resistan a aplicar la mejora a sus operaciones. Parte de esta resistencia es de carácter cultural (no se ha inventado aquí, etc.) Otro tipo de resistencia se puede deber a diferencias reales en las condiciones de operación. Por ejemplo, las centrales telefónicas realizan funciones similares para sus clientes. Sin embargo, algunas sirven principalmente a clientes industriales, mientras otras sirven principalmente a clientes residenciales.

La alta dirección se muestra remisa a ordenar a las unidades autónomas que clonen las mejoras originadas en otros sitios. Sin embargo, la clonación tiene ventajas. Si es factible, proporciona mejoras adicionales de la calidad sin necesidad de duplicar el trabajo anterior de diagnóstico y diseño del remedio. Se presenta un proceso de este tenor:

- Se pide a los equipos de proyectos que incluyan en su informe final sus sugerencias sobre los sitios (puntos, emplazamientos, lugares) que puedan presentar oportunidades de clonación.
- Copias de dichos informes van a esos sitios.
- La decisión de clonar o no se toma en esos sitios.

No obstante, se requiere de los sitios que den una respuesta sobre su posición en el asunto. La respuesta normalmente es una de estas tres:

1. Hemos adoptado la mejora.
2. Adoptaremos la mejora, pero primero debemos adaptarla a nuestras condiciones.
3. No somos capaces de adoptar la mejora por los motivos siguientes.

En efecto, este proceso requiere que las unidades adopten la mejora o den sus motivos para no hacerlo. Las unidades no pueden ignorar tranquilamente la recomendación.

Una forma más sutil pero familiar de clonar es hacerlo mediante proyectos que tengan una aplicación repetitiva a una gran variedad de asuntos.

Un equipo de proyectos desarrolla software de ordenador para encontrar errores de ortografía. Otro equipo mejora un procedimiento para procesar los pedidos de los clientes en la empresa. Un tercer equipo elabora un procedimiento para realizar revisiones de diseño.

Lo común entre dichos proyectos es que el resultado final permite la aplicación repetitiva del mismo proceso a una gran variedad de asuntos: muchas palabras distintas mal escritas, muchos pedidos diferentes de clientes y muchos diseños distintos.

DECLARACIONES DE MISIÓN PARA LOS PROYECTOS

Cada proyecto seleccionado debe ser acompañado de una declaración de misión escrita que establezca el resultado final perseguido para el proyecto. Al aprobarse, esta declaración define la misión del equipo asignado a la ejecución del proyecto.

Propósito de las declaraciones de misión. La declaración de misión sirve a varios propósitos esenciales:

- Define el resultado final perseguido y ayuda al equipo a saber cuándo ha completado el proyecto.
- Establece una clara responsabilidad: la misión se suma a la descripción de tareas de cada miembro del equipo.
- Proporciona legitimidad: el proyecto se convierte oficialmente en asunto de la empresa. Se autoriza a los miembros del equipo a emplear el tiempo necesario en la ejecución de la misión.
- Confiere derechos: el equipo tiene el derecho de reunirse, pedir a las personas que atiendan y apoyen al equipo, y a demandar datos y otros servicios pertinentes al proyecto.

Las metas numéricas. La declaración de misión ideal cuantifica dos elementos críticos: (1) el volumen de mejora perseguido y (2) el calendario.

Ejemplos de dicha declaración de misión, a continuación:

- Durante el próximo año fiscal, reducir el tiempo para despachar los pedidos de los clientes hasta una media de 1,5 días.
- Reducir la tasa de averías del producto X en un 50 por ciento en los próximos 3 años.

Las cifras que componen las metas tienen su origen en varias fuentes. Pueden originarse en:

- Demandas de clientes que tienen sus propias metas que alcanzar.
- Acciones emprendidas por competidores, con las amenazas inherentes a la cuota de mercado.
- Benchmarking para encontrar los mejores resultados conseguidos en el momento. (El hecho de que se han alcanzado es que son alcanzables).

En algunos casos, la información disponible no es suficiente para basar en un planteamiento científico el establecimiento de metas. De aquí que el establecimiento de metas se haga por consenso, por un «jurado de opinión».

La perfección como meta. Hay un acuerdo universal de que la perfección es la meta ideal: completamente libre de errores, defectos, fallos, etc. La realidad es que la ausencia de perfección se debe a muchas clases de tales deficiencias y que cada una requiere su propio proyecto de mejora. Si una empresa intenta eliminarlas todas, el principio de Pareto es de aplicación:

- Las pocas deficiencias clave causan la mayor parte de los problemas, pero también justifican fácilmente los recursos necesarios para desarraigarlas. De aquí que reciban una alta prioridad durante el proceso de filtrado y se conviertan en proyectos a abordar.
- Los restantes tipos de deficiencias causan sólo una pequeña parte de los problemas. A medida que uno se acerca a la perfección, cada clase de deficiencia que queda se convierte en más y más rara, y por tanto recibe una prioridad más y más baja durante el proceso de filtrado.

Todas las empresas abordan esos tipos raros de fallos que amenazan la vida humana o que suponen una pérdida económica significativa. Además, las empresas que introducen miles de

mejoras cada año abordan incluso las clases de deficiencias menores y raras. Para hacerlo, incorporan la creatividad de los trabajadores a través de medios como los círculos de calidad.

Algunos críticos sostienen que la declaración de cualquier meta distinta de la perfección es prueba de una política descaminada: una disposición a tolerar defectos. Tales argumentos surgen de la falta de experiencia con la realidad. Es fácil fijar metas que demanden la perfección. Dichas metas, no obstante, requieren empresas que aborden tipos de fallos tan raros que no sobrevivan al proceso de filtrado.

Sin embargo, se han hecho algunos progresos. Durante el siglo XX ha habido una notable revisión de la unidad de medida de las deficiencias. En la primera mitad del siglo, la medida habitual era en porcentaje de defectos o defectos por cien unidades. En los años noventa, muchos sectores han adoptado una medida de defectos por millón de unidades. Las empresas líderes actualmente introducen miles de mejoras año tras año. Están acercándose a la perfección, pero esto es un proceso sin fin.

Aunque muchos proyectos propuestos no se pueden justificar solamente por su retorno sobre la inversión, pueden proporcionar los medios para la participación de los empleados en el proceso de mejora, lo que tiene un valor en sí mismo.

Publicación de las declaraciones de misión. La publicación de las declaraciones de misión convierte a un proyecto en parte oficial del negocio de la empresa. Sin embargo, el comité de calidad no puede predecir con precisión con qué se encontrará el equipo del proyecto cuando lo aborde. La experiencia con numerosos proyectos ha proporcionado pautas sobre qué incluir (y excluir) en las declaraciones de misión:

- *Qué incluir.* Una declaración de misión puede incluir información sobre la importancia del problema. Puede incluir datos sobre el actual nivel de rendimiento, así como declarar la meta perseguida. Puede incluir otra información sobre hechos, como síntomas conocidos del problema.
- *Qué no incluir.* La declaración de misión no deberá incluir nada que pueda sesgar el planteamiento del equipo del proyecto, como teorías sobre las causas del problema o preguntas deliberadas. La declaración también deberá evitar el uso de términos amplios (problemas personales, comunicación, etc.), porque no hay acuerdo sobre sus definiciones.

(Lo dicho anteriormente se ha extraído de materiales de formación de Aluminium Company of America).

Algunas empresas separan la declaración del problema de la declaración de misión. En una empresa holandesa, el comité de calidad publicó una declaración del problema del modo siguiente:

El tiempo que requieren los componentes relacionados con el proyecto, desde su llegada hasta estar a disposición de los departamentos de producción, es demasiado largo y provoca retrasos e interrupciones en la producción.

La consiguiente declaración de misión decía lo siguiente:

Investigar las causas de este problema y recomendar remedios que lleven a una reducción de un 50 por ciento en los retrasos en la producción en un plazo de 3 meses después de su implantación. Un cálculo preliminar estimó el ahorro potencial en aproximadamente 800.000 florines holandeses (400.000\$) (Smidt y Doesema 1991).

Revisión de las declaraciones de misión. A medida que avanza el trabajo en el proyecto, la nueva información aparecida puede sugerir que se hagan cambios en la declaración de misión, cambios como los siguientes:

- El proyecto es mayor de lo anticipado; deberá ser subdividido.
- El proyecto deberá aplazarse porque existe un requisito previo que hay que ejecutar antes.

- El proyecto deberá cambiar de dirección porque hay una alternativa más atractiva.
- El proyecto deberá abortarse porque se bloqueará cualquier remedio.

Los equipos de proyectos se han mostrado, en general, reacios a volver al comité de calidad para una revisión de la declaración de misión. Parece existir miedo a que tal acción pueda ser interpretada como un fallo en la realización de la misión o como una admisión de derrota. El resultado puede ser la persecución obstinada de una misión que está condenada al fracaso.

El comité de calidad deberá dejar claro a todos los equipos de proyectos que tienen el deber y el derecho de recomendar la revisión de la declaración de misión si la revisión es necesaria. Este mismo punto deberá también subrayarse durante la formación de los equipos de proyectos.

EL EQUIPO DEL PROYECTO

A cada proyecto seleccionado se le asigna un equipo. Este equipo se convierte entonces en responsable de completar el proyecto.

¿Por qué un equipo? Los proyectos más importantes son los pocos vitales y son, invariablemente, de carácter multifuncional. Los síntomas habitualmente aparecen en un departamento, pero no hay acuerdo sobre dónde están las causas, cuáles son las causas o cuáles deberán ser los remedios. La experiencia ha enseñado que el mecanismo organizativo más efectivo para tratar con dichos problemas multifuncionales son los equipos multifuncionales.

Algunos directivos prefieren asignar los problemas a personas individuales más que a equipos («Un camello es un caballo diseñado por un comité»). El concepto de responsabilidad civil es de hecho muy apropiado si se aplica al control de calidad («La mejor forma de control es el autocontrol»). No obstante, la mejora, ciertamente para los problemas multifuncionales, requiere, por naturaleza, equipos. Para tales problemas, la asignación a personas individuales corre grave riesgo de sesgos departamentales en el diagnóstico y remedio.

Un ingeniero de procesos fue asignado a reducir el número de defectos procedentes de un proceso de soldadura por ola. Su diagnóstico concluyó que se necesitaba un proceso nuevo. La dirección rechazó esta conclusión, con el argumento de una excesiva inversión. Se nombró entonces un equipo multifuncional para volver a estudiar el problema. El equipo halló un modo de resolver el problema refinando el proceso existente (Betker 1983).

Los prejuicios individuales aparecen también como resistencia cultural a los remedios propuestos. Sin embargo, tal resistencia es mínima si el departamento que ha de poner el remedio ha estado representado en el equipo del proyecto.

Nombramiento de los equipos; patrocinadores. Los equipos del proyecto no están sujetos a la cadena de mando del organigrama de la empresa. Esto puede ser un inconveniente en el caso de que los equipos se encuentren en un callejón sin salida. Por esta razón, algunas empresas asignan miembros del comité u otros altos directivos para que sean patrocinadores (o «campeones») de proyectos específicos. Estos patrocinadores siguen el progreso del equipo (o la falta de progreso). Si el equipo se encuentra en un callejón sin salida, el patrocinador debe ser capaz de conseguir el acceso a la persona adecuada dentro de la jerarquía.

Los equipos son nombrados por los patrocinadores del proyecto, por los propietarios del proceso, por los directores locales o por otros. En algunas empresas, los trabajadores están autorizados a formar equipos (círculos de calidad, etc.) para trabajar en los proyectos de mejora. Sea cual sea el origen, el equipo tiene la autoridad de hacer la mejora tal como está definida en la declaración de misión.

La mayor parte de los equipos se organiza para un proyecto específico y se disgrega al completarse el proyecto. Se conocen a dichos equipos como *ad hoc*, que significa «para este propósito». Durante su próximo proyecto, los miembros estarán dispersos entre varios equipos diferentes. Existen también equipos «permanentes» que tienen continuidad: los miembros permanecen juntos y abordan proyecto tras proyecto.

Responsabilidades y derechos. Un equipo de proyecto tiene derechos y responsabilidades que coexisten con la declaración de misión. Las responsabilidades básicas son llevar a cabo la misión asignada y seguir el proceso universal de mejora (véase más adelante). Además, las responsabilidades incluyen:

- Proponer revisiones de la declaración de misión.
- Desarrollar medidas cuando sean necesarias.
- Comunicar el progreso y los resultados a todos los que tienen necesidad de saberlo.

Los derechos de los equipos fueron establecidos anteriormente, bajo Propósito de la declaración de misión: convocar reuniones, pedir ayuda, y demandar datos y otros servicios necesarios para el proyecto.

Miembros. El equipo es seleccionado por el patrocinador después de consultar con los directores afectados. El proceso de selección incluye la consideración de (1) qué departamentos deberán estar representados en el equipo; (2) de qué nivel de la jerarquía deberán proceder los miembros del equipo, y (3) qué personas concretas de ese nivel.

Los departamentos representados deberán incluir:

- *El departamento enfermo.* Los síntomas aparecen en este departamento, que sufre sus efectos.
- *Los departamentos sospechosos.* Son sospechosos de provocar las causas (no están necesariamente de acuerdo en ser los sospechosos).
- *Los departamentos reparadores.* Son los que, probablemente, proporcionarán los remedios. Esto es especulativo, ya que en muchos casos las causas y los remedios son una sorpresa.
- *Los departamentos de diagnóstico.* Son necesarios en los proyectos que requieren una recogida extensiva de datos y su análisis.
- *Departamentos a la demanda.* Se les invita cuando se les necesita para proporcionar conocimientos especiales u otros servicios requeridos por el equipo (Black y Stump 1987).

Esta lista incluye las fuentes de miembros habituales. No obstante, se necesita flexibilidad.

En una empresa, una vez que el equipo estaba trabajando, se dio cuenta de que el cliente interno—un «centro hermano»—no estaba representado. Se hicieron las gestiones para invitar al centro y evitar una relación de «nosotros contra ellos» (Black y Stump 1987).

La elección del nivel jerárquico depende de asunto objeto del proyecto. Algunos proyectos se relacionan fuertemente con los aspectos tecnológicos y de procedimiento de los productos y los procesos. Dichos proyectos requieren que los miembros del equipo sean de los niveles jerárquicos inferiores. Otros proyectos se relacionan con asuntos generales del negocio y la gestión. Para dichos proyectos, los miembros del equipo deberán tener una adecuada experiencia del negocio y la gestión.

Finalmente, llega la selección de las personas concretas. Esto se negocia con los respectivos supervisores, teniendo en cuenta la carga de trabajo, las prioridades en competencia, etc. El enfoque está en la aptitud de la persona concreta para contribuir al equipo del proyecto. Las personas concretas necesitan:

- *Tiempo* para acudir a las reuniones de equipo y para realizar los encargos fuera de las reuniones, «el trabajo individual».

- *Una base de conocimientos* que permita a las personas concretas aportar teorías, puntos de vista e ideas, así como información basada en su experiencia.
- *Formación* en el proceso de mejora de la calidad y sus herramientas asociadas. Durante los primeros proyectos, esta formación puede y debe hacerse coincidiendo con la realización de los proyectos.

La mayoría de los equipos consta de seis a ocho miembros. Números mayores tienden a hacer un equipo improductivo a la vez que costoso (Un convoy viaja tan rápido como el barco más lento).

¿Deberán proceder todos los miembros del equipo del mismo nivel en la jerarquía? Detrás de esta pregunta está el miedo de que las opiniones de los miembros de alto rango domine la reunión. Algo de esto, sin duda, ocurre, especialmente durante las primeras reuniones. No obstante, disminuye a medida que se impone la dinámica de grupo y a medida que los miembros aprenden a distinguir entre teoría y hechos.

Una vez seleccionado el equipo, se hacen públicos los nombres de sus miembros, junto con su misión de proyecto. El acto de publicación asigna oficialmente la responsabilidad a las personas concretas, así como al equipo. En efecto, servir en el equipo del proyecto se convierte en parte de la descripción de las tareas de las personas concretas. Esta misma publicación da también al equipo la legitimidad y derechos tratados anteriormente.

Miembros de la fuerza de trabajo. Durante los primeros años de utilización de los equipos de mejora de la calidad, las empresas tendían a mantener una separación estricta de los miembros del equipo. Los equipos de proyectos multifuncionales constaban exclusivamente de miembros de la jerarquía directiva, más especialistas profesionales. Los equipos de proyectos departamentales locales (como los círculos de calidad) constaban exclusivamente de miembros de la fuerza de trabajo. La Figura 5.12 compara las características habituales de los círculos de calidad con las de los equipos multifuncionales.

La experiencia enseñó entonces que en cuanto a los detalles de las condiciones de operación, nadie está mejor informado que la fuerza de trabajo. A través de su permanencia en el lugar de trabajo, los trabajadores pueden observar los cambios locales y recordar la cronología de los hechos. Esto ha llevado a la práctica creciente de conseguir dicha información entrevistando a los trabajadores. Los trabajadores se han convertido en miembros de equipos «a demanda».

Estas mismas entrevistas han descubierto que muchos trabajadores pueden aportar mucho más que el simple conocimiento de las condiciones del lugar de trabajo. Pueden teorizar sobre las causas. Tienen ideas para los remedios. Además, se ha hecho evidente que tal participación mejora las relaciones humanas al contribuir a la satisfacción en el trabajo.

Característica	Círculos de calidad	Equipos de proyectos
Propósito primario	Mejorar las relaciones humanas.	Mejorar la calidad.
Propósito secundario	Mejorar la calidad.	Mejorar la participación.
Alcance del proyecto	Dentro de un solo departamento.	Multidepartamental.
Tamaño del proyecto	Uno de los muchos útiles.	Uno de los pocos vitales.
Miembros	De un solo departamento.	De múltiples departamentos.
Base para ser miembro	Voluntario.	Designado.
Categoría jerárquica de los miembros	Típicamente entre los trabajadores.	Típicamente directivo o profesional.
Continuidad	El círculo permanece intacto, proyecto tras proyecto.	El equipo es <i>ad hoc</i> , se disgrega una vez completado el proyecto.

FIGURA 5.12 Contraste entre círculos de calidad y equipos multifuncionales (*Fuente: Making Quality Happen, 1988, Juran Institute, Wilton, CT, p. D30*).

Un resultado de toda esta experiencia ha sido un interés creciente por ampliar la participación de los trabajadores en general. Esto ha llevado a experimentar con equipos de proyectos que no hagan distinciones sobre el rango jerárquico. Estos equipos pueden convertirse en la regla más que en la excepción. (Para más información sobre las tendencias en la participación de los trabajadores, véase el Capítulo 15, «Recursos humanos y calidad»).

Altos directivos en los equipos. Algunos proyectos requieren por su naturaleza que el equipo incluya miembros de las filas de la alta dirección. Damos a continuación algunos ejemplos de proyectos de mejora de la calidad que fueron ejecutados realmente por equipos que incluían altos directivos:

- Acortar el tiempo para poner productos nuevos en el mercado.
- Mejorar la precisión de los pronósticos de ventas.
- Reducir el traspaso de características anteriores propensas al fallo a los nuevos modelos de productos.
- Establecer relaciones de trabajo en equipo con los proveedores.
- Desarrollar las nuevas medidas de calidad necesarias para la planificación estratégica de la calidad.
- Revisar el sistema de reconocimiento y recompensa por mejoras de la calidad.

Hay algunas razones convincentes para instar a todos los altos directivos a trabajar personalmente en algunos equipos de proyectos. La participación personal en equipos de proyectos es un acto de liderazgo mediante el ejemplo. Es la forma superior de liderazgo. La participación personal en equipos de proyectos permite también que los altos directivos comprendan lo que están pidiendo que hagan sus subordinados, qué clase de formación se necesita, cuántas horas por semana se piden, cuántos meses llevará completar el proyecto y qué clases de recursos se necesitarán. La falta de comprensión por la alta dirección de tales realidades ha contribuido al fallo de algunas iniciativas bienintencionadas para establecer mejoras anuales de la calidad.

En una empresa, de 150 proyectos de mejora de la calidad abordados, 12 incluían equipos compuestos de directivos superiores (Egan 1985).

[Véase en Pelletier (1990) el relato de un alto directivo de su experiencia en un equipo de proyecto].

Modelo de la infraestructura. Hay varios modos de mostrar en forma gráfica la infraestructura de la mejora de la calidad, los elementos de la organización, cómo se relacionan entre ellos, y el flujo de los sucesos. La Figura 5.13 muestra los elementos de la infraestructura en

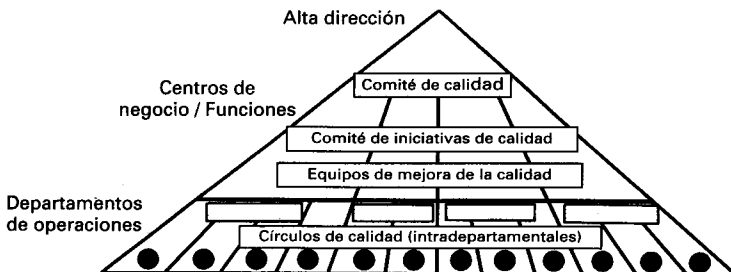


FIGURA 5.13 Modelo de la infraestructura de la mejora de la calidad (Fuente: Visual GMQ15, Juran Institute, Inc., Wilton, CT).

forma piramidal. La pirámide describe una jerarquía consistente en alta dirección, unidades de operaciones autónomas y principales funciones administrativas. En la cima de la pirámide está el comité de calidad y los comités subsidiarios, si los hay. Por debajo de estos niveles están los equipos multifuncionales de mejora de la calidad. (Puede haber una estructura de comité entre el comité de calidad y los equipos).

En el nivel *intradepartamental* están los equipos de la fuerza de trabajo (círculos de calidad y otras formas). Esta infraestructura permite que empleados de todos los niveles de la organización participen en los proyectos de mejora de la calidad, tanto en los muchos útiles como en los pocos vitales.

ORGANIZACIÓN DEL EQUIPO

Los equipos de mejora de la calidad no aparecen en el gráfico de la organización. Todos ellos «flotan»; no tienen jefe personal. En vez de eso, el equipo está supervisado *impersonalmente* por una declaración de misión y por la guía de mejora de la calidad.

El equipo sí que tiene una estructura organizativa interna. Esta estructura incluye invariablemente un *líder* de equipo (presidente) y un *secretario* de equipo. Además, hay habitualmente un *facilitador*.

El líder del equipo. El líder habitualmente es nombrado por el patrocinador (el comité de calidad u otro grupo supervisor). Otras veces se autoriza al equipo a elegir un líder.

El líder tiene varias responsabilidades. Como miembro del equipo, el líder *comparte* la responsabilidad de completar la misión del equipo. Además, el líder tiene deberes administrativos. Éstos *no se comparten*, e incluyen:

- Conseguir que las reuniones empiecen y acaben puntualmente.
- Ayudar a los miembros a acudir a las reuniones de equipo.
- Conseguir que las agendas, actas, informes, etc., se preparen y hagan públicas.
- Mantener contactos con el organismo patrocinador.

Finalmente, el líder tiene la responsabilidad de supervisión. Esto no se lleva a cabo mediante el poder del mando (el líder no es el jefe del equipo). Se realiza mediante el poder del liderazgo. Las responsabilidades incluyen:

- Orquestrar las actividades del equipo.
- Estimular la contribución de todos los miembros.
- Ayudar a resolver conflictos entre los miembros.
- Asignar los trabajos individuales a hacer entre las reuniones.

Cumplir con estas responsabilidades requiere múltiples habilidades, que incluyen:

- Una capacidad experimentada en liderar personas.
- Familiaridad con el asunto objeto de la misión.
- Una comprensión firme del proceso de mejora de la calidad y de sus herramientas asociadas.

El secretario del equipo. El secretario del equipo es nombrado por el patrocinador o, con más frecuencia, por el líder del equipo. En ambos casos, el secretario es habitualmente un miembro del equipo del proyecto. Como tal, comparte la responsabilidad de llevar a cabo la misión del equipo.

Además, el secretario tiene responsabilidades administrativas no compartidas, en especial, preparar las agendas, actas, informes, etc. Estos documentos son importantes. Son los principales medios que tiene el equipo de comunicarse con el resto de la organización. También se

convierte en la principal fuente de referencia para los miembros del equipo y para otros. Todo lo cual sugiere que una importante cualificación para el nombramiento del puesto de secretario es la capacidad de escribir con precisión.

Los miembros del equipo. Los «miembros del equipo», tal como se usa aquí, incluyen al líder y al secretario del equipo. Las responsabilidades de cualquier miembro del equipo consisten principalmente en lo siguiente:

- Disponerlo todo para acudir a las reuniones de equipo.
- Representar a su departamento.
- Aportar conocimientos de la tarea y experiencia práctica.
- Proponer teorías de causas e ideas de remedio.
- Discutir constructivamente las teorías e ideas de otros miembros del equipo.
- Presentarse voluntario o aceptar asignaciones de trabajo individual.

Encontrar el tiempo para trabajar en los proyectos. Trabajar en equipos de proyectos consume mucho tiempo. Asignar a alguien a un equipo de proyecto añade a esa persona alrededor de un 10 por ciento de carga de trabajo. Este tiempo añadido se necesita para acudir a las reuniones de equipo, realizar el trabajo individual asignado, etc. Encontrar tiempo para hacer todo esto es un problema a resolver, ya que este trabajo añadido se echa sobre los hombros de personas que ya están ocupadas al completo.

Ningún alto directivo que yo conozca ha estado dispuesto a resolver el problema contratando más personal para suplir el tiempo demandado por los proyectos de mejora. En lugar de eso, se ha dejado a cada miembro del equipo que resuelva el problema a su manera. Los miembros del equipo, a su vez, han adoptado estrategias tales como:

- Delegar más actividades en los subordinados.
- Retardar el trabajo de las actividades de prioridad inferior.
- Mejorar la gestión del tiempo empleado en las responsabilidades tradicionales.
- Buscar actividades en marcha que se puedan terminar. (En varias empresas ha habido una clara tendencia a deshacerse de trabajo innecesario para conseguir tiempo para los proyectos de mejora).

Cuando los proyectos empiezan a mostrar altos retornos sobre la inversión, el clima cambia. Los altos directivos se hacen más receptivos a la provisión de recursos. Además, los proyectos exitosos empiezan a reducir las cargas de trabajo que anteriormente estaban infladas por la presencia de desperdicios crónicos. [En relación con la organización del equipo, véase AT&T Quality Library, Quality Improvement Cycle (1988, pp.7-12). En relación con las reuniones de equipo, véase también AT&T Quality Improvement Team Helper (1990, pp. 17-21)].

FACILITADORES

La mayor parte de las empresas utiliza consultores internos, llamados normalmente «facilitadores», para ayudar a los equipos de mejora de la calidad, principalmente a los equipos que están trabajando en sus primeros proyectos. Un facilitador no es un miembro del equipo y no tiene la responsabilidad de llevar a cabo la misión del equipo (el significado literal de la palabra *facilitar* es «hacer las cosas fáciles»). El primer papel del facilitador es ayudar al equipo a llevar a cabo su misión.

Los papeles. Los habituales papeles de los facilitadores consisten en una selección de los siguientes:

- *Explicar las intenciones de la empresa.* El facilitador habitualmente ha asistido a las sesiones informativas que explican lo que la empresa trata de lograr. Gran parte de esa información es de interés para los equipos de proyectos.
- *Ayudar en la creación del equipo.* El facilitador ayuda a los miembros del equipo a aprender a contribuir al esfuerzo del equipo: proponer teorías, discutir las teorías de otros, y/o proponer líneas de investigación. Cuando el concepto de equipo sea nuevo para una empresa, este papel puede requerir trabajar directamente con las personas concretas para estimular a los que se sientan inseguros sobre cómo contribuir y para contener a los excesivamente entusiastas. El facilitador puede también evaluar el progreso en la creación del equipo y proporcionar información sobre ello al equipo.
- *Ayudar en la formación.* La mayoría de los facilitadores se ha formado en creación de equipos y en el proceso de mejora de la calidad. Habitualmente han servido de facilitadores en otros equipos. Tales experiencias les califican para ayudar a adiestrar a equipos de proyectos en varias áreas: creación del equipo, guía de mejora de la calidad y uso de las herramientas.
- *Relatar experiencias de otros proyectos.* Los facilitadores tienen múltiples fuentes para tales experiencias:
 - Equipos de proyectos a los que han servido previamente.
 - Reuniones con otros facilitadores para compartir experiencias de facilitación a los equipos de proyectos.
 - Informes finales publicados de equipos de proyectos.
 - Proyectos publicados en libros.
- *Ayudar a redirigir el proyecto.* El facilitador mantiene un punto de vista imparcial que ayuda a detectar cuándo el equipo está en un atolladero. A medida que el equipo va metiéndose en el proyecto, puede encontrarse cada vez más hundido en una ciénaga. La misión del proyecto puede resultar demasiado grande, vagamente definida o no realizable. El facilitador normalmente puede notar tales situaciones antes que el equipo y puede ayudar a guiarlo hacia una redirección del proyecto.
- *Ayudar al líder del equipo.* Los facilitadores proporcionan ayuda de varias maneras:
 - Ayudar a planificar las reuniones de equipo. Se puede hacer con el líder del equipo antes de cada reunión.
 - Estimular la asistencia. La mayor parte de las inasistencias se debe a demandas del tiempo de un miembro del equipo que entran en conflicto. El remedio a menudo debe venir del jefe del miembro del equipo.
 - Mejorar las relaciones humanas. Algunos equipos incluyen miembros que no han estado en buenas relaciones o que desarrollan fricciones a medida que el proyecto sigue su curso. El facilitador, como «extraño», puede ayudar a dirigir las energías de tales miembros hacia canales constructivos. Dicha acción normalmente tiene lugar fuera de las reuniones del equipo (algunas veces el líder es parte del problema. En tales casos, el facilitador puede ser el mejor situado para ayudar).
 - Ayudar en asuntos ajenos a la esfera de actividad del equipo. Los proyectos a veces requieren decisiones o acciones de fuentes que quedan fuera del alcance del equipo. Los facilitadores pueden ser de ayuda debido a su más amplio rango de contactos.
- *Apoyar a los miembros del equipo:* Este apoyo se suministra de múltiples modos:
 - Mantener al equipo enfocado en la misión haciendo preguntas cuando el enfoque deriva.
 - Objetar las afirmaciones empecinadas con preguntas como «¿Hay hechos que apoyen esa teoría?».
 - Proporcionar al equipo información sobre el trabajo basada en la percepción de ver al equipo en acción.
- *Informar del progreso a los comités.* En este papel, el facilitador es una parte del proceso colectivo de información sobre el progreso de los proyectos. Cada equipo de proyec-

to redacta actas de sus reuniones. En su momento, también cada equipo redacta un informe final, con frecuencia incluyendo una presentación oral al comité. Sin embargo, los informes sobre los proyectos de forma colectiva requieren un proceso adicional. Los facilitadores son frecuentemente una parte de esta red informativa adicional.

Las cualificaciones. Los facilitadores se someten a una formación especial que les cualifica para los papeles mencionados. La formación incluye habilidades en creación de equipo, resolución de conflictos, comunicación y gestión del cambio; conocimiento relativo a los procesos de mejora de la calidad, v.g., la guía de mejora y las herramientas y técnicas, y el conocimiento de las relaciones de la mejora de la calidad con las políticas y metas de la empresa. Además, los facilitadores adquieren madurez sirviendo en equipos de proyectos y proporcionando facilitación a los equipos.

Esta formación y experiencia previas son activos esenciales del facilitador. Sin ellas, tendrá grandes dificultades en ganarse el respeto y la confianza del equipo del proyecto.

Fuentes y desempeño. La mayoría de las empresas son conscientes de que lanzarse a un ritmo alto de mejora de la calidad requiere una facilitación extensiva. A su vez, esto requiere una acumulación de facilitadores entrenados. No obstante, la facilitación se necesita especialmente durante la fase de arranque. Luego, a medida que los líderes y miembros del equipo adquieren formación y experiencia, hay menos necesidad de apoyo del facilitador. El trabajo de acumulación se convierte en una tarea de mantenimiento.

Estas fases de nacimiento y declive han hecho que la mayor parte de las empresas evite crear facilitadores a tiempo completo o un concepto de carrera de facilitador. La facilitación se hace a tiempo parcial. Los facilitadores pasan la mayor parte de su tiempo en su puesto de trabajo regular. [Para un ejemplo interesante del proceso de pensamiento de una empresa sobre la cuestión de facilitadores a tiempo completo *versus* facilitadores a tiempo parcial, véanse Kinosz e Ice (1991). Véase también Sterett (1987)].

Una fuente importante de facilitadores son los supervisores de línea. Está aumentando la conciencia de que el servicio como facilitador proporciona un cúmulo de experiencia que resulta una ayuda para su tarea regular. En algunas empresas, este concepto se utiliza deliberadamente. La asignación a facilitación sirve también de fuente de formación para la gestión de la calidad. Una segunda fuente importante de facilitadores son los especialistas. Se extraen del Departamento de Recursos Humanos o del Departamento de Calidad. Todos se someten a la formación necesaria susodicha.

Una minoría de grandes empresas utiliza una categoría de especialistas a tiempo completo llamada «director de mejora de la calidad» (o algo similar). Después de una formación intensiva en el proceso de mejora de la calidad, estos directores se dedican a tiempo completo a la actividad de mejora de la calidad. Sus responsabilidades van más allá de facilitar los equipos de proyectos, y pueden incluir:

- Ayudar en la propuesta y filtrado de proyectos.
- Dirigir cursos de formación sobre el proceso de mejora de la calidad.
- Coordinar las actividades del equipo del proyecto con los de otras actividades de la empresa.
- Ayudar en la preparación de informes resumidos para la alta dirección.

(Para más información sobre los facilitadores y sus papeles, véase «Quality Improvement Team Helper», una parte de AT&T Quality Library).

LA SECUENCIA UNIVERSAL DE LA MEJORA DE LA CALIDAD

Un equipo de mejora de la calidad no tiene jefe personal. En vez de eso, el equipo está supervisado *impersonalmente*. Sus responsabilidades están definidas en:

- *La declaración de misión del proyecto*. Esta declaración de misión es única para cada equipo.
- *La secuencia universal*² (o *guía*) *de la mejora de la calidad*. Es idéntica para todos los equipos. Define las acciones que ha de emprender el equipo para cumplir con su misión.

De algunos pasos de la secuencia universal hemos tratado ya en este capítulo: prueba de su necesidad, propuesta y selección del proyecto, y nombramiento de los equipos del proyecto. El equipo del proyecto tiene la principal responsabilidad de los pasos que ahora siguen: emprender los dos «viajes».

Los dos viajes. La secuencia universal incluye una serie de pasos que se agrupan en dos viajes:

1. El *viaje de diagnóstico* desde el síntoma a la causa. Incluye analizar los síntomas, teorizar sobre las causas, someter a test las teorías y establecer las causas.
2. El *viaje de remedio* desde la causa al remedio. Incluye desarrollar los remedios, probar los remedios en condiciones operativas, ocuparse de la resistencia al cambio y establecer controles para mantener los logros.

El diagnóstico es un planteamiento factual y requiere una firme comprensión del significado de las palabras clave. Resulta útil definir desde el principio algunas de estas palabras clave.

Definición de las palabras clave

- Un «defecto» es cualquier estado de no adecuación al uso o no conformidad con las especificaciones. Ejemplos son: factura ilegible, el sobredimensionado y el bajo tiempo medio entre fallos. Incluye otros nombres, como «error», «discrepancia» y «no conformidad».
- Un «síntoma» es la evidencia externa de un defecto. Un defecto puede tener múltiples síntomas. La misma palabra puede servir como una descripción de ambos defecto y síntoma.
- Una «teoría» es una afirmación no comprobada sobre los motivos de la existencia de defectos y síntomas. Habitualmente, se adelantan múltiples teorías para explicar la presencia de defectos.
- Una «causa» es un motivo comprobado de la existencia de un defecto. Con frecuencia existen múltiples causas, en cuyo caso pueden seguir el principio de Pareto: las pocas causas clave dominarán al resto.
- Una «causa dominante» es la que contribuye más a la existencia de defectos y que debe remediarse antes si se quiere lograr una mejora adecuada.

² El concepto de secuencia universal se desarrolló a partir de mi experiencia, primero en Western Electric Company (1924-1941) y más tarde durante mis años como consultor independiente, a partir de 1945. Después de unos pocos documentos preliminares publicados, se publicó una secuencia universal en forma de libro (Juran 1964). Esta secuencia continuó desarrollándose luego según la experiencia de las aplicaciones realizadas por directores de operaciones.

La creación del Juran Institute (1979) llevó a la publicación de la serie de videocasetes *Juran on Quality Improvement* (Juran 1981). Esta serie fue bien recibida e influyó en el lanzamiento de iniciativas de mejora de la calidad en muchas empresas. Estas empresas desarrollaron luego programas de formación internos y difundieron sus propias versiones de la secuencia universal. Todas ellas tienen mucho en común con la secuencia original publicada en 1964. En algunos casos las empresas han elaborado revisiones o adiciones, que han sido bienvenidas.

- «Diagnóstico» es el proceso de estudiar los síntomas, teorizar sobre las causas, someter a test las teorías y descubrir las causas.
- Un «remedio» es un cambio que puede eliminar o neutralizar una causa de defectos.

El diagnóstico deberá preceder al remedio. Puede parecer obvio que el diagnóstico preceda al remedio, pero pueden atravesarse opiniones sesgadas o creencias anticuadas.

Por ejemplo, durante el siglo XX, muchos altos directivos sostenían la convicción profundamente arraigada de que la mayor parte de los defectos se debía a errores de los trabajadores. Los hechos pocas veces respaldaban esto, pero la convicción persistía. A resultas de ello, durante los años 1980, muchos de estos directivos intentaron resolver sus problemas de calidad exhortando a los trabajadores a no cometer defectos. (De hecho, los defectos son, generalmente, en más de un 80 por ciento controlables por la dirección y en menos de un 20 por ciento controlables por los trabajadores.)

Los equipos no entrenados tratan a menudo de aplicar remedios antes de conocer las causas («Preparados, apunten, fuego»). Por ejemplo:

Un insistente miembro de un equipo «conoce» la causa y presiona al equipo para que aplique un remedio para esta causa.

Un experto conocedor informa al equipo sobre la tecnología. El experto tiene una firme opinión sobre cuál es la causa del síntoma y el equipo no cuestiona la opinión del experto.

A medida que los miembros del equipo adquieren experiencia, adquieren también confianza en su capacidad para el diagnóstico. Esta confianza les permite entonces objetar las afirmaciones no comprobadas.

Cuando estén muy extendidas las convicciones profundamente arraigadas, se necesitará una investigación especial.

En un estudio clásico, Greenridge (1953) examinó los fallos de productos electrónicos suministrados por distintas empresas. Los datos mostraron que el 43 por ciento de los fallos eran achacables al diseño del producto, 30 por ciento a las condiciones de operación, 20 por ciento a la fabricación y el resto a causas misceláneas.

EL VIAJE DE DIAGNÓSTICO

El viaje de diagnóstico empieza con el análisis de los síntomas del problema de calidad crónico. La evidencia de los defectos y errores llega de dos formas:

- Las *palabras* utilizadas en descripciones escritas u orales.
- Las *autopsias* realizadas para examinar los defectos en profundidad.

Entender los síntomas. Los síntomas se comunican a menudo con palabras como facturas incorrectas, la máquina produce copias malas o «no me encuentro bien». La comprensión de dichas expresiones se ve entorpecida con frecuencia porque las palabras clave tienen significados múltiples o vagos. En tales casos, la persona que preparó el informe se convierte en fuente esencial de información.

Un informe de inspección mostraba persistentemente un alto porcentaje de defectos debidos a «contaminación». Se intentaron varios remedios para reducir la contaminación. Todo sin éxito. Desesperados, los investigadores hablaron con los inspectores para saber cuál era el significado de contaminación. Los inspectores explicaron que había 12 categorías de defectos en el formulario de inspección. Si el defecto observado no entraba en ninguna de estas categorías, lo calificaban de contaminación.

Una fuente de malas interpretaciones frecuentes es el uso de palabras genéricas para describir múltiples subespecies de defectos.

En una planta que fabricaba productos de goma por el proceso de inmersión en látex, la palabra *rasgaduras* se usaba en las hojas de datos para describir productos rasgados. Un director importante creyó que las rasgaduras se debían a errores de los trabajadores y urgió un remedio mediante medidas de motivación y disciplinarias. En realidad, había tres clases de rasgaduras: *rasgaduras por pelado* (descortezado), en la operación de pelado; *rasgaduras por clic*, en la operación de presión, y *rasgaduras por montaje*, en la operación de montaje. Sólo las rasgaduras por pelado se debían a errores de los trabajadores y su frecuencia era sólo del 15 por ciento. Que el director cambiara de opinión sólo fue posible después de aclarar el significado de la terminología y de cuantificar las frecuencias relativas de las subespecies de rasgaduras.

Una herramienta útil para reducir la confusión semántica es el «glosario». Se asigna un equipo para que reflexione sobre el significado de las palabras clave. Luego, los acuerdos resultantes se publican como parte del glosario oficial de la empresa.

Autopsias. Una ayuda importante para entender el significado subyacente en las palabras es la «autopsia» (véase con los propios ojos). Las autopsias científicas pueden suministrar un vasto conocimiento objetivo de los síntomas y, por ende, pueden complementar o anular la información contenida en los informes escritos.

El informe sobre los tests de un producto puede incluir una categoría de defectos «eléctricos». Las autopsias de una muestra de tales defectos pueden mostrar que hay múltiples subespecies: circuito abierto, cortocircuito, pila agotada, etc.

[Véase el ejemplo de un caso de uso de autopsias en Black y Stump (1987)].

FORMULACIÓN DE TEORÍAS

Todo progreso en el diagnóstico se hace teoría por teoría; afirmando o negando la validez de las teorías sobre las causas. El proceso consta de tres pasos: generación de teorías, disposición de las teorías en un orden determinado y elección de las teorías que se van a someter a test.

Generación de teorías. La consecución de teorías se deberá hacer de forma sistemática. Se deberán buscar teorías entre los contribuyentes potenciales; directores y supervisores de línea, tecnólogos, trabajadores, clientes, proveedores, etc. Normalmente, la lista de teorías será extensa, 20 o más. Si sólo han surgido 3 o 4 teorías, quiere decir, habitualmente, que la teorización ha sido inadecuada.

Una forma sistemática de generar teorías es conocida como «tormenta de ideas». Se reúne a los contribuyentes potenciales con el objetivo específico de generar teorías. Se estimula el pensamiento creativo pidiendo a cada persona, por turno, que proponga una teoría. No se permite crítica o discusión hasta que se han registrado todas las teorías. El resultado final es una lista de teorías que se someten entonces a discusión.

La experiencia enseña que la tormenta de ideas puede tener un efecto útil sobre los miembros del equipo que sostienen opiniones fuertes. Dichos miembros pueden sentir que sus puntos de vista deben ser aceptados como hechos. «Sé que esto es así». Sin embargo, otros miembros consideran estos puntos de vista como teorías: afirmaciones no comprobadas. Esto lleva a una conciencia creciente de la diferencia entre teoría y hecho.

Otro planteamiento sistemático —«técnica nominal de grupo»— es similar a la tormenta de ideas. Los participantes generan sus teorías en silencio y por escrito. Luego, cada uno ofrece una teoría cada vez, por rotación. Después de que se hayan registrado todas las ideas, se discuten y luego se les da prioridad según el voto.

Las teorías no deberán limitarse a aquellas relacionadas con errores de productos o procesos específicos. En algunos casos, la causa puede estar en algún *sistema* más amplio que afecta a múltiples productos.

Un director observó: «En las 6 semanas últimas hemos perdido cuatro lotes necesarios de productos no relacionados debido a que cuatro instrumentos distintos estaban mal calibrados. Esto muestra que debemos revisar nuestro *sistema* para mantener la precisión de los instrumentos».

Disposición de las teorías. El proceso de tormenta de ideas proporciona una lista de teorías sin orden ni concierto. La disposición ordenada de esa lista ayuda al equipo de mejora a visualizar la interrelación de las teorías. Además, una disposición ordenada es una ayuda esencial para elegir qué teorías someter a test. La disposición ordenada se puede conseguir de varias maneras:

- *Metaplan.* Un complemento a la tormenta de ideas es esta forma de disposición ordenada de las teorías. A medida que se propone cada teoría, se va registrando en una ficha. Las fichas luego se ordenan adecuadamente en un tablero para formar un despliegue visual de las teorías.
- *Disposición tabular.* Otra forma de disponerlas es una tabla que muestre una jerarquía lógica: teorías, subteorías y sub-subteorías, y así sucesivamente. La Tabla 5.6 es un ejemplo de aplicación al rendimiento de productos químicos en polvo fino.
- *Diagrama de causa-efecto.* Este popular diagrama (también conocido como *diagrama de Ishikawa* o *diagrama de espina*) fue desarrollado en 1950 por el profesor Kaoru Ishikawa. Se muestra un ejemplo en la Figura 5.14.

Para crear el diagrama se escribe el efecto (síntoma) en la cabeza de la flecha. Después se añaden las causas potenciales (teorías) para completar el diagrama. Una serie habitual de categorías importantes de causas son: personal, métodos de trabajo, materiales y equipamiento. La Figura 5.14 muestra el diagrama de causa-efecto preparado para la misma lista de teorías ordenadas de la Tabla 5.6. Advuértase cómo el diagrama ayuda a identificar las interrelaciones entre las teorías.

Los diagramas de causa-efecto se aplicaron al comienzo a problemas de producción. Desde entonces se ha visto que se pueden aplicar a toda clase de sectores de actividad, procesos y problemas. Como resultado, ahora se usan en cualquier aplicación imaginable.

El diagrama de causa-efecto se puede combinar con un *análisis de fuerzas*. El equipo identifica las situaciones y sucesos que contribuyen al problema (las «fuerzas coercitivas»). Se iden-

TABLA 5.6 Disposición ordenada de las teorías

Materia prima	Contenido de humedad
Déficit de peso	Velocidad de carga del polvo húmedo
Método de descarga	Secador, rpm
Catalizador	Temperatura
Tipos	Presión del vapor
Cantidad	Flujo del vapor
Calidad	Sobrepeso del embalaje
Reacción	Tipo de balanza
Solución y concentración	Precisión de la balanza
Temperatura de la solución B	Mantenimiento de la balanza
Solución y velocidad de vertido	Método de pesado
pH	Operador
Agitador, rpm	Transporte
Tiempo	Carretera
Cristalización	Tapa
Temperatura	Derrames
Tiempo	Contenedor
Concentración	
Cristal madre	
Peso	
Tamaño	

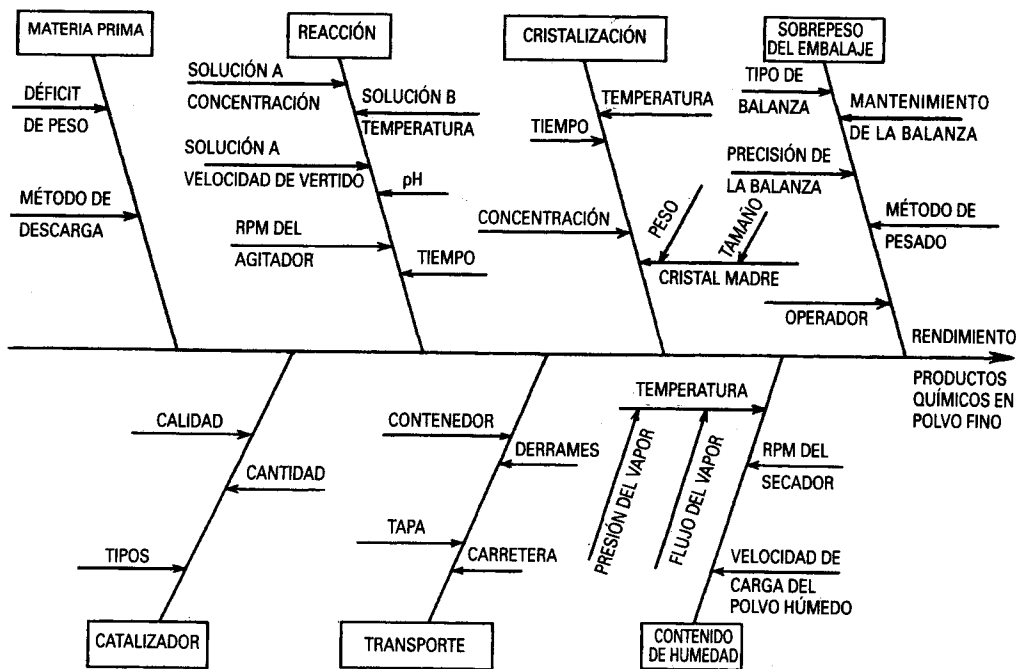


FIGURA 5.14 Diagrama de causa-efecto de Ishikawa.

tifican luego las acciones necesarias para contrarrestar las fuerzas coercitivas; estas acciones son las «fuerzas conductoras». Finalmente, se prepara un diagrama combinando las fuerzas coercitivas y las conductoras para ayudar al diagnóstico [véase un ejemplo en Stratton (1987)].

Elección de teorías para someterlas a tests. Las teorías son numerosas, aunque la mayoría no resultan válidas. A resultados de ello, los equipos de proyectos han aprendido a discutir las prioridades para someter a test las teorías y llegar a un consenso. Este planteamiento se ha demostrado efectivo para reducir el tiempo y el esfuerzo del equipo, así como para minimizar la frustración de perseguir teorías sin validez.

En distintos lugares hay compañías que han desarrollado matrices estructuradas para llegar a dar una puntuación a cada teoría. Un método simple consiste en pedir a cada miembro del equipo que clasifique todas las teorías por orden de importancia, según su criterio. La suma de las clasificaciones se convierte así en un dato para alcanzar el consenso final sobre prioridades.

TEST DE LAS TEORÍAS

Hay muchas estrategias para someter a test las teorías, siguiendo el principio de Pareto: unas relativamente pocas de ellas son aplicables a la mayoría de los problemas. Lo que sigue es una breve descripción de unas pocas estrategias vitales junto con sus principales áreas de aplicación.

Una cuestión crítica es si someter a test las teorías una a una, un grupo de teorías interrelacionadas a la vez o todas las teorías simultáneamente. Hacer una elección adecuada requiere entender los métodos de recogida y análisis de datos (véase más adelante). El equipo puede necesitar el consejo de un especialista en análisis de datos.

El planteamiento factual. El concepto básico que subyace en el diagnóstico es el planteamiento factual: hacer las decisiones basadas en hechos más que en teorías. Este concepto permite a los *amateurs* en tecnología hacer contribuciones útiles al proyecto, a pesar de ello. De este modo, los equipos aprenden a distinguir la teoría del hecho. Los hechos son apoyados por evidencia satisfactoria. Las teorías son afirmaciones sin apoyo. Algunas veces la distinción es sutil.

En un equipo, el miembro de ingeniería afirmó que cambiar la temperatura del baño de soldadura reduciría la frecuencia del defecto que estaban estudiando, pero crearía un nuevo defecto que empeoraría las cosas. Esta creencia estaba basada en datos *recogidos más de 10 años antes en un equipo diferente*. El equipo puso en duda esta afirmación, realizó una prueba nueva y halló que la temperatura más alta no causaba dicho efecto adverso (Betker 1983).

Diagramas de flujo. Para muchos productos, la anatomía del proceso de producción es una «sucesión»: una serie secuencial de pasos, cada uno realizando una tarea específica. La mayor parte de los miembros del equipo está familiarizada con estos pasos, pero pocos lo están con la sucesión entera. Adviértase que los pasos de la sucesión pueden incluir tanto aquellos de la cadena de proveedores externos como aquellos dados durante el marketing, el uso y el servicio al cliente.

La preparación de un diagrama de flujo ayuda a todos los miembros a entender mejor la progresión y la relación de cada paso con el conjunto [véanse ejemplos en Eangle y Ball (1985)]. (Para detalles sobre la construcción de los diagramas de flujo, véase el Capítulo 3, «El proceso de planificación de la calidad»).

Análisis de la capacidad del proceso. Una de las preguntas que se hacen con más frecuencia los miembros de los equipos de mejora se refiere a la «capacidad del proceso». Algunos miembros sostienen que «este proceso es, por naturaleza, incapaz de cumplir las especificaciones». La posición contraria es que «el proceso es capaz, pero no se está ejecutando bien». En décadas recientes, se han diseñado herramientas para someter a test estas afirmaciones, especialmente en lo referente a los procesos de fabricación.

Un test común de la capacidad del proceso utiliza el «gráfico de control de Shewhart». Los datos se toman del proceso a intervalos cronológicos iguales (habitualmente). *Habiendo establecido por análisis del gráfico de control que el proceso es inherentemente estable, se comparan los datos con los términos de las especificaciones. Esta comparación proporciona una medida de la capacidad del proceso para producir consistentemente resultados dentro de los límites especificados.* (Para más detalles sobre el gráfico de control de Shewhart, véase el Capítulo 45).

Aunque la evaluación de la capacidad del proceso se aplicó originalmente a los procesos de fabricación, desde entonces se ha aplicado crecientemente a procesos administrativos y de empresa en todos los sectores. Un ejemplo común ha sido la aplicación a la duración del ciclo de tales procesos.

Muchos de estos procesos consisten en una sucesión en la que el trabajo se realiza en una secuencia de pasos conforme se mueve de un departamento a otro. Puede llevar días (semanas o incluso meses) completar un ciclo, pero el tiempo requerido para hacer el trabajo ha durado sólo una pocas horas. El tiempo restante ha consistido en esperar turno en cada paso, volverlo a hacer, y así sucesivamente.

Para estos procesos, la capacidad teórica del proceso es el tiempo de trabajo acumulado. Una persona que haya sido formada para realizar todos los pasos y que tenga acceso a todas las bases de datos, puede conseguir ese tiempo teórico. Algunas empresas han fijado como meta reducir la duración del ciclo hasta unas dos veces la capacidad teórica.

Disección del proceso. Un test común del porqué un proceso capaz no se ejecuta bien es la «disección del proceso». Esta estrategia intenta rastrear los defectos hasta sus orígenes en el proceso. Hay múltiples formas de realizar esta disección del proceso.

Test en etapas intermedias. Cuando los defectos se encuentran al final de una sucesión, no se sabe qué paso operativo provocó el daño. En tales casos, una estrategia útil puede ser inspeccionar o someter a test el producto en las etapas intermedias para descubrir en qué paso aparece primero el defecto. Este descubrimiento, si se consigue, puede reducir drásticamente el esfuerzo de someter a test las teorías.

Análisis fuente a fuente. Los productos de gran volumen requieren a menudo múltiples fuentes de producción: múltiples proveedores, máquinas, turnos, trabajadores, etc. Puede parecer que las fuentes son idénticas, pero los productos resultantes pueden no serlo. El análisis fuente a fuente consiste en separar la producción en sus fuentes de origen y probar diferencias fuente a fuente en un esfuerzo por encontrar la fuente culpable, si la hay.

Análisis periódico. Otra forma de disección del proceso es el análisis periódico. Su objeto es descubrir si la producción de defectos se concentra en lapsos de tiempo específicos. Este tipo de análisis ha sido usado para estudiar el tiempo entre anomalías, efecto del cambio de los turnos de trabajo, la influencia de las estaciones del año y muchas otras causas potenciales.

Un ejemplo frecuente del análisis periódico es el gráfico de control de Shewhart, que también puede mostrar si la variabilidad en un proceso es aleatoria o debida a causas asignables (véase el Capítulo 45).

Un caso especial de cambios periódicos es la *deriva*: un deterioro continuo de algún aspecto del proceso. Por ejemplo, en operaciones fabriles, la solución química puede hacerse gradualmente más diluida, las herramientas pueden desgastarse gradualmente o los trabajadores irse fatigando.

En el análisis periódico, el proceso (o producto) se mide (habitualmente) a intervalos de tiempo iguales. La representación gráfica de los datos supone una ayuda para su interpretación. La presentación en forma acumulada (gráficos de sumas acumuladas) es una ayuda para detectar la deriva.

Existen también variaciones «pieza a pieza» y «dentro de cada pieza».

Un ejemplo de variación pieza a pieza lo tenemos en los procesos de fundición que producen moldes en bloques. En estos casos, la calidad de los moldes puede depender de su colocación en el bloque. Un ejemplo de variación dentro de cada pieza está en las operaciones de torno, donde el diámetro de una pieza cilíndrica no es uniforme.

Disección simultánea. Algunas formas de disección del proceso pueden someter a test simultáneamente a múltiples teorías. Un ejemplo clásico es el gráfico Multi-Vari³ (véase la Figura 5.15). En esta figura, una línea vertical describe el margen de variación dentro de una sola unidad de producto, en comparación con los límites de tolerancia de la especificación. En el ejemplo de la izquierda, la variación dentro de cada pieza sola es demasiado grande en relación con la tolerancia. De aquí que no sea posible una mejora a menos que se reduzca la variación dentro de cada pieza. En el ejemplo de en medio, cada variación dentro de la pieza es aceptable; el problema es la variación pieza a pieza. En el ejemplo de la derecha, el problema es la excesiva variabilidad periódica. Traver (1983) presenta ejemplos adicionales de gráficos Multi-Vari.

Análisis de la concentración de defectos. En el «análisis de la concentración de defectos», el objeto es descubrir concentraciones que puedan apuntar a las causas. Este método se ha usado ampliamente en variadas aplicaciones.

³ Le dio el nombre de Multi-Vari a esta forma de análisis L. A. Seder en su documento clásico, «Diagnosis with Diagrams», en *Industrial Quality Control* (enero 1950 y marzo 1950). El concepto de la línea vertical ha sido usado por J. M. Juran, que lo derivó del método usado en los documentos financieros para mostrar los márgenes de los precios de la bolsa.

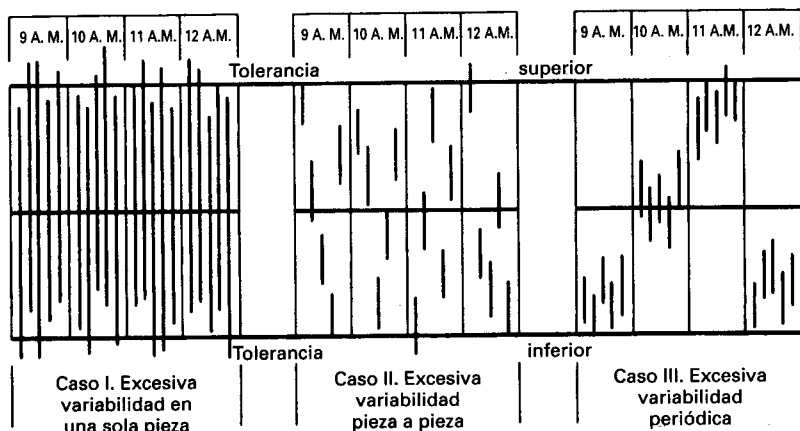


FIGURA 5.15 Gráfico Multi-Vari.

Durante una de las epidemias de cólera de Londres a mediados del siglo XIX, el doctor. John Snow consiguió las direcciones de aquellos que habían muerto de cólera en el distrito de Soho. Luego proyectó las direcciones en un mapa del distrito (véase Figura 5.16). Las direcciones estaban concentradas alrededor de la pompa de Broad Street, que suministraba agua potable al distrito de Soho. En aquellos días, nadie conocía cuál era la causa del cólera, pero se suministró un remedio quitando el asa de la pompa.

En el caso de productos manufacturados, es común proyectar las localizaciones de defectos sobre un dibujo del producto (véase la Figura 5.17). Este diagrama de concentración muestra la localización de defectos en una fotocopiadora de oficina. Los números en círculos muestran las distintas localizaciones en el equipo. Los números adyacentes a los círculos muestran cuántos defectos se encontraron en la muestra de máquinas en estudio. Se ve que las localizaciones 24 y 2 son responsables del 40 por ciento de los defectos.

El análisis de concentración se ha aplicado a las operaciones militares.

Durante la Segunda Guerra Mundial, las Fuerzas Aéreas de Estados Unidos estudiaron los daños en los aviones al volver de las misiones de combate. Una forma de análisis era preparar diagramas que mostraran dónde estaban concentrados los agujeros de bala del enemigo y otras clases de daños. Los diagramas también mostraron que algunas áreas del avión *nunca sufrieron daños*. La conclusión fue que el daño a dichas áreas había destruido los aviones y que era necesario volver a diseñarlos para reducir la vulnerabilidad de estas áreas.

Búsquedas por correlación. Algún tipo de diagnóstico consiste en relacionar los datos sobre los síntomas con algunas teorías de causalidad, como diseño, proceso, trabajador, etc. Las posibles relaciones se examinan usando distintas herramientas estadísticas, como correlación, clasificación y matrices:

- **Correlación.** En este planteamiento, los datos sobre la frecuencia de los síntomas se proyectan frente a los datos sobre la presunta causa. La Figura 5.18 es un ejemplo en el que la frecuencia de moldes picados estaba relacionada con el espesor del «regulador» de los moldes.
- **Clasificación.** En este planteamiento, los datos sobre los defectos se clasifican por su orden de frecuencia. Esta clasificación se compara luego con la incidencia de la presunta causa.

La Tabla 5.7 muestra la frecuencia del defecto «desequilibrio dinámico» en 23 tipos de tubos de torsión para automoción. La causa sospechosa era una operación de estampado que

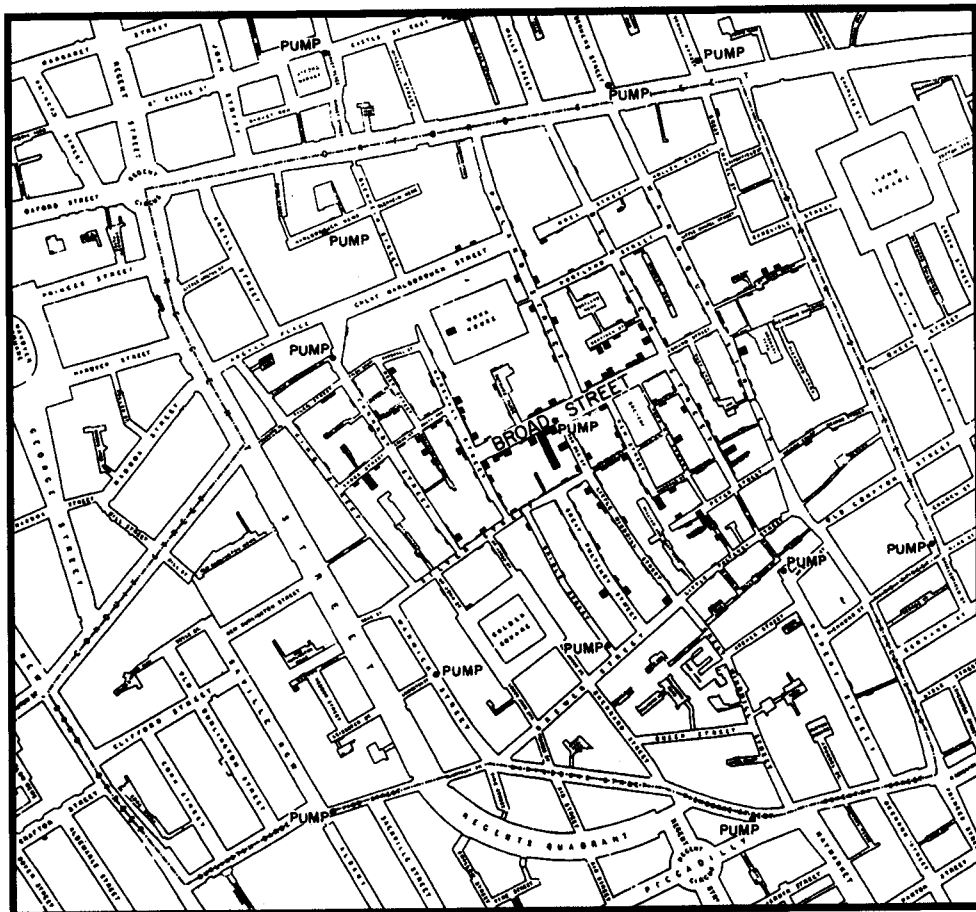


FIGURA 5.16. El análisis de concentración del Dr. John Snow.

se realizaba en algunos de los tipos de productos. La tabla muestra qué tipos se habían sometido a estampado. Está claro que los tipos de productos estampados eran mucho peores que los no estampados.

En algunos casos, es factible estudiar los datos de múltiples variables usando un método de análisis estructurado tipo recetario. Un ejemplo publicado hace tiempo es el plan SPAN (Seder y Cowan 1956). Este planteamiento utiliza formas normalizadas de recogida y análisis de datos que permiten la separación sucesiva, en cinco etapas, de la variabilidad total observada en el producto: lote a lote, fuente a fuente, periódica, dentro de cada pieza (o posicional) y por error de medida. Otras formas de búsqueda por correlación se establecen en el grupo estadístico de los Capítulos 44 a 48 de este manual.

Abrir ventanas nuevas. En algunos casos, los datos disponibles de las operaciones no son capaces de probar la certidumbre de las teorías. En ese caso, puede ser necesario crear específicamente nuevos datos con el objeto de comprobar teorías. Esto se llama «abrir ventanas nuevas» y toma varias formas.

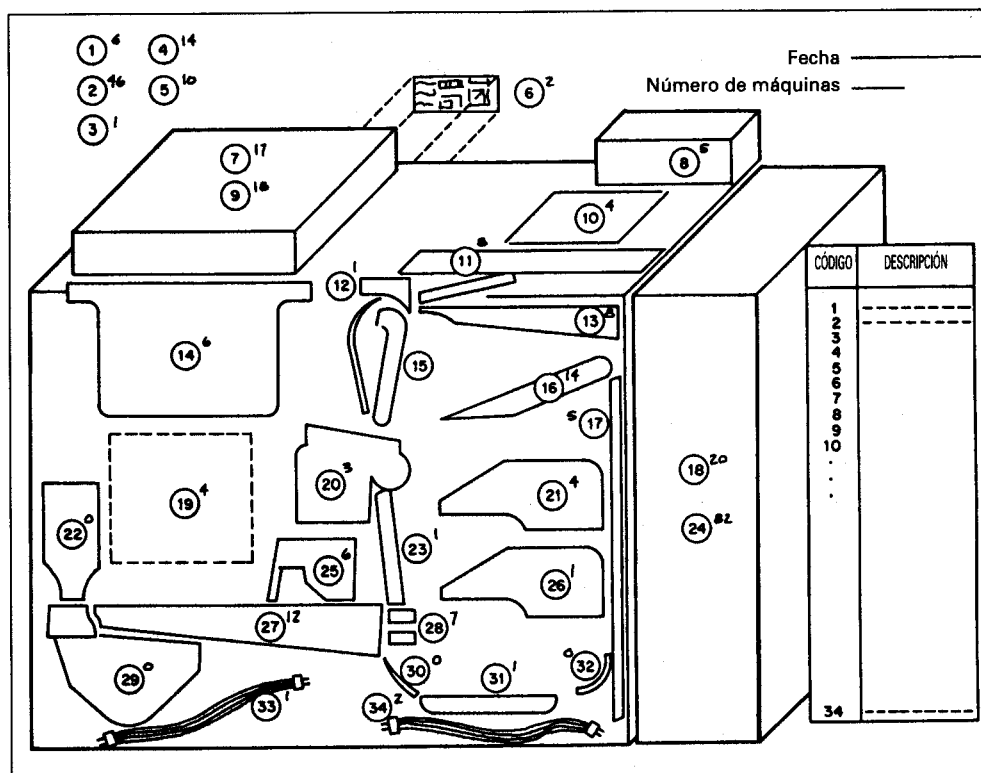


FIGURA 5.17 Diagrama de concentración: defectos en fotocopadoras.

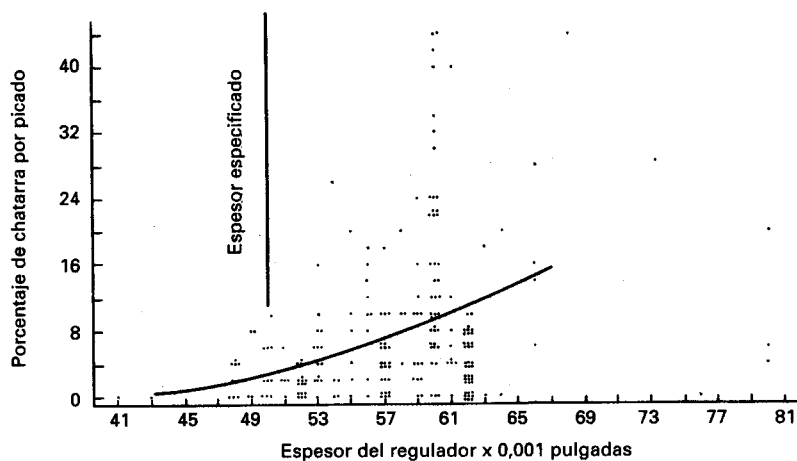


FIGURA 5.18 Test de teorías por correlación.

TABLA 5.7 Test de teorías por clasificación

Tipo	% defectuoso	Estampado (marcado X)	Tipo	% defectuoso	Estampado (marcado X)
A	52,3	X	M	19,2	X
B	36,7	X	N	18,0	X
C	30,8	X	O	17,3	
D	29,9	X	P	16,9	X
E	25,3	X	Q	15,8	
F	23,3	X	R	15,3	
G	23,1	X	S	14,9	
H	22,5		T	14,7	
I	21,8	X	U	14,2	
J	21,7	X	V	13,5	
K	20,7	X	W	12,3	
L	20,3				

Medida en las etapas intermedias. Un ejemplo común se ve en productos hechos en una sucesión de pasos, pero sometidos a tests sólo después de completar todos los pasos (véase anteriormente, bajo Disección del proceso). En estos casos, abrir ventanas nuevas puede consistir en hacer medidas en las etapas intermedias de la sucesión.

En un proyecto para reducir el tiempo requerido para reclutar nuevos empleados, los datos disponibles se referían al tiempo total transcurrido. Para comprobar las teorías se requirió abrir ventanas nuevas mediante la medida del tiempo transcurrido en cada uno de los seis pasos del proceso de reclutamiento.

En un proceso para la soldadura de grandes juntas en recipientes de presión crítica, todas las juntas acabadas se examinaron con rayos X para hallar cualquier poro en los puntos de soldadura. El proceso se pudo diseccionar para estudiar algunas fuentes de variación: trabajador a trabajador, periódica y junta a junta. Sin embargo, no había datos disponibles para estudiar otras fuentes de variación: capa a capa, cordón a cordón y dentro del cordón. Abrir nuevas ventanas supuso examinar con rayos X algunos puntos de soldadura después de que se depositara cada cordón.

Creación de nuevos aparatos de medida. Algunas teorías no se pueden someter a tests con los aparatos de medida utilizados durante las operaciones. En tales casos, puede ser necesario crear nuevos aparatos de medida.

En un proyecto para reducir defectos en radiadores de automóvil, algunas teorías se centraban en las operaciones de tratamiento con calor y desecado, que tenían lugar dentro de un horno de soldar cerrado. Para medir lo que sucedía dentro del horno se equipó una caja aislada —del tamaño aproximado de un radiador— con termopares y se diseñó para registrar el tiempo y la temperatura dentro del horno. Se colocó la caja en la línea de montaje junto con los radiadores y se envió al horno en un ciclo de soldado normal. Los datos resultantes se utilizaron para modificar el perfil de la temperatura dentro del horno. La tasa de fallos descendió (Mizell y Strattner 1981).

Características no diseccionables. Una característica de producto «diseccionable» es aquella que se puede medir durante varias etapas de la sucesión. Una característica «no diseccionable» no se puede medir durante el proceso; muchas características no diseccionables no aparecen hasta que se han completado todos los pasos del proceso. Un ejemplo común es el funcionamiento de un aparato de televisión. En estos casos, una forma importante de someter a tests las teorías es mediante el diseño de experimentos (véase a continuación).

Diseño de experimentos. Someter a tests las teorías mediante experimentos implica habitualmente producir muestras de prueba del producto bajo condiciones seleccionadas especialmente. Se puede realizar el experimento en un laboratorio o en el mundo real de las oficinas, fábricas, almacenes, locales de los usuarios, etc.

Es bastante fácil establecer los criterios mínimos que ha de reunir un experimento:

- Deberá comprobar las teorías en estudio sin dejarse confundir por variables ajenas.
- Deberá descubrir la existencia de causas importantes, incluso si éstas no han sido avanzadas como teorías.
- Deberá ser económico con relación a las cantidades en juego.
- Deberá suministrar respuestas fiables.

Para cumplir con estos criterios se requieren datos de varias fuentes:

- Los *directores* identifican las preguntas para las que se necesitan respuestas.
- Los *tecnólogos* seleccionan y establecen las prioridades sobre las variables adecuadas para ser investigadas.
- Los *analistas* proporcionan los métodos estadísticos para planificar el diseño del experimento y analizar los datos resultantes.

Los diseños de experimentos van desde simples casos a tiro hecho, a complejos casos sin límites, y la mayoría de ellos no se pueden dejar en manos de aficionados. En su forma más simple, el «experimento a tiro hecho» usa un método de lote dividido para identificar cuál de los dos sospechosos es la causa. Por ejemplo, si los procesos A y B son sospechosos, se divide un lote de material homogéneo. La mitad pasa por el proceso A; la otra mitad, por el proceso B. Si dos tipos de materiales son también sospechosos, cada uno pasa por ambos procesos, A y B, creando un diseño de experimento de dos por dos. Conforme aparecen más variables, se necesitan más combinaciones, pero ahora llega la ciencia del diseño de experimentos para simplificar el asunto.

En el «experimento sin límites», se sigue una muestra (o muestras) del producto a través de los distintos procesos según un plan que suministra valores de medida de los sospechosos seleccionados en cada etapa. Se miden también las características resultantes del producto. Se espera que el análisis de los datos resultantes descubra las relaciones significativas entre causas y efectos.

El experimento sin límites se deberá definir por escrito para asegurarse de que se entiende y de que representa un consenso. Los experimentos cuidadosamente planificados tienen una alta probabilidad de identificar los verdaderos culpables. La desventaja es el coste asociado y el lapso de tiempo necesario para conseguir respuestas.

Los estadísticos han desarrollado herramientas notablemente útiles: para librarse de variables indeseables mediante técnicas aleatorias; para minimizar la cantidad de experimentación mediante el uso habilidoso de diseños factoriales, en bloques o anidados; para descifrar el significado de datos complejos (véase el Capítulo 47, «Diseño y análisis de experimentos»).

Medición para el diagnóstico. Un obstáculo frecuente en el camino del diagnóstico es el uso de instrumentos de taller para hacer las mediciones. Estos instrumentos nunca se pensaron para usarse en el diagnóstico. Se pensaron para otros propósitos, como la regulación del proceso y los ensayos del producto. Existen varias categorías principales de casos en los que la medición para el diagnóstico difiere de la medición para las operaciones:

- Medición por variables, en vez de por atributos. Los estudios de capacidad del proceso normalmente demandan mediciones por variables.
- Medición con una precisión superior a la de los instrumentos de taller. En algunos casos, los instrumentos proporcionados para las operaciones carecen de la precisión adecuada y, por tanto, son una causa dominante en los problemas de la calidad.
- Creación de nuevos instrumentos para abrir ventanas nuevas u ocuparse de procesos no diseccionables.
- Medición para someter a tests variables sospechosas que no están controladas ni incluso mencionadas en las especificaciones.

Responsabilidad del diagnóstico. Parte del trabajo de diagnóstico consiste en las discusiones que tienen lugar durante las reuniones del equipo del proyecto: análisis de los síntomas, teoría sobre las causas, selección de las teorías a comprobar, etc. Además, el trabajo de diagnóstico supone someter las teorías a tests, que consisten principalmente en la recogida y análisis de datos y se hacen en gran parte como trabajo individual fuera de las reuniones del equipo.

En algunos proyectos, el trabajo individual consiste en la recogida y análisis de datos a pequeña escala. En estos casos, los mismos miembros del equipo del proyecto pueden hacer el trabajo individual. Otros proyectos requieren una recogida y análisis de datos extensa. En estos casos, el equipo del proyecto puede delegar o subcontratar todo o gran parte del trabajo a *diagnosticadores*, personas que tienen el tiempo, las habilidades y la objetividad necesarios. A pesar de dicha delegación, el equipo del proyecto sigue siendo responsable de hacer que se haga el trabajo.

En grandes organizaciones que trabajan en muchos proyectos de mejora, el trabajo de diagnóstico ocupa el tiempo completo equivalente de numerosos diagnosticadores. En respuesta, muchas empresas han creado categorías de puestos de trabajo a tiempo completo para el diagnóstico, con títulos como ingenieros de calidad. Dónde situarlos en el organigrama ha llevado a varias alternativas (véase Figura 5.19).

1. Los diagnosticadores se asignan a los directores de línea en proporción a las necesidades de sus departamentos (véase Figura 5.19a). Esta disposición es la preferida por los directores de línea. En la práctica, esta disposición tiende a que los diagnosticadores acaben siendo asignados a ayudar a que los directores de línea cumplan con sus metas, resuelvan los problemas, etc. Tales encargos toman prioridad entonces sobre los problemas crónicos.
2. Los diagnosticadores se asignan a los directores de línea (punto anterior), pero con una «línea de puntos» que lleva a un departamento central de diagnóstico, tal como Ingeniería de Calidad (véase Figura 5.19b). Esta disposición es mejor desde el punto de vista de los diagnosticadores en formación, ya que les ofrece un camino obvio de carrera profesional y les proporciona asistencia de consultoría. Sin embargo, la disposición conduce a conflictos sobre el problema de las prioridades: en qué proyectos deberán estar trabajando los diagnosticadores.

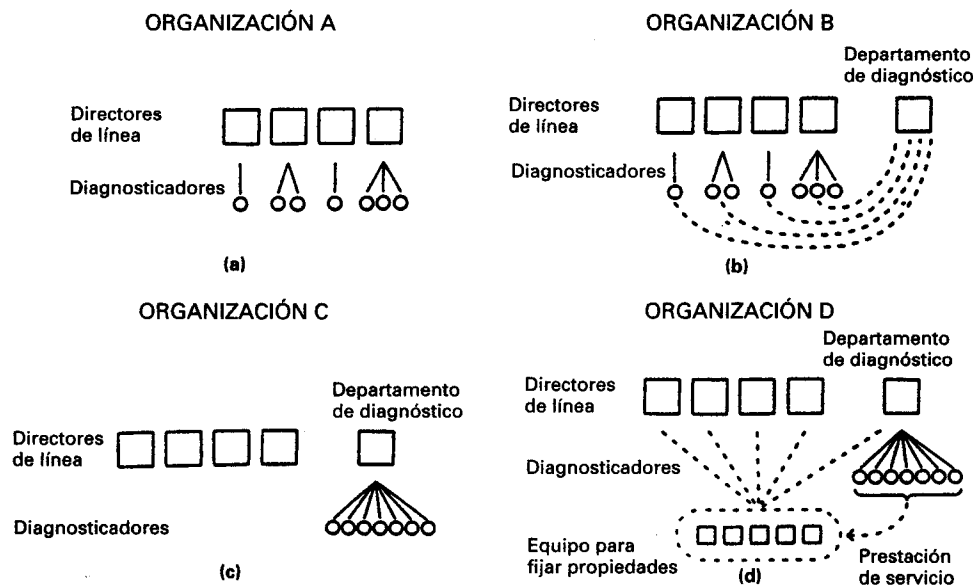


FIGURA 5.19 Alternativas para la organización de los diagnosticadores.

3. Los diagnosticadores se asignan a un departamento central de diagnóstico, tal como Ingeniería de Calidad (véase Figura 5.19c). Esta disposición aumenta la probabilidad de que los proyectos crónicos tengan la adecuada prioridad. Además, simplifica la tarea de proporcionar asistencia de formación y consultoría a los diagnosticadores. Sin embargo, no tiene previsto específicamente la participación de los directores de línea en la elección de proyectos o en el establecimiento de prioridades. Dichas omisiones pueden ser fatales para los resultados.
4. Los diagnosticadores se asignan a un departamento central, pero con una participación estructurada de los directores de línea (véase Figura 5.19d). De hecho, los directores de línea eligen los proyectos y establecen las prioridades. El departamento de diagnóstico asigna los diagnosticadores en respuesta a estas prioridades. También proporciona a los diagnosticadores servicios de formación y consultoría y otras asistencias. Esta disposición se usa extensamente y ha demostrado su capacidad de adaptación a una gran variedad de situaciones empresariales.

La elección entre estas (y otras) alternativas depende de muchos factores que difieren de una empresa a otra.

ANÁLISIS RETROSPECTIVO; LECCIONES APRENDIDAS

Las lecciones aprendidas se basan en la experiencia derivada de sucesos históricos anteriores. Estos sucesos se convierten en lecciones aprendidas sólo después de un análisis: el «análisis retrospectivo».

Un enorme volumen de diagnósticos se hace analizando los sucesos históricos. Un ejemplo común lo tenemos en el control de calidad de un proceso industrial. Se hace midiendo una muestra de unidades del producto tal como surgen del proceso. La producción de cada unidad es un suceso histórico. La producción de múltiples unidades se convierte en múltiples sucesos históricos. El análisis de las mediciones es el análisis de sucesos históricos y, por ende, un ejemplo de análisis retrospectivo.

La revisión de Santayana. Se necesita un nombre corto como etiqueta conveniente para este proceso de análisis retrospectivo. He propuesto que se le llame *revisión de Santayana*. El filósofo Jorge Santayana observó cierta vez que «Quienes olvidan el pasado están condenados a repetirlo». Esta es una expresión tersa y precisa del concepto de lecciones aprendidas a través del análisis retrospectivo. La definición se convierte en:

La revisión de Santayana es el proceso de derivar lecciones aprendidas de un análisis retrospectivo de sucesos históricos.

La influencia de la duración del ciclo y la frecuencia. El uso de la revisión de Santayana ha dependido en gran medida de:

- La duración del ciclo de los sucesos históricos.
- La frecuencia de estos mismos sucesos históricos, que está íntimamente ligada a la duración de su ciclo.

La influencia de estos dos factores, duración del ciclo y frecuencia, se entenderá mejor con algunos ejemplos.

Aplicación a ciclos de alta frecuencia. Los sucesos de alta frecuencia abundan en empresas de todas clases. Los procesos asociados tienen el carácter de producción en masa y procesan varios productos:

Sector	Proceso en masa de
Servicios públicos	Facturas
Fábricas	Bienes
Todos los sectores	Cheques de nóminas

Los ciclos resultantes pueden alcanzar cifras anuales de millones o incluso billones. Sin embargo, muchas empresas consiguen realizar estos procesos con unos niveles de error extremadamente bajos. Lo logran mediante análisis de muestras de los procesos, analizando los datos de sucesos históricos.

Es bastante fácil aplicar la revisión de Santayana a estos casos de producción en masa. Se dispone de datos en grandes cantidades: es necesario el muestreo para evitar ahogarse en los datos. El análisis de datos es a menudo lo suficientemente sencillo como para que se pueda realizar localmente por personal con formación en estadística básica. El esfuerzo implicado es modesto, por lo que rara vez se necesita conseguir la aprobación de niveles más altos. En consecuencia, se aplica extensamente la revisión de Santayana. Por supuesto, quienes realizan dichas aplicaciones pocas veces consideran que están haciendo un estudio de sucesos históricos anteriores. Sin embargo, esto es precisamente lo que están haciendo.

Aplicación a ciclos de frecuencia intermedia. Tal como se utiliza aquí, «frecuencia intermedia» es un orden de magnitud de decenas o centenares de ciclo al año: unos pocos al mes o a la semana. Comparados con la producción en masa, estos ciclos son más largos, cada uno implica a más funciones, cada uno requiere más esfuerzo y hay más en juego. Entre los ejemplos dentro de este rango de frecuencia están el reclutamiento de empleados o las licitaciones a concursos.

Las aplicaciones de la revisión de Santayana a los ciclos de frecuencia intermedia han sido comparativamente pocos en número, pero abundan las oportunidades. Resulta obviamente deseable reducir el tiempo necesario para reclutar empleados. También es deseable aumentar el porcentaje de licitaciones ganadas. (En algunos sectores, el porcentaje está por debajo del 10 por ciento). El bajo nivel de análisis retrospectivo es achacable a algunas realidades de la revisión de Santayana cuando se aplica a los ciclos de frecuencia intermedia:

- La aplicación se hace a un proceso multifuncional, que normalmente requiere un esfuerzo de equipo.
- Puede requerir un montón de trabajo ahora, viniendo los beneficios más tarde, y sin un método a punto para calcular el retorno sobre la inversión.
- Pocas veces hay una responsabilidad clara para hacer el trabajo.
- El estímulo para hacer voluntariamente el trabajo es mínimo, ya que la mejora beneficiará a la organización en general, pero no necesariamente al departamento del voluntario.

(Estas realidades no excluyen que se aplique la revisión de Santayana a los ciclos de alta frecuencia, ya que normalmente la aplicación se hace a procesos departamentales, el volumen de trabajo es pequeño y el estímulo para hacerlo voluntariamente está presente, porque los resultados beneficiarán al departamento del voluntario).

Aplicación a ciclos de baja frecuencia. Tal como se utiliza aquí, «baja frecuencia» se refiere a un rango que va de varios ciclos al año a un ciclo en varios años. Entre los ejemplos de una programación anual están la previsión de ventas y el presupuesto. Entre los ejemplos de una programación irregular están el lanzamiento de un nuevo producto, grandes proyectos de construcción y adquisiciones.

La aplicación de la revisión de Santayana a los ciclos de baja frecuencia ha sido rara. Cada uno de estos ciclos es de tamaño considerable; algunos son masivos. Una revisión de múltiples ciclos se convierte en un empeño similarmente considerable.

Un ejemplo son las revisiones históricas realizadas por un equipo de historiadores en British Petroleum Company. Este equipo revisa grandes proyectos de negocios: negocios conjuntos, adquisiciones y grandes proyectos de construcción. Las revisiones tratan de asuntos de estrategia empresarial más que de conformidad con las metas funcionales. Cada revisión emplea meses y requiere unas 40 entrevistas para suministrar lo que no está en la historia documentada. Las conclusiones y recomendaciones se presentan a los más altos niveles (Gulliver 1987).

Un proceso de baja frecuencia muy extendido que necesita desesperadamente la aplicación de la revisión de Santayana es el lanzamiento de nuevos productos. Dichos lanzamientos se llevan a cabo mediante un elaborado proceso multifuncional. Cada producto lanzado es en cierto grado único, pero el proceso global es bastante similar de un ciclo a otro. Siendo esto el caso, es completamente factible aplicar la revisión de Santayana.

Gran parte del tiempo requerido durante el ciclo de lanzamiento consiste en volver a hacer lo que se había hecho previamente. Se impone un trabajo extra a clientes internos y externos. La extensión y coste de estas demoras se puede estimar por un estudio de los ciclos anteriores. El análisis retrospectivo puede arrojar luz sobre lo que funcionó y lo que no, y por tanto puede mejorar la toma de decisiones.

Adviértase que el grueso de esta demora y coste *no* tiene lugar dentro del departamento de desarrollo del producto. Vemos un ejemplo en el lanzamiento del producto X que incurrió en los siguientes gastos (en millones de \$):

Investigación de mercado	0,5
Desarrollo del producto	6,0
Servicios de producción	22,0
Planificación del marketing	2,0
Total	30,5

Todo esto se perdió porque un competidor se llevó el mercado introduciendo un producto similar dos años antes del lanzamiento del producto X. El grueso de las pérdidas, 80 por ciento, ocurrió *fuera* del departamento de desarrollo del producto.

Algunos ejemplos de casos famosos. El potencial de la revisión de Santayana se puede ver mejor en algunos ejemplos de casos famosos:

- *Vigilantes del cielo y calendarios.* Uno de los logros más asombrosos de las civilizaciones antiguas fue el desarrollo de calendarios precisos. Estos calendarios se derivaron de numerosas observaciones de los movimientos de los cuerpos celestes, ciclo tras ciclo. Algunos de estos ciclos eran de muchos años de longitud. Los calendarios derivados del análisis de los datos eran vitales para la supervivencia de las sociedades antiguas. Por ejemplo, les decían cuándo sembrar las cosechas.
- *Depósito de saber del príncipe Enrique.* Durante los viajes de descubrimiento de los siglos xv y xvi, los navegantes portugueses fueron considerados como líderes en guiar los barcos a sus destinos y en traerlos de vuelta con seguridad. A resultados de ello, los navegantes portugueses eran preferidos y demandados por los propietarios de barcos, gobiernos y aseguradoras. La fuente de este liderazgo estaba en la iniciativa de un príncipe portugués, Enrique el Navegante (1394-1460). A principios de los años 1400, el príncipe Enrique estableció en Sagres, Portugal, un centro para la navegación marina: un depósito de saber único y sin precedentes. Los servicios incluían un observatorio astronómico, una fortaleza, una escuela de navegantes, viviendas, un hospital y una capilla. A este centró atrajo el príncipe Enrique a cartógrafos, fabricantes de instrumentos, astrónomos, matemáticos, carpinteros de barcos y proyectistas. También estableció un banco de datos: un depósito de los cuadernos de bitácora de viajes marinos que describían los vientos prevalecientes, las corrientes marinas, los puntos señalados, etcétera. Las lecciones aprendidas de estos cuadernos de bitácora contribuyeron a los

éxitos portugueses durante los viajes de descubrimiento alrededor de la costa de África, a través del océano Índico y cruzando el Atlántico.

- *Las cartas de navegación de Mathew Maury.* A mediados del siglo XIX, Mathew Maury, un lugarteniente de la Marina de Estados Unidos, analizó los cuadernos de bitácora de miles de viajes marinos. Luego incluyó estos hallazgos (velocidad de las corrientes, dirección de los vientos, etc.) en las cartas de navegación, utilizando gráficos y terminología estándar. Uno de los primeros barcos en utilizar las cartas de Maury fue el famoso *Flying Cloud*. En 1851 navegó de Nueva York a San Francisco en 89 días. La marca anterior era de 119 días (Whipple 1984). ¡La nueva marca duraría 138 años!
- *Investigación de desastres recurrentes.* Algunos desastres individuales son tan famosos que el fulgor molesto de la publicidad resultante fuerza la creación de un comité oficial de investigación. Sin embargo, el mayor daño lo ocasionan los desastres repetitivos, que aunque menos notorios individualmente, son notorios colectivamente. Existen algunas instituciones para estudiar estos desastres *colectivamente*. En sus mejores casos, estas instituciones han contribuido muchísimo a las guerras contra las enfermedades, a la reducción de los accidentes y a la construcción de edificios a prueba de incendios. Un ejemplo fascinante es un estudio multinacional para aclarar la relación entre dieta y cáncer. La Figura 5.20 muestra la correlación existente (Cohen 1987).

El potencial para sucesos de ciclo largo. La utilidad de la revisión de Santayana ha sido ampliamente demostrada en el caso de actividades de ciclo bajo y alta frecuencia. En consecuencia, la revisión de Santayana se aplica extensamente a dichos casos y con buenos efectos. Las oportunidades para la aplicación a actividades de ciclo largo y baja frecuencia son enormes. Sin embargo, las aplicaciones prácticas han sido comparativamente raras, debido a algunas serias realidades:

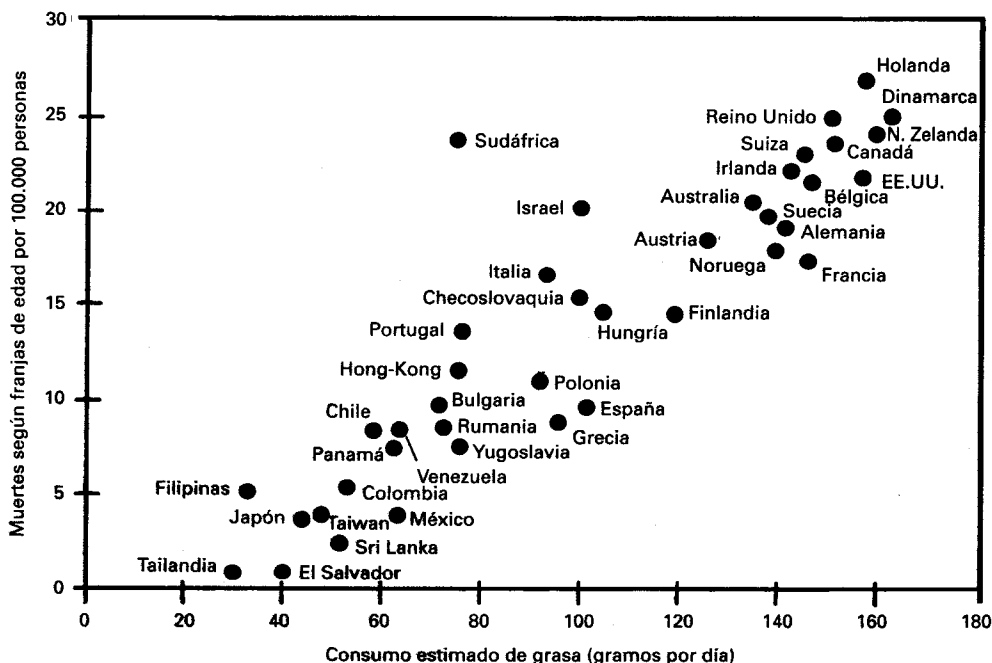


FIGURA 5.20 Correlación entre dieta y cáncer.

- Su patrocinio requiere un consenso entre múltiples directivos, más que una iniciativa de un solo directivo.
- El trabajo asociado del diagnosticador es habitualmente extenso e interfiere en el tiempo de otros.
- Las lecciones aprendidas resultantes no benefician a las operaciones en curso. Los beneficios se aplican a operaciones futuras.
- Los resultados no necesariamente benefician al desarrollo departamental de directivos participantes.
- No hay un método a punto para calcular el retorno sobre la inversión.

Es comprensible que los proyectos que se enfrentan a tales realidades tengan dificultades en lograr prioridad. Tal como están las cosas, se necesita una iniciativa de la alta dirección para aplicar la revisión de Santayana a actividades de ciclo largo. Hasta la fecha, estas actividades han sido pocas y la documentación publicada es escasa. La documentación relativa a la experiencia en British Petroleum es claramente una excepción (Gulliver 1987).

¿Se acelerará el ritmo de la aplicación? Lo dudo. Mi pronóstico es que el ritmo seguirá como ahora hasta que se consiga algún resultado espectacular, que se haga muy público. Es una predicción desalentadora, más aún en vista de la cita de Santayana: «Quienes olvidan el pasado, están condenados a repetirlo». (Para más información y ejemplos de casos, véase Juran 1992).

EL VIAJE DE REMEDIO

Una vez establecidas las causas, el viaje de diagnóstico ha terminado y empieza el viaje de remedio. Cada remedio es único para su proyecto, pero el planteamiento empresarial para seleccionar y aplicar los remedios es común a todos los proyectos.

Elección de alternativas. Para la mayor parte de los proyectos, existen múltiples propuestas de remedio. La elección del remedio depende entonces del grado en que las propuestas cumplan ciertos criterios esenciales. Los remedios propuestos deberán:

- Eliminar o neutralizar la causa o causas.
- Optimizar los costes.
- Ser aceptables por los que tienen la última palabra.

Remedios: Eliminar las causas. Los remedios propuestos deberán normalmente vencer tres obstáculos para ser realmente efectivos:

1. El equipo del proyecto acepta la propuesta siguiendo un razonamiento lógico: su creencia de que el remedio propuesto cumplirá con los criterios precedentes.
2. La propuesta es sometida a tests a pequeña escala, bien sea en operaciones o en laboratorio.
3. La propuesta es sometida a tests a escala completa durante las operaciones.

En muchas empresas ha existido un cuarto obstáculo; la responsabilidad de los equipos del proyecto es vaga o se limita a *recomendar* remedios, sin responsabilidad subsiguiente. En tales casos, simplemente no se actúa sobre muchas recomendaciones. Los resultados son mucho mejores en empresas que hacen a los equipos del proyecto responsables de lograr que se apliquen de hecho los remedios y que sean efectivos en condiciones operativas.

Muchos remedios consisten en cambios tecnológicos. Éstos se encuentran con los prejuicios de algunos departamentos de remedio, tales como favorecer remedios que impliquen com-

prar nuevos equipamientos. En muchos casos, sin embargo, el remedio óptimo está en hacer un mejor uso de los equipamientos existentes [véanse ejemplos en Black y Stump (1987) y también en Bigelow y Floyd (1990)].

En la realidad, los remedios con el más alto retorno sobre la inversión han implicado cambios en la gestión, más que cambios tecnológicos. Una prueba impresionante de esto se vio cuando equipos de Estados Unidos visitaron a sus correspondientes japoneses para aprender por qué la calidad japonesa era superior. Estas visitas se hicieron a plantas que fabricaban acero, neumáticos, troqueles, circuitos integrados a gran escala, automóviles, etc. Los estadounidenses se quedaron estupefactos al encontrar que los equipamientos japoneses (maquinaria, herramientas, instrumentos, etc.) eran idénticos a los usados en las plantas estadounidenses: incluso los habían comprado a los mismos proveedores. La diferencia en la calidad había resultado de hacer un mejor uso de los equipamientos existentes (experiencia personal del autor).

Otros remedios consisten en revisar asuntos de naturaleza de gestión general: políticas, planes, organización, normas, procedimientos. Estos remedios tienen efectos que se extienden más allá del proyecto específico bajo estudio. Lograr que se acepten dichos remedios requiere una habilidad especial en el tratamiento de la resistencia cultural (véase más adelante).

Ocasionalmente, los remedios pueden ser altamente imaginativos. En una planta en que se fabricaban chips para circuitos integrados, un problema de vibraciones causado por una línea férrea cercana fue solucionado construyendo una piscina entre la planta y la línea férrea. Otro problema era debido al polvo de cemento de una planta mezcladora de hormigón adyacente. El remedio: comprar la planta y demolerla.

Para algunos problemas de calidad crónicos, el remedio consiste en *volver a planificar* algunos aspectos del proceso o producto en cuestión (véase la metodología en el Capítulo 3, «El proceso de planificación de la calidad»).

Remedios: Optimizar los costes. En procesos complejos es fácil aplicar un remedio que reduce costes en el departamento A, para enterarse luego que esta reducción de costes está más que compensada por el aumento de costes en el departamento B. Puede ser peor el remedio que la enfermedad. El equipo del proyecto deberá comprobar los efectos laterales del remedio para asegurarse de que los costes para la empresa son óptimos. Esta misma comprobación deberá extenderse al efecto sobre los costes de los clientes externos.

Un equipo de proyecto bien elegido puede hacer mucho por optimizar los costes, ya que sus miembros son multifuncionales. Sin embargo, el equipo deberá mirar más allá de las funciones de sus miembros. También deberá lograr la ayuda del personal de *staff* de departamentos como finanzas para colaborar en la revisión de las cifras y las estimaciones (véase detalles sobre cuantificación de los costes relacionados con la calidad en el Capítulo 8, «Calidad y costes»).

Remedios: Aceptabilidad. Cualquier remedio supone un cambio de algún tipo: rediseñar el producto o el proceso, revisar las herramientas, volver a formar al trabajador. Cada uno de estos cambios entra en la jurisdicción de algún departamento funcional que entonces se convierte en el departamento reparador del proyecto en cuestión. Normalmente se respetan las líneas jurisdiccionales, de forma que la responsabilidad de hacer el cambio recaiga en el departamento reparador, no en el equipo de proyecto.

Todo esto se simplifica si alguien del departamento reparador es miembro del equipo de proyecto, lo que habitualmente es el caso. Dicho miembro mantiene informados a sus superiores y así ayuda a lograr que el remedio propuesto se adopte sin dilación.

El asunto es más complejo si el departamento reparador no está representado en el equipo de proyecto. En este caso, el equipo debe recomendar que el departamento reparador adopte el remedio. Esta recomendación puede encontrar resistencia por razones culturales, incluido un posible resentimiento por no estar representado. El equipo de proyecto se enfrenta entonces

con intentar convencer al departamento reparador de los méritos del cambio. Si se encuentra en un callejón sin salida, el equipo puede apelar a su patrocinador o a otros medios, como canales en la jerarquía.

Lo ideal es que el departamento reparador esté representado en el equipo desde el inicio. No siempre es factible: en el inicio no se sabe cuáles acabarán siendo las causas y, por ende, el remedio. No obstante, una vez que es evidente el carácter del remedio, se deberá invitar al correspondiente departamento reparador a que se una al equipo.

El concepto de anticipar resistencias se aplica también a otras fuentes: el sindicato, la comunidad local, etc. El equipo hará bien en buscar medios de establecer un diálogo con quienes son serios oponentes potenciales al remedio. (Más adelante, bajo Resistencia al cambio, se debate la resistencia cultural).

El remedio para defectos raros pero críticos. Algunos defectos, aunque raros, pueden tener efectos catastróficos para la vida o la propiedad. Para estos defectos hay remedios especiales:

- Aumentar el factor de seguridad mediante material estructural adicional, uso de materiales exóticos, diseño tanto para el mal uso como para el uso pretendido, diseño a salvo de fallos, etc. Prácticamente, todos ellos suponen un aumento de costes.
- Aumentar la cantidad y el rigor de los tests. La correlación de datos en tests rigurosos frente a tests normales proporciona entonces una predicción de las tasas de fallos.
- Reducir la variabilidad del proceso. Se aplica cuando los defectos tienen su origen en la fabricación.
- Usar tests automatizados al 100 por ciento. Este concepto ha sido facilitado recientemente por un notable crecimiento de la tecnología: métodos de test no autodestructivos, aparatos de prueba automatizados y controles informatizados.
- Usar inspección redundante al 100 por ciento. La inspección por seres humanos puede ser notoriamente falible. Para hallar defectos raros pero críticos, se pueden usar inspecciones múltiples al 100 por ciento.

Remedio mediante replicación. Una forma de replicación de remedios es la *clonación*, como se trató anteriormente en esta sección bajo Selección del proyecto, clonación. Mediante la clonación, un remedio desarrollado en un proyecto puede tener aplicación en otro sitio de la misma empresa. También se puede conseguir la replicación mediante un remedio genérico que se aplica a una variedad de tipos de errores.

El trabajo de oficina ha tenido durante largo tiempo el fastidioso problema de las faltas de ortografía. Estas faltas de ortografía están dispersas entre numerosas palabras distintas. Hoy día, los programas de procesado de textos incluyen en su memoria un diccionario como medio de detectar faltas de ortografía. Los planificadores hallaron una forma de resolver los numerosos tipos de errores, cada uno de los cuales es comparativamente raro.

Test bajo condiciones de operación. Los remedios, antes de adoptarse, se someten a menudo a tests en el laboratorio. Un planteamiento común es desarrollar un modelo teórico y luego construir y probar algunos prototipos. Es un paso valioso que puede filtrar remedios inadecuados. Pero es limitado para predecir los resultados en el mundo real de las operaciones:

- El modelo teórico está basado en presunciones que nunca se cumplen del todo.
- Los prototipos se construyen en un entorno de laboratorio, más que en un entorno operativo.
- El test se hace con un tamaño de muestra pequeño y bajo condiciones de test estrictamente controladas.
- El test lo hacen técnicos formados bajo la guía de supervisores e ingenieros.

Estas y otras limitaciones crean el riesgo de que el remedio, a pesar de haber pasado su examen de laboratorio con las mejores calificaciones, no resulte adecuado bajo condiciones operativas. Esto ha llevado a muchas empresas a requerir que el equipo del proyecto permanezca unido al proyecto hasta que el remedio se haya probado bajo condiciones operativas.

Control a un nuevo nivel; afianzar las ventajas. Permitir a las fuerzas operativas afianzar las ventajas requiere (1) una transferencia exitosa del remedio desde el laboratorio a las operaciones y (2) un medio sistemático de afianzar las ventajas: el proceso de control. Lo ideal sería que el cambio reparador fuera irreversible. A falta de esto, puede ser necesario realizar auditorías periódicas para asegurarse de que el cambio sigue implantado:

En un famoso proyecto de fundición, un cambio suponía la sustitución de viejas espitas de calderos de colada por espitas de diámetro mayor. Para hacer irreversible el cambio, se destruyeron las viejas espitas. Un remedio distinto requirió que los operarios de los crisoles usaran básculas para pesar con precisión la cantidad de metal a verter. Este cambio podía revertirse: algunos operarios de los crisoles no usaron las básculas; volvieron directamente a calcular a ojo y por intuición.

La transferencia a operaciones deberá incluir las revisiones de las normas de operación, los procedimientos y demás aspectos necesarios para servir de base para la formación, los controles y las auditorías. Estos asuntos suelen estar bien definidos con respecto a la tecnología. Por el contrario, las normas y procedimientos son a menudo vagos o mudos en materias tales como por qué se deberán cumplir los criterios, qué puede suceder si no se cumplen, mantenimiento del equipamiento y métodos de trabajo. El fallo en tratar estas áreas puede amenazar el afianzamiento de las ganancias.

La transferencia a operaciones deberá incluir la transferencia de la información relativa al cambio. Esta transferencia puede requerir una formación seria en el uso de los nuevos procesos y métodos. Supone una ayuda que la formación también se extienda a los motivos del cambio, las nuevas responsabilidades resultantes sobre decisiones y acciones, y los hallazgos significativos que aparecieron durante el proyecto.

El paso final es establecer controles para afianzar las ventajas. Se hace mediante el bucle de realimentación: un proceso cíclico de evaluación del rendimiento real, comparándolo con la norma y emprendiendo acciones sobre la diferencia. (Varios aspectos del proceso de control se tratan en el Capítulo 4, «El proceso de control de la calidad»; Capítulo 45, «Control estadístico del proceso», y Capítulo 11, «La familia de normas internacionales ISO 9000»).

ERROR HUMANO: DIAGNÓSTICO Y REMEDIO

En algunos proyectos, entre las causas de los problemas se incluye el error humano. Dichos errores los cometen todos los seres humanos, directores, supervisores, especialistas profesionales y trabajadores. Excepto en el caso de los errores de los trabajadores, el asunto ha sido poco investigado, de forma que la base de datos es pequeña. En vista de ello, lo que sigue se centra en los errores de los trabajadores.

Extensión de los errores de los trabajadores. La mayor parte de los errores es controlable por los directivos. Los errores son controlables por los trabajadores sólo si se han cumplido todos los criterios de autocontrol; si el trabajador tiene los medios de:

- Saber lo que se supone que tiene que hacer.
- Saber cuál es su rendimiento real.
- Regular su rendimiento.

Investigadores de muchos países han realizado estudios sobre la controlabilidad. Según se me ha informado, generalmente confirmaban mis propias conclusiones de que en la industria, en general, la controlabilidad que predomina es la siguiente:

- Controlable por los directivos: más del 80 por ciento.
- Controlable por los trabajadores: menos del 20 por ciento.

Clases de errores de los trabajadores. Durante largo tiempo los directivos han sostenido en su mayoría la creencia de que los errores de los trabajadores se debían a falta de motivación. Sin embargo, investigaciones recientes han mostrado que existen múltiples clases de errores de los trabajadores y que sólo una minoría de estos errores tienen su origen en la falta de motivación.

La Tabla 5.8 muestra la distribución de 80 errores cometidos por seis trabajadores administrativos dedicados a preparar contratos de pólizas de seguros. Hay 29 tipos de errores y son de múltiples orígenes.

El error tipo 3 se cometió 19 veces, pero el trabajador B cometió 16 de ellos. Pero, excepto el error tipo 3, el trabajador B comete pocos errores. Aparentemente, no hay nada equivocado con el trabajador B, excepto el defecto tipo 3. También aparentemente, no hay nada equivocado con las instrucciones de la tarea, ya que nadie más tiene problemas con errores del tipo 3. Parece ser que el trabajador B, y nadie más, interpreta mal alguna instrucción, lo que resulta en ese cúmulo de 16 errores del tipo 3.

El error del tipo 5 es de una clase distinta. Hay 13 de ellos, y cada trabajador comete este error, más o menos uniformemente. Esto sugiere una diferencia en el enfoque entre todos los trabajadores por un lado y el inspector por otro. Esta diferencia se origina habitualmente en la dirección, pero la realidad se puede determinar entrevistando a los empleados respectivos.

Un tercer fenómeno es la columna de números asociados con el trabajador E. El total es 36 errores: el trabajador E cometió casi la mitad de los errores y los cometió en virtualmente todas las categorías de tipos de errores. ¿Por qué cometió el trabajador E tantos errores? Puede ser debido a una de varias causas, tales como formación inadecuada, falta de capacidad para hacer un trabajo riguroso, etc. Se necesita estudiarlo más, pero algunos directivos pueden preferir ir de los síntomas directamente al remedio: encontrar un trabajo menos exigente para ese trabajador.

TABLA 5.8 Matriz de errores de redactores de pólizas de seguros

Tipo de error	Redactor de pólizas						Total
	A	B	C	D	E	F	
1	0	0	1	0	2	1	4
2	1	0	0	0	1	0	2
3	0	(16)	1	0	2	0	(19)
4	0	0	0	0	1	0	1
5	2	1	3	1	4	2	(13)
6	0	0	0	0	3	0	3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
27							
28							
29							
TOTAL	6	(20)	8	3	(36)	7	80

Esta sencilla tabla de datos demuestra la existencia de múltiples clases de errores de los trabajadores. El remedio no es tan simplista como «motivar al trabajador». El análisis de muchas tablas parecidas, más el descubrimiento de las causas, ha identificado cuatro clases principales de errores de los trabajadores: no advertido, técnico, consciente y de comunicación. La Tabla 5.9 muestra la interrelación entre las pautas de error, las subclases probables y los remedios probables. Las clases de errores se examinan a continuación.

Errores no advertidos. «No advertido» significa «causado por falta de atención». Los errores no advertidos se cometen a causa de la imposibilidad humana de mantener la atención. (Los generales y almirantes de la antigüedad limitaron la duración de la vigilia del centinela a causa del riesgo de la falta de atención). (Si la falta de atención es deliberada, entonces los errores resultantes son conscientes más que no advertidos).

La comprensión de las características que los distinguen ayuda a identificar los errores como no advertidos:

- *No intencional.* El trabajador no desea cometer errores.
- *Ignorado.* En el momento de cometer el error, el trabajador no se da cuenta de haberlo cometido.
- *Impredecible.* No hay nada sistemático sobre el momento en que se cometerá el próximo error, qué tipo de error se hará o qué trabajador cometerá el error. Debido a esta imposibilidad de predicción, la pauta de error es *aleatoria*. Y viceversa, los datos que muestran una pauta aleatoria de error de los trabajadores sugieren que los errores se deben a inadvertencia. La aleatoriedad se puede aplicar a los tipos de error, a los trabajadores que cometen los errores y al momento en que ocurren los errores.

TABLA 5.9 Interrelación entre las pautas de error humano

Pauta revelada por análisis de errores de los trabajadores	Subclases probables de error que causan esta pauta	Solución probable
En ciertos defectos, nadie es proclive a error; la pauta del defecto es aleatoria.	Los errores se deben a inadvertencia.	Hacer el proceso a prueba de errores.
En ciertos defectos, algunos trabajadores son persistentemente proclives a error, mientras que otros son persistentemente «buenos».	Los errores se deben a falta de técnica (habilidad, conocimientos, etc.). La falta de técnica puede tomar la forma de ignorancia secreta. La técnica puede consistir en un truco conocido o en su conocimiento secreto.	Descubrimiento y propagación de los trucos. Descubrimiento y eliminación de la ignorancia secreta.
Algunos trabajadores son persistentemente proclives a error en una amplia gama de defectos.	Hay varias causas potenciales: • Fallo consciente en atenerse a las normas. • Incapacidad inherente para realizar esta tarea. • Falta de formación.	La solución sigue a la causa: • Motivación. • Transferencia del trabajador. • Proporcionar formación.
En ciertos defectos, todos los trabajadores son persistentemente proclives a error.	Los errores son controlables por la dirección.	Cumplir los criterios de auto-control. Normalizar el lenguaje; proporcionar traducción, glosarios.

La causa de los errores no advertidos es la falta de atención. ¿Pero qué causa la falta de atención? La búsqueda de respuesta conduce a las complejidades de los fenómenos psicológicos (v.g., monotonía) y fisiológicos (v.g., fatiga). No son completamente entendidos ni por los expertos. Explorar estas complejidades en profundidad significa profundizar cada vez más en una sima sin fondo. Los directivos prácticos prefieren rodear la sima; ir directamente del síntoma al remedio.

Remedios para errores no advertidos. Los remedios para los errores no advertidos implican dos planteamientos principales:

1. Reducir la dependencia de la atención humana mediante la preparación a prueba de errores: diseños libres de fallos, recuentos, verificación redundante, cortes, entrelazados, señales de alarma, automatización y robots. (El uso del código de barras ha reducido mucho los errores al identificar los productos).
2. Hacer más fácil que los trabajadores permanezcan atentos. Reorganizar el trabajo para reducir la fatiga y la monotonía utilizando la rotación de puestos, multiplicadores sensoriales, plantillas, máscaras, cubiertas, etc.

Errores técnicos. Los errores técnicos se cometen porque a los trabajadores les falta la «chispa»: alguna técnica, habilidad o conocimiento esencial necesario para evitar que ocurran errores. Los errores técnicos muestran ciertas características externas. Son:

- *No intencional.* El trabajador no desea cometer errores.
- *Específico.* Los errores técnicos son únicos para ciertos defectos, aquellos tipos para los que la técnica que falta es esencial.
- *Persistente.* Los trabajadores a los que les falta la técnica esencial cometen persistentemente más defectos que los trabajadores que poseen la técnica. Esta persistencia es claramente evidente en los datos sobre errores de los trabajadores.
- *Inevitable.* Los trabajadores inferiores son incapaces de igualar el rendimiento de los trabajadores superiores porque no saben «qué hacer de modo diferente».

Vemos un ejemplo de errores técnicos en el caso de montaje de rifles. Los rifles eran montados por artesanos expertos, cada uno de los cuales montaba rifles completos a partir de diversas piezas. Después del test de seguridad, alrededor del 10 por ciento de los rifles no se podía abrir para sacar el cartucho usado, un defecto conocido como «difícil de abrir después del tiro». Para este defecto era necesario desmontar el rifle y luego volverlo a montar, requiriendo unas dos horas por rifle defectuoso, un desperdicio crónico significativo.

Después de muchas discusiones, se preparó una tabla como la 5.10 para mostrar el rendimiento de los montadores. Esta tabla muestra la frecuencia de «difícil de abrir después del tiro» por montador y por mes durante un período de seis meses. El análisis de la tabla produce hallazgos significativos:

- La tasa *departamental* de defectos variaba mucho de mes a mes, yendo desde un bajo 1,8 por ciento en enero a un alto 22,6 por ciento en febrero. Ya que todos los trabajadores parecían afectados, esta variación tenía su causa fuera del departamento (el análisis subsiguiente lo confirmó).
- La relación de los cinco mejores rendimientos de los trabajadores con los cinco peores mostraba una *persistencia asombrosa*. En cada uno de los 6 meses, los cinco peores rendimientos totalizaban una tasa de error que era al menos 10 veces más grande que la suma de los cinco mejores rendimientos. Debía haber una razón para una diferencia tan persistente, y se pudo hallar estudiando los métodos de trabajo, las técnicas utilizadas por los respectivos trabajadores.
- La *chispa*. El estudio de los métodos de trabajo mostró que los trabajadores con los rendimientos superiores utilizaban una lima para recortar una de las dimensiones de un compo-

TABLA 5.10 Análisis matricial para identificar errores técnicos

Número de operador de montaje	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Total
1	4	1	0	0	0	0	5
2	1	2	0	5	1	0	9
3	3	1	0	3	0	3	10
4	1	1	0	2	2	4	10
5	0	1	0	10	2	1	14
6	2	1	0	2	2	15	22
•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•
17	18	8	3	37	9	23	98
18	16	17	0	22	36	11	102
19	27	13	4	62	4	14	124
20	6	5	2	61	22	29	125
21	39	10	2	45	20	14	130
22	26	17	4	75	31	35	188
TOTAL	234	146	34	496	239	241	1.390
% defectuoso	10,6	6,6	1,8	22,6	10,9	11,0	10,5
5 mejores	9	6	0	20	5	8	48
5 peores	114	62	12	265	113	103	669
Relación	13	20	∞	13	23	13	14

nente complejo; los trabajadores con los rendimientos superiores no la utilizaban. Este afilado constituía la chispa: una pequeña diferencia en el método suponía una gran diferencia en los resultados. (Hasta que se hizo el diagnóstico, no se dieron cuenta los montadores superiores de que el afilado reducía mucho la incidencia de «difícil de abrir después del tiro»).

Normalmente, la diferencia en el rendimiento de los trabajadores es achacable a alguna habilidad superior utilizada por los trabajadores de mayor rendimiento para beneficiar el producto. En el caso de los montadores de rifles, la habilidad consistía en afilar el componente adecuado. En otros casos, la diferencia en el rendimiento de los trabajadores se debe a un *daño hecho al producto por los trabajadores de rendimiento inferior* no intencionado, una especie de «chispa negativa» o torpeza.

Hay una regla útil para predecir si la diferencia en el rendimiento de los trabajadores es debida a una habilidad beneficiosa o a una habilidad negativa. Si los rendimientos superiores son minoría, la diferencia es debida probablemente a una habilidad beneficiosa; si los rendimientos inferiores son minoría, entonces la diferencia en rendimientos es claramente debida a una habilidad negativa.

En una operación de montaje de aviones, el análisis de los datos de trabajadores individuales reveló que un trabajador cumplía con la cuota de producción persistentemente, mientras que otros no la cumplían. El trabajador explicó que se había llevado el destornillador a motor a casa y había recompuesto el motor. La empresa sustituyó todos los motores, con el resultado de un aumento en calidad y productividad.

El análisis de los datos sobre daños a cigüeñales mostró que sólo el producto de un trabajador tenía daños. Un estudio en el taller reveló entonces que este trabajador a veces golpeaba un cigüeñal contra una correa transportadora. ¿Por qué? Porque el trabajador era zurdo y la disposición del puesto de trabajo era demasiado inconveniente para una persona zurda.

El caso del montaje de rifles muestra los peligros de dar por supuesto que las diferencias en el rendimiento de los trabajadores se deben a falta de motivación. Esta presunción no es

válida cuando se aplica a errores técnicos. Los errores técnicos están condenados a permanecer hasta que se hallen medios de proporcionar a los trabajadores inferiores una respuesta a la pregunta «¿Qué deberé hacer de manera diferente a como lo estoy haciendo ahora?».

¿Cómo hay que contestar a estas preguntas? Los equipos de mejora de los trabajadores a veces pueden proporcionar respuestas. De no ser así, continuarán haciendo lo que han estado haciendo (y seguirán cometiendo los mismos defectos) hasta que la dirección les proporcione las respuestas.

Remedios para errores técnicos. La solución de numerosos casos de errores técnicos ha originado un planteamiento genérico estructurado:

1. Recoger datos sobre el rendimiento individual de los trabajadores.
2. Analizar los datos para ver las diferencias consistentes de trabajador a trabajador.
3. En casos de diferencias consistentes, estudiar los métodos de trabajo utilizados por los trabajadores con mejores y peores rendimientos para identificar las diferencias entre sus técnicas.
4. Estudiar más las diferencias hasta descubrir el truco que produce los resultados superiores (o la torpeza que daña el producto).
5. Llevar a todos hasta el nivel del mejor mediante acciones de remedio tales como:
 - Formar a los trabajadores con peores rendimientos en el uso del truco o en la prevención del daño.
 - Cambiar la tecnología de forma que el proceso incorpore el truco.
 - Hacer el proceso a prueba de errores con medios que obliguen a usar el truco o que impidan actuar con torpeza.
 - Establecer controles y auditorías para afianzar las ventajas.

Errores conscientes. Los errores conscientes implican elementos psicológicos característicos:

- *A sabiendas.* En el momento de cometer el error, el trabajador se da cuenta de haberlo cometido.
- *Intencional.* El error es el resultado de una decisión deliberada por parte del trabajador.
- *Persistente.* El trabajador que comete el error normalmente tiene intención de mantenerlo.

Los errores conscientes también presentan algunas evidencias externas singulares. Mientras que los errores no advertidos son aleatorios, los errores conscientes muestran persistencia: algunos trabajadores cometen persistentemente más errores que otros. Sin embargo, mientras que los errores técnicos se restringen normalmente a uno o unos pocos tipos de defectos, los errores conscientes tienden a abarcar un amplio espectro de tipos de defectos.

A la vista de esto, los trabajadores que cometen errores conscientes merecen ser castigados, pero este principio sólo tiene validez parcial. Muchos de estos errores son realmente *iniciados por la dirección*.

Una fuente importante de errores conscientes es un ambiente de reproche. En tal ambiente, los trabajadores se defienden ignorando las reglas de la empresa. Omiten redactar los bonos de repetición del trabajo, ocultan el desecho, etc.

Otra fuente extendida de errores conscientes es el conflicto entre prioridades. Por ejemplo, en un mercado de vendedores, la prioridad en las fechas de entrega puede prevalecer sobre algunas normas de calidad. La presión sobre los directores se transmite a través de la jerarquía y puede dar como resultado una transgresión consciente de normas de calidad para cumplir con las fechas de entrega.

Además, algunas acciones bien intencionadas de la dirección pueden tener un efecto negativo. Por ejemplo, los directores lanzan una campaña de carteles para incitar a todos a hacer mejor el trabajo. Sin embargo, la campaña no tiene previsto solucionar algunos problemas de

calidad bien conocidos por los trabajadores: baja calidad de los proveedores, procesos incapaces, mantenimiento inadecuado de los equipamientos, etc. De este modo la dirección pierde credibilidad: los trabajadores concluyen que el mensaje real de los directores es «Hacer lo que decimos, no lo que hacemos».

Algunos errores conscientes son iniciados por los trabajadores. Los trabajadores pueden tener algún agravio real o imaginado contra el jefe o la empresa. Pueden vengarse no cumpliendo las normas. Algunos se convierten en rebeldes contra todo el sistema social y usan el sabotaje para mostrar su resentimiento. Algunos de los ejemplos encontrados son tan obviamente antisociales que nadie —ni sus compañeros ni el sindicato— defenderá sus acciones.

Hasta cierto grado, los errores conscientes de los trabajadores se pueden tratar mediante procesos disciplinarios. No obstante, los directores tienen también a su disposición un amplio campo de remedios constructivos para los errores conscientes de los trabajadores.

Remedios para errores conscientes. Generalmente, los remedios listados aquí ponen el énfasis en conseguir cambios en el comportamiento, pero sin cambiar necesariamente las actitudes. Los remedios pueden dirigirse a las personas o al «sistema» (los procesos tecnológicos y de gestión):

- *Despersonalizar las órdenes.* En una planta textil, las hiladoras no hacían correctamente los nudos («nudos llanos») cuando unían dos cabos de hilo. Las súplicas y amenazas del supervisor eran en vano. A las hiladoras les disgustaba el supervisor y estaban resentidas con las pobres respuestas de la empresa a sus protestas. El problema se resolvió cuando el director de personal se llevó a la líder informal de las hiladoras al Departamento de Tejido para mostrarle los problemas que estaban teniendo las tejedoras debido a los nudos incorrectos. A pesar de sus protestas sin resolver, una vez que supieron lo que ocurría en el taller de tejido, las hiladoras no quisieron seguir causando problemas a sus compañeras de trabajo. El principio implicado aquí es *la ley de la situación*; una *persona* no deberá dar órdenes a otra *persona*; ambas deberán recibir órdenes de la situación. *La ley de la situación* es una frase acuñada por Mark Parker Follet [véanse Metcalf y Urwick (1941)]. La situación en el Departamento de Tejido requiere que se hagan nudos llanos. Por lo que esta situación está obligando al presidente, a los directores, a los supervisores y a las hiladoras.
- *Establecer la responsabilidad.* Como ejemplo, en una empresa el producto final se empaquetaba en balas voluminosas que eran transportadas por camiones elevadores de carga convencionales. Periódicamente, un diente del tenedor de carga agujereaba una bala y causaba gran cantidad de daño. Pero no había medio de saber qué camión movía qué bala. Cuando la empresa introdujo un sencillo modo de identificar qué camión movía qué bala, la cantidad de daño se redujo espectacularmente.
- *Proporcionar un énfasis equilibrado.* Los trabajadores descubren las prioridades reales de la empresa sobre las múltiples normas (calidad, productividad, entrega) a partir del comportamiento de la dirección. Por ejemplo, los registros sobre tasas de productividad y entrega deberán complementarse con unos registros sobre calidad para dejar claro que el énfasis está equilibrado.
- *Realizar auditorías periódicas de la calidad.* Los sistemas de trazabilidad o de registros continuos no siempre compensan los costes. Se pueden diseñar auditorías de la calidad, que suministren, en forma de muestreo, información de los tipos de responsabilidad y de registro.
- *Proporcionar ayuda a los trabajadores.* Las ayudas visuales para prevenir defectos pueden ser útiles. Algunas empresas han usado carteles murales con listas de los cuatro o cinco defectos principales en el departamento, junto con un texto y una descripción gráfica del truco que puede ser útil para evitar cada defecto.

- *Crear competencias, incentivos.* Estos esquemas tienen valor potencial si no se usan mal. La competencia entre trabajadores y equipos se deberá diseñar para mantenerse en un nivel de buen humor y camaradería, como las que predominan entre los equipos deportivos de los departamentos. Los incentivos financieros tienen un atractivo engañoso. Parecen buenos mientras la paga sube: durante esa parte del ciclo hay «bonos» por el buen trabajo. Sin embargo, durante una racha de mal trabajo, la eliminación de los bonos convierte los incentivos en castigos, con todos los argumentos asociados sobre quién es responsable. Los incentivos no financieros evitan las trampas de los bonos de convertirse en castigos, pero se deberá tener un nivel digno.
- *Hacer la operación a prueba de errores.* La eliminación de errores se ha aplicado ampliamente a los errores conscientes (véase el Capítulo 22, «Operaciones», bajo El proceso de eliminación de errores).
- *Reasignar el trabajo.* Una opción que habitualmente está a disposición de los directores es la asignación selectiva, es decir, asignar el trabajo más exigente a los trabajadores con mejor historial de calidad. La aplicación de este remedio puede requerir rediseñar las tareas: separar el trabajo crítico del resto, de forma que sea factible la asignación selectiva.
- *Uso de las herramientas de motivación.* Este tema se trata en el Capítulo 15, «Recursos humanos y calidad».

Esta lista de remedios ayuda a resolver muchos errores conscientes. Sin embargo, el estudio previo de los síntomas y sus circunstancias concurrentes es esencial para elegir el remedio más efectivo.

Errores de comunicación. Una cuarta fuente importante de error humano es achacable a errores de comunicación. Hay numerosas subespecies de ellos, pero pocos son especialmente problemáticos:

- *Comunicación omitida.* Algunas omisiones se deben a los directores. Se dan situaciones en que los directores emprenden acciones para enfrentarse a algún problema de calidad pero sin informar a los trabajadores de por qué. Por ejemplo, tres lotes de productos no son conformes con la característica X de calidad. En cada caso, el inspector retiene el lote. En cada caso, un comité de revisión de material concluye que el lote es adecuado para su uso y lo autoriza para su entrega. Sin embargo, ni a los trabajadores de producción ni a los inspectores se les dice por qué. No conociendo los motivos, estos trabajadores pueden deducir (con alguna lógica) que la característica X no es importante. Esto prepara el campo para futuras acciones no autorizadas. En este tipo de casos y en muchos otros, los procedimientos de la empresa dan por sentado que los trabajadores no necesitan saber. (Los formularios de autorización del comité de revisión de material no contienen espacios para que sus miembros se enfrenten a la pregunta «¿Qué deberemos comunicar a los trabajadores?») A falta de tal previsión, pocas veces se hacen esa pregunta, de modo que, por defecto, no hay comunicación.
- *Comunicación inhibida.* En la mayoría de las jerarquías, el ambiente históricamente predominante ha inhibido la comunicación de abajo arriba. El taylorismo del siglo XIX empeoró las cosas al separar la planificación de la ejecución. Más recientemente, los directores han intentado usar esta potencial fuente de información mediante conceptos específicos tales como sistemas de sugerencias, equipos de mejora de los empleados, y, más recientemente, equipos autodirigidos de trabajadores. La elevación de los niveles de educación del siglo XX ha aumentado en gran medida el potencial de los trabajadores para participar con provecho en las operaciones de planificación y mejora. Es un enorme activo infrautilizado. Los directores harían bien en tomar medidas para hacer mayor uso de este activo.

- **Errores de transmisión.** Estos errores no son conscientes. Surgen de las limitaciones de la comunicación humana. Palabras idénticas tienen significados múltiples, de forma que el transmisor puede tener en mente un significado, pero el receptor tiene en mente un significado diferente. Los dialectos difieren entre las empresas e incluso dentro de las empresas. (El principal lenguaje en los altos niveles habla de dinero, mientras que en los niveles inferiores habla de cosas).

Una categoría crítica de la terminología es la relativa a las palabras usadas para transmitir conceptos amplios y materias del tipo de gestión: políticas, objetivos, planes, estructura de la organización, órdenes, consejos, revisiones, incentivos, auditorías. Los receptores son principalmente internos, de todas las funciones y de todos los niveles. El problema está en lograr que los receptores interpreten las palabras de la forma pretendida por los transmisores.

En otros casos, la intención del transmisor está clara, pero lo que llega al receptor es algo completamente distinto. Una coma mal colocada puede cambiar radicalmente el significado de una frase. En las comunicaciones orales, el ruido de fondo puede confundir al receptor.

En un partido de fútbol importante, en una jugada clave cerca del final, entre el ruido ensordecedor del público, la señal defensiva era *three*, que significaba una defensa hombre a hombre. Un defensa pensó que había oído *green*, que significaba una defensa de zona. Por culpa del error se perdió el juego (Anderson 1982).

Remedios para errores de comunicación. Los errores de comunicación son lo suficientemente extensos y serios como para demandar acciones de remedio. La variedad de errores ha requerido una correspondiente variedad de remedios:

- **Traducción.** Para algunos errores, el remedio está en crear un modo de traducir las comunicaciones de los transmisores al lenguaje de los receptores. Un ejemplo común es el Departamento de Emisión de Pedidos, que recibe los pedidos de los clientes. Algunos elementos de estos pedidos están en el lenguaje del cliente. Emisión de Pedidos traduce estos elementos al lenguaje del proveedor, mediante números de código del producto, acrónimos y otros medios. La versión traducida se emite luego como un documento interno dentro de la empresa del proveedor. Un segundo ejemplo son los especialistas del Departamento de Servicio Técnico. Los especialistas de este departamento reciben formación para conocer a fondo los productos de su empresa. A través de contactos con los clientes, conocen las necesidades de los clientes. Este conocimiento combinado les permite ayudar a ambas empresas a comunicarse, incluyendo la ayuda en la traducción.
- **El glosario.** Este útil remedio requiere alcanzar un acuerdo sobre las definiciones de las palabras y las frases clave. Estas definiciones se publican entonces en forma de glosario: una lista de términos y sus definiciones. La publicación puede embellecerse con otras formas de comunicación: dibujos, fotografías o videos.
- **Normalización.** Conforme las empresas maduran, adoptan la normalización para beneficio mutuo de clientes y proveedores. Se extiende al lenguaje, productos, procesos, etc. En el caso de bienes físicos, el uso de la normalización está muy extendido. Sin ella, una sociedad tecnológica sería una perpetua torre de Babel. Todas las organizaciones utilizan designaciones breves para sus productos: números de código, acrónimos, etc. Esta nomenclatura normalizada facilita la comunicación interna. Si también los clientes externos adoptan la nomenclatura, se reduce enormemente el problema de los dialectos múltiples. La *Airline Flight Guide* publica información de vuelos para las múltiples compañías de aviación. Esta información está bien normalizada. Algunos clientes aprenden a leer la guía de vuelos. Para estos clientes se simplifica enormemente la comunicación con las compañías de aviación.
- **Medidas.** Decirlo en números es un remedio efectivo para algunos problemas de comunicación, v.g., aquellos en que se usan los adjetivos (como *espacioso*, *cálido*, *rápido*,

etcétera.) para describir las características del producto. (Para más información, véase el Capítulo 9, «Medición, información y toma de decisiones»).

- *Un papel para los altos directivos.* Las empresas sufren grandes gastos y demoras debido a la mala comunicación. Los remedios se conocen, pero no salen de las operaciones diarias. En vez de eso, son el resultado de proyectos específicos establecidos para crearlos. Además evolucionan lentamente, porque comparten la característica común de «invertir ahora para obtener beneficios más tarde». Los altos directivos pueden, por su posición, acelerar esta evolución creando equipos de proyecto cuya misión sea proporcionar los remedios necesarios.

RESISTENCIA AL CAMBIO

A la vista de esto, una vez determinado el remedio, todo lo que queda es aplicarlo. Pues no. En vez de eso, se levantan numerosos obstáculos de diversos orígenes. Puede haber tácticas dilatorias o el rechazo de un directivo, de los trabajadores o del sindicato. «Resistencia al cambio» es el nombre popular para estos obstáculos.

Modelos culturales. La comprensión de la resistencia al cambio empieza con el descubrimiento de que todo cambio implica en la realidad dos cambios:

1. El cambio *pretendido*.
2. La *consecuencia social* del cambio pretendido.

La consecuencia social es la causante de los problemas. Consiste en el impacto del cambio pretendido sobre el *modelo cultural* de los seres humanos implicados: en su modelo de creencias, hábitos, tradiciones, prácticas, símbolos de *status*, etc. Esta consecuencia social es la causa que está en la raíz de la resistencia al cambio. Resolver esta resistencia requiere una comprensión del carácter de los modelos culturales.

Lo ideal sería que los promotores del cambio sean conscientes de que todas las sociedades humanas desarrollan modelos culturales y que éstos son defendidos encarnizadamente como parte de «nuestro estilo de vida». Además, los promotores deberán intentar descubrir qué amenazará precisamente sus propuestas: qué hábitos, qué *status*, qué creencias. Desgraciadamente, demasiados promotores *no son ni siquiera conscientes de la existencia de modelos culturales*, menos aún de su estructura detallada.

Para hacer las cosas más complejas, quienes se resisten al cambio con frecuencia declaran sus razones como objeciones a la valía del cambio propuesto, mientras que las verdaderas razones están relacionadas con las consecuencias sociales. En consecuencia, los promotores del cambio propuesto están confundidos porque las razones declaradas no son las verdaderas razones de la resistencia.

Como ejemplo, las empresas que fueron las primeras en intentar introducir el diseño asistido por ordenador (CAD) se toparon con la resistencia de los diseñadores más viejos, que proclamaban que la nueva tecnología no era tan efectiva como el análisis del diseño por un ser humano. Las entrevistas descubrieron luego que las verdaderas razones incluían el miedo a perder *status* porque los ingenieros jóvenes podían adaptarse más rápidamente al cambio.

Reglas prácticas. Los científicos del comportamiento han desarrollado algunas reglas prácticas específicas para tratar con la resistencia cultural (Mead 1951). Estas reglas se aplican extensamente en las organizaciones industriales y otras entidades (Juran 1964):

- *Proporcionar participación.* Esta es la regla más sencilla e importante para introducir el cambio. Quienes vayan a verse afectados por el cambio deberán participar en la planifi-

cación, así como en su ejecución. La falta de participación conduce al resentimiento, que puede enquistarse y convertirse en una resistencia pétrea.

- *Proporcionar tiempo suficiente.* ¿Cuánto tiempo lleva que los miembros de una cultura acepten un cambio? Necesitan el tiempo suficiente para evaluar el impacto del cambio. Incluso cuando el cambio parece beneficioso, necesitan saber qué precio deberán pagar en valores culturales.
- *Comienzo pequeño.* Realizar una prueba a pequeña escala antes de lanzarse reduce el riesgo para los promotores, así como para los miembros de la cultura.
- *Evitar sorpresas.* Un beneficio importante del modelo cultural es la posibilidad de predecirlo. Una sorpresa representa un choque para esa posibilidad de predicción y enturbia la paz.
- *Elegir el año justo.* Hay años buenos y malos, incluso décadas, para programar un cambio.
- *Mantener las propuestas libres de exceso de equipaje.* Evitar ahogar las propuestas con asuntos extraños no relacionados de cerca con la obtención de resultados. El riesgo está en que los debates se alejen del tema principal y se vayan por temas laterales.
- *Trabajar con el líder reconocido de la cultura.* La cultura la entienden mejor sus miembros. Tienen su propio liderazgo y éste a veces es informal. Convencer al líder es un paso significativo para lograr la aceptación del cambio.
- *Tratar a las personas con dignidad.* El ejemplo clásico son los montadores de relés en los experimentos de Hawthorne. Su productividad sigue subiendo, con buena o mala iluminación, porque en el laboratorio son tratados con dignidad.
- *Revertir las posiciones.* Formular la pregunta «¿Qué posición tomaría yo si fuera miembro de esa cultura?». Es incluso útil desempeñar el papel jugando a estimular la comprensión de la posición de la otra persona. [Para un planteamiento estructurado, véase Ackoff (1978)].
- *Tratar directamente con la resistencia.* Hay muchos modos de tratar directamente con la resistencia al cambio:
 - Intentar un programa de persuasión.
 - Ofrecer un *quid pro quo*: algo a cambio de algo.
 - Cambiar las propuestas para enfrentarse a las objeciones específicas.
 - Cambiar el clima social de forma que haga el cambio más aceptable.
 - Olvidarlo. Hay casos en los que la alternativa correcta es abandonar la propuesta. Los seres humanos no saben cómo planificar para tener un 100 por ciento de éxitos.

[Para más información, véase Schein (1993). Véase también Stewart (1994) para una discusión de la autoevaluación de la propia resistencia al cambio].

Resolver las diferencias. Algunas veces la resistencia al cambio llega a un callejón sin salida. Coonley y Agnew (1941) describieron un proceso estructurado para salir del callejón sin salida al que había llegado la iniciativa de establecer normas de calidad para tuberías de hierro fundido. Se impusieron tres condiciones a las partes en disputa:

1. Debían identificar las áreas en que estaban de acuerdo y las áreas en que estaban en desacuerdo. «Es decir, debían ponerse de acuerdo primero sobre el punto exacto en que la carretera empezaba a bifurcarse». Cuando se hizo esto, se descubrió que un punto principal de desacuerdo era el relativo a la validez de cierta fórmula.
2. «Debía ponerse de acuerdo sobre en qué están en desacuerdo». Concluyeron que los hechos conocidos eran inadecuados para decidir si la fórmula era válida o no.
3. «Debía decidir qué es lo que iban a hacer sobre eso». La decisión fue crear un fondo para realizar la investigación necesaria para establecer los hechos necesarios. «Con los hechos en la mano, desaparecieron las controversias».

EL CICLO DE VIDA DE UN PROYECTO: RESUMEN

La secuencia universal de mejora establece un modelo común de ciclo de vida de los proyectos. Tras la selección del proyecto, éste se define en la declaración de misión y se asigna al equipo de proyecto.

Luego se reúne el equipo, habitualmente una vez a la semana durante una hora aproximadamente. Durante cada reunión, el equipo:

- Revisa el progreso hecho desde la reunión anterior.
- Acuerda las acciones a emprender antes de la siguiente reunión (el trabajo individual).
- Asigna la responsabilidad de esas acciones.

Gradualmente, el equipo se abre camino por la secuencia universal. El viaje de diagnóstico establece las causas. El viaje de remedio proporciona los remedios y establece los controles para afianzar las ventajas.

Durante todo este tiempo, el equipo emite actas de sus reuniones, así como informes periódicos del progreso. Estos informes se distribuyen entre los miembros del equipo y también entre no miembros que tienen necesidad de saber. Dichos informes forman la base para la revisión del proceso por la alta dirección.

El informe final contiene un resumen de los resultados conseguidos, junto con un relato de las actividades que llevaron a los resultados. Con experiencia, los equipos aprenden a identificar las lecciones aprendidas que se pueden aplicar en otras partes de la empresa. [En relación con el ciclo de vida de un proyecto, véase AT&T Quality Library, *Quality Improvement Cycle* (1988, pp. 13.17)].

INSTITUCIONALIZAR EL MOVIMIENTO DE LA CALIDAD

Numerosas empresas han iniciado la mejora de la calidad, pero pocas han logrado institucionalizarla de forma que siga año tras año. Sin embargo, muchas de estas empresas tienen una larga historia de realizar anualmente desarrollos de productos, reducción de costes, mejoras de la productividad, etc. Los métodos que utilizan para conseguir esta mejora anual son bien conocidos y se pueden aplicar a la mejora de la calidad:

- Ampliar el plan anual de empresa para incluir metas de mejora de la calidad.
- Hacer que la mejora de la calidad sea una parte de la descripción de la tarea. En la mayoría de las empresas, las actividades de mejora de la calidad se han considerado un mero incidente de la tarea regular de cumplir con las metas de calidad, costes, entrega, etc. La necesidad está en hacer de la mejora de la calidad una parte de la tarea regular.
- Establecer auditorías de la alta dirección que incluyan la revisión del progreso de la mejora de la calidad.
- Revisar la calificación de méritos y el sistema de recompensas para incluir un nuevo parámetro, el rendimiento de la mejora de la calidad, y darle su propio peso.
- Crear ocasiones, bien promocionadas, para proporcionar reconocimiento de los resultados de mejora.

LOS PAPELES NO DELEGABLES DE LA ALTA DIRECCIÓN

La alta dirección debe participar considerablemente en las iniciativas de calidad. No basta con crear consciencia, establecer metas, y luego dejar todo lo demás a los subordinados. Esto se ha

intentado y ha fallado una vez tras otra. No conozco ninguna empresa que haya llegado a ser líder de la calidad sin una participación considerable de la alta dirección.

También es esencial definir exactamente qué se quiere decir con «participación». Consiste en una lista de papeles a jugar por la alta dirección, *personalmente*. A continuación damos una lista de los papeles jugados en la realidad por la alta dirección en empresas que se han convertido en líderes de la calidad. Estos papeles se pueden considerar como «no delegables».

- *Formar parte del comité de calidad.* Esto es fundamental para la participación de la alta dirección. También se convierte en un indicador de las prioridades para el resto de la organización.
- *Adquirir formación en la gestión de la calidad.* Entre las fuentes de esta formación están las visitas a empresas de éxito. También es posible la formación mediante cursos diseñados especialmente para altos directivos y mediante la asistencia a conferencias. (Los altos directivos se arriesgan a perder credibilidad si intentan dirigir sin la adecuada formación en la gestión de la calidad).
- *Aprobar la visión y políticas de calidad.* Un creciente número de empresas han estado definiendo su visión y políticas de calidad. Invariablemente, antes de poder publicarse, se requiere la aprobación de la alta dirección.
- *Aprobar las principales metas de la calidad.* Las metas de la calidad que se integran en el plan de empresa deben desplegarse hasta los niveles inferiores para identificar las acciones a ejecutar y los recursos necesarios. Los altos directivos se convierten en parte esencial del despliegue del proceso.
- *Establecer la infraestructura.* La infraestructura incluye los medios para proponer y seleccionar proyectos, preparar las declaraciones de misión, nombrar miembros y líderes de los equipos, formar equipos y facilitadores, informar del progreso, etc. Si falta dicha estructura, la mejora de la calidad se efectuará sólo en áreas locales y sin efecto apreciable en el *resultado total*.
- *Proporcionar recursos.* Durante los años 1980, muchos altos directivos proporcionaron abundantes recursos para la formación del personal, principalmente en concienciación y herramientas estadísticas. Por el contrario, sólo se proporcionaron recursos escasos para formación en gestión de la calidad y para el establecimiento de la infraestructura de mejora de la calidad.
- *Revisar el progreso.* Un fallo importante en la participación personal de la alta dirección ha sido no mantener una revisión regular del progreso en las mejoras de calidad. Durante los años 1980, este fallo ha ayudado a la falta de progreso: la calidad no podía competir con las actividades tradicionales que recibían revisiones del progreso de los altos directivos.
- *Reconocer.* El reconocimiento habitualmente supone una ceremonia que ofrece a la alta dirección oportunidades claramente visibles para mostrar su apoyo a la mejora de la calidad. La alta dirección debe aprovechar estas oportunidades; la mayoría de los altos directivos así lo hace (véase más adelante, en Reconocimiento).
- *Revisar el sistema de recompensas.* Los sistemas tradicionales de recompensas otorgan recompensas por cumplir con las metas tradicionales. Estos sistemas deben ampliarse ahora para un peso adecuado al rendimiento en mejora de la calidad. La alta dirección se ve implicada porque cualquier cambio en el sistema de recompensas requiere su aprobación (véase más adelante, en Recompensa).
- *Participar en los equipos de proyectos.* Hay razones convincentes tras este papel (véase lo dicho anteriormente en El equipo del proyecto, Altos directivos en los equipos).
- *Enfrentarse a los celos de los empleados* (véase lo dicho anteriormente en El comité de calidad, Celos sobre la eliminación de puestos de trabajo).

Así es una lista de papeles no delegables de la alta dirección. En empresas que se han convertido en líderes de la calidad, la alta dirección desempeña la mayoría, si no todos, de estos

papeles. No conozco ninguna empresa que haya logrado el liderazgo de la calidad sin que la alta dirección haya desempeñado estos papeles no delegables.

REVISIÓN DEL PROGRESO

Una revisión programada y periódica del progreso por la alta dirección es parte esencial del mantenimiento anual de la mejora de la calidad. Las actividades que no reciben esta revisión no pueden competir por la prioridad con actividades que sí reciben esta revisión. Los subordinados, comprensiblemente, dan prioridad a asuntos que son revisados regularmente por sus superiores.

Revisión de los resultados. Los resultados tienen múltiples formas y éstas se reflejan en el diseño del proceso de revisión. Ciertos proyectos son de tal importancia *individualmente* que la alta dirección quiere seguirlos estrechamente. Los restantes proyectos son revisados por niveles inferiores. No obstante, se resumen para ser revisados *colectivamente* por la alta dirección.

También se necesita una revisión regular del *proceso* de mejora de la calidad. Se realiza mediante auditorías que pueden extenderse a todos los aspectos de gestión de la calidad (véase el Capítulo 11, «La familia de normas internacionales ISO 9000»).

Datos para la revisión del progreso. Gran parte de la base de datos sobre la revisión del progreso procede de los informes emitidos por los equipos del proyecto. Sin embargo, es preciso un trabajo adicional para analizar estos informes y preparar los resúmenes que necesita la alta dirección. Habitualmente, este trabajo adicional lo realiza el secretario del comité de calidad con la ayuda de los facilitadores, los líderes de los equipos y otras fuentes, como finanzas.

Conforme las empresas ganan experiencia, diseñan formatos de informes normalizados para facilitar el resumen de los informes a los grupos de proyectos, las líneas de productos, las unidades de negocio, las divisiones y la corporación. Uno de estos formatos, utilizado por una gran empresa europea, determina para cada proyecto:

- La cantidad estimada originalmente de desperdicio crónico.
- La reducción estimada originalmente de los costes si el proyecto llegara a tener éxito.
- La reducción conseguida en la realidad.
- La inversión de capital.
- La reducción neta de los costes.

Los resúmenes se revisan a varios niveles. El resumen corporativo se revisa trimestralmente en la reunión del *staff* del presidente (comunicación personal al autor).

Evaluación del rendimiento. Uno de los objetivos de la revisión del progreso es la evaluación del rendimiento. Esta evaluación se extiende tanto a las personas como a los proyectos. La evaluación del rendimiento individual en los proyectos de mejora se tropieza con la complicación de que los resultados los consiguen los equipos. El problema está entonces en evaluar la contribución individual a las iniciativas del equipo. Este nuevo problema no tiene por ahora una solución científica. Así, se deja a cada supervisor que juzgue la contribución de los subordinados basándose en datos procedentes de todas las fuentes disponibles.

A altos niveles de la organización, las evaluaciones se extienden hasta juzgar el rendimiento de supervisores y directores. Dichas evaluaciones deben necesariamente considerar los resulta-

dos conseguidos en múltiples proyectos. Esto ha llevado al desarrollo de medidas para evaluar el rendimiento de los directores en el conjunto de los proyectos. Estas medidas incluyen:

- Cifras de proyectos de mejora: iniciados, en marcha, completados y abortados.
- Valor de los proyectos completados en términos de mejora en el rendimiento del producto, reducción de costes y retorno sobre la inversión.
- Porcentaje de subordinados activos en equipos de proyectos.
- Los superiores juzgan luego a sus subordinados según estos y otros datos.

RECONOCIMIENTO

Según se emplea aquí, «reconocimiento» significa «admisión pública de un rendimiento superior». (El rendimiento superior merece su admisión pública). El reconocimiento dice a los receptores que sus esfuerzos son apreciados. Les acrecienta la autoestima y el respeto recibido de otros.

Muchas empresas son muy efectivas otorgando reconocimiento. Buscan ideas de quienes tienen habilidades especiales en comunicación (Recursos Humanos, Marketing, Publicidad), así como de los directores de línea. Las numerosas formas de reconocimiento reflejan estas ideas:

- Certificados, placas o cosas similares premian a los equipos de proyecto, a los facilitadores o a quienes completan cursos de formación.
- Los equipos de proyecto presentan su informe final en el despacho del director general local.
- Se publican los resúmenes de proyectos en los medios de comunicación de la empresa, junto con imágenes del equipo. Algunas empresas crean suplementos de noticias o boletines especiales dedicados a la mejora de la calidad.
- La publicación de crónicas de los proyectos de éxito no sólo proporciona reconocimiento, sino que también sirve como material para casos con fines didácticos y como estimulador para todos.
- Se organizan comidas en honor de los equipos de proyecto.
- Se pueden otorgar medallas o premios a equipos que se juzga que han completado los mejores proyectos durante algún período de tiempo determinado. La medida del éxito siempre incluye el alcance de los resultados logrados y, a veces, los métodos utilizados para alcanzarlos [véase un relato de la competición anual patrocinada por Motorola en Feder (1993); véase también Motorola's Team Competition (1992)].

RECOMPENSAS

Según se emplea aquí, «recompensas» se refiere a salarios, aumentos de salario, bonos, promociones, etc., resultado de la revisión anual del rendimiento de los empleados. Esta revisión en el pasado se centraba en cumplir con las metas de los parámetros tradicionales: costes, productividad, programación y calidad. Actualmente se debe añadir un nuevo parámetro, la mejora de la calidad, para reconocer que la mejora de la calidad se ha convertido en parte de la descripción de la tarea.

Adviértase que las recompensas difieren claramente del reconocimiento. La diferencia crucial estriba en si el trabajo es obligatorio o voluntario:

- El reconocimiento se otorga por un rendimiento superior, que es *voluntario*. (Las personas pueden mantener sus puestos de trabajo, con un rendimiento adecuado).

- Las recompensas se otorgan por un rendimiento *tal como está ordenado*: hacer el trabajo definido en la descripción de la tarea. El fallo deliberado en hacer este trabajo es una transgresión del contrato de trabajo y es una forma de insubordinación.

El nuevo parámetro, la mejora de la calidad, consume mucho tiempo. Añade una función nueva. Invade el modelo cultural. Pero es crítico para que la empresa pueda seguir siendo competitiva. Por esto, el parámetro de la mejora de la calidad debe entrar en la descripción de la tarea y en el sistema de recompensas. Si no es así, los empleados continuarán siendo juzgados por su rendimiento en las metas tradicionales, y la mejora de la calidad sufrirá debido a la falta de prioridad.

Una empresa muy conocida ha añadido el parámetro «rendimiento en mejora de la calidad» a su sistema de revisión anual. Todo el personal de la jerarquía directiva es clasificado en una de estas tres clases: más que satisfactorio, satisfactorio o menos que satisfactorio. A quienes caen en la clase inferior no se les considera para ascensos durante los 12 meses siguientes (Comunicación personal al autor).

(Véase información adicional en el Capítulo 15, «Recursos humanos y calidad»).

FORMACIÓN

A todo lo largo de este capítulo se han hecho numerosas observaciones sobre la necesidad de la formación. Esta necesidad es extensiva porque la mejora de la calidad es una función nueva en la empresa que asigna nuevas responsabilidades a todos. Desempeñar estas nuevas responsabilidades requiere una formación extensiva. Ya se han tratado detalles de esta formación en distintos lugares de este capítulo (véase información adicional en el Capítulo 16, «Formación para la calidad»).

RESUMEN DE LAS RESPONSABILIDADES DE LA MEJORA DE LA CALIDAD

La mejora de la calidad requiere actuar a todas las niveles de la organización, como se resume en la Figura 5.21 (véase más información sobre la planificación y coordinación de estas actividades en múltiples niveles, en el Capítulo 13, «Despliegue estratégico», y en el Capítulo 14, «Gestión de la calidad total»).

Alta dirección	Equipos de mejora de la calidad	Departamentos de operaciones
Organiza los comités de calidad.	Recibe y revisa las declaraciones de misión.	Implanta los remedios.
Consigue y filtra las propuestas de proyecto.	Dirige el viaje de diagnóstico.	Implanta los controles.
Selecciona los proyectos.	Dirige el viaje de remedio.	
Prepara las declaraciones de misión.	Se ocupa de la resistencia cultural.	
Asigna los equipos; establece la formación.	Establece los controles para afianzar las ventajas.	
Revisa el progreso.	Informa de los resultados.	

FIGURA 5.21 Responsabilidad de la mejora de la calidad.

AGRADECIMIENTOS

Este capítulo del manual se ha nutrido ampliamente de varios materiales de formación publicados por el Juran Institute, Inc., y de la obra de Juran, J. M. ed. (1955), *A History of Managing for Quality*, patrocinado por la Juran Foundation, Inc. Quality Press, Milwaukee. También agradezco a la Juran Foundation, Inc., y al Juran Institute, Inc., su autorización para hacer extractos de esas obras.

REFERENCIAS

- Ackoff, Russell L. (1978). *The Art of Problem Solving*. John Wiley & Sons, New York, pp. 45-47.
- AT&T Quality Library. For Information, call AT&T Customer Information Center, 1-800-432-6600.
- Anderson, Dave (1982). «When 3 Meant 6». *New York Times*, December 27, pp. C1, C3.
- Berwick, Donald M., Godfrey, A. Blanton, and Roessner, Jane (1990). *Curing Health Care*. Jossey-Bass, San Francisco.
- Betker, Harry A. (1983). «Quality Improvement Program: Reducing Solder Defects on Printed Circuit Board Assembly». *The Juran Report*, No. 2, November, pp. 53-58.
- Betker, Harry A. (1985). «Storyboarding: It's No Mickey Mouse Technique». *The Juran Report*, No. 5, Summer, pp. 25-30.
- Bigelow, James S., and Floyd, Raymond C. (1990). «Quality Improvement through Root Cause Analysis». *IMPRO 1990 Conference Proceedings*, Juran Institute, Inc., Wilton, CT.
- Black, Dennis A., and Stump, Jerry R. (1987). «Developing AQ1 Team 'Attitudes for Progress'». *IMPRO 1987 Conference Proceedings*, Juran Institute, Inc., Wilton, CT.
- Boley, Daniel C., and Petska, Joseph P. (1990). «The Genesis of a Partnership: A Tale of Two Plants». *IMPRO 1990 Conference Proceedings*, Juran Institute, Inc., Wilton, CT.
- Chase, Richard B., and Stewart, Douglas M. (1994). «Make Your Service Fail-Safe». *Sloan Management Review*, Spring, pp. 35-44.
- Cohen, Leonard A. (1987). «Diet and Cancer». *Scientific American*, November, pp. 42-48.
- Coonley, Howard, and Agnew, P. G. (1941). *The Role of Standards in the System of Free Enterprise*. American National Standards Institute, New York.
- Daughton, William J. (1987). «Achieving Customer Satisfaction with a Major Automobile Manufacturer». *IMPRO 1987 Conference Proceedings*, Juran Institute, Inc., Wilton, CT.
- DeWolff, Thomas P., Anderson, Ralph J., and Stout, Gordon L. (1987). «Quality Improvement Process and Cultural Change». *IMPRO 1987 Conference Proceedings*, Juran Institute, Inc., Wilton, CT.
- Egan, John (1985). «The Jaguar Obsession». *Quality (EOQC)*, January, pp. 3-4.
- Engle, David, and Ball, David (1985). «Improving Customer Service for Special Orders». *IMPRO 1985 Conference Proceedings*, Juran Institute, Inc., Wilton, CT.
- Feder, Barnaby J. (1993). «At Motorola, Quality Is a Team Sport». *New York Times*, January 21.
- Florida Power and Light Company (1984). *American Productivity Center*, Case Study 39, September.
- Greenridge, R. M. C. (1953). «The Case of Reliability vs. Defective Components et al.». *Electronic Applications Reliability Review*, No. 1, p. 12.
- Gross, Neil (1989). «A Wave of Ideas, Drop by Drop». *Business Week*, Innovation, pp. 22, 28, and 30.
- Gulliver, Frank R. (1987). «Post-Project Appraisals Pay». *Harvard Business Review*, March-April, pp. 128-132.
- Hartman, Bob (1983). «Implementing Quality Improvement». *The Juran Report*, No. 2, November, pp. 124-131.
- IMPRO Proceedings*, Annual Conference on Quality Management, Juran Institute, Inc., Wilton, CT.
- Juran, J. M. (1964). *Managerial Breakthrough*. McGraw-Hill, New York. Revised edition, 1995.
- Juran, J. M. (1975). «The Non-Pareto Principle; Mea Culpa». *Quality Progress*, May, pp. 8-9.
- Juran, J. M. (1978). «Japanese and Western Quality—A Contrast». From a paper originally presented at the International Conference on Quality Control, Tokyo, Oct. 17-20.
- Juran, J. M. (1981). *Juran on Quality Improvement*, a series of 16 videocassettes on the subject. Juran Institute Inc., Wilton, CT.

- Juran, J. M. (1985). «A Prescription for the West—Four Years Later». European Organization for Quality, 29th Annual Conference. Reprinted in *The Juran Report*, No. 5, Summer 1985.
- Juran, J. M. (1992). *Juran on Quality by Design*. Free Press, New York, pp. 407-425.
- Juran, J. M. (1993). «Made in USA, a Renaissance in Quality». *Harvard Business Review*, July-August, pp. 42-50.
- Juran, J. M., ed. (1995). *A History of Managing for Quality*. Sponsored by Juran Foundation, Inc., Quality Press, ASQC, Milwaukee.
- Juran Report*, *The*. Issued periodically by Juran Institute, Inc., Wilton, CT.
- Kearns, David T., and Nadler, David A. (1995). *How Xerox Reinvented Itself and Beat Back the Japanese*. Harper Business, New York.
- Kelly, Bob, Howard, Tom, and Gambel, Anthony (1990). «Quality Forces Alcoa/Phirer Partnership». *IMPRO 1990 Conference Proceedings*, Juran Institute, Inc., Wilton, CT.
- Kegarise, Ronald J., and Miller, George D. (1985). «An Alcoa-Kodak Joint Team». *IMPRO 1985 Conference Proceedings*, Juran Institute, Inc., Wilton, CT.
- Kinosz, Donald L., and Ice, James W. (1991). «Facilitation of Problem Solving Teams». *IMPRO 1991 Conference Proceedings*, Juran Institute, Inc., Wilton, CT.
- Krantz, K. Theodor (1989). «How Velcro Got Hooked on Quality». *Harvard Business Review*, September-October, pp. 34-40.
- Mead, Margaret, ed. (1951). *Cultural Patterns and Technical Change*. UNESCO, Paris; also published by Mentor Books, New American Library of World Literature, New York, 1955.
- Metcalfe, Henry C., and Urwick, L., eds. (1941). *Dynamic Administration*. Harper and Row, New York.
- Mizel, Michael, and Strattnr, Lawrence (1981). «Diagnostic Measuring in Manufacturing». *Quality*, September, pp. 29-32.
- Motorola's Team Competition (1992). *Productivity Views*, January/February, pp. 3-4.
- NIST, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899. (It manages the U.S. Malcolm Baldrige National Quality Award).
- Parvey, Dale E. (1990). «The Juran Improvement Methodology Applied to Information Security Systems». *IMPRO 1990 Conference Proceedings*, Juran Institute, Inc., Wilton, CT.
- Pelletier, Don (1990). «Quality Improvement and the Executive Employee». *IMPRO 1990 Conference Proceedings*, Juran Institute, Inc., Wilton, CT.
- Rassi, Alan J. (1991). «A Three-Phase Approach to Exceptional Customer Service». *IMPRO 1991 Conference Proceedings*, Juran Institute, Inc., Wilton, CT.
- Sakai, Shinji (1994). «Rediscovering Quality—The Toyota Way». *IMPRO 1994 Conference Proceedings*, Juran Institute, Inc., Wilton, CT.
- Schein, Edgar H. (1993). «How Can Organizations Learn Faster? The Challenge of Entering the Green Room». *Sloan Management Review*, Winter, pp. 85-92.
- Seder, L. A., and Cowan, D. (1956). «The Span Plan of Process Capability Analysis. American Society for Quality Control», *General Publication* 3, September. (It was originally called «S.P.A.N. capability method», in which the letters stood for «systematic procedure for attaining necessary capability»).
- Seder, L. A. (1950). «Diagnosis with Diagrams». *Industrial Quality Control*, Vol. 6, Nos. 4 and 5, January and March.
- Smidt, Harm, and Doesema, Tjeerd (1991). «Lead Time Reduction of Project Related Purchased Components». *IMPRO 1991 Conference Proceedings*, Juran Institute, Inc., Wilton, CT.
- Sterett, Kent W. (1987). «Quality at Florida Power and Light. (The Role of Facilitators and Performance Reviews)». *IMPRO 1987 Conference Proceedings*, Juran Institute, Inc., Wilton, CT.
- Stewart, Thomas A. (1994). «Rate Your Readiness to Change». *Fortune*, February 7, pp. 106-110.
- Stratton, Donald A. (1987). «Force Field Analysis: A Powerful Tool for Facilitators». *The Juran Report*, No. 8, pp. 105-111.
- Traver, Robert W. (1983). «Locating the Key Variables». *ASQC Quality Congress Transactions*, Milwaukee, pp. 231-237.
- Whipple, A. B. C. (1984). «Stranded Navy Man Who Charted the World's Seas». *Smithsonian*, March, pp. 171-186.

Algunas historias de la movilización por la mejora de la calidad

- Hodgson, Alan (1991). «Starting the Amersham Quality Revolution» (at Amersham International). *IMPRO 1991 Conference Proceedings*, Juran Institute, Inc., Wilton, CT.
- Lewicki, Thomas A., and Romo, Robert A. (1987). «Quality Through Collaboration» (at General Motors Central Foundry). *IMPRO 1987 Conference Proceedings*, Juran Institute, Inc., Wilton, CT.
- McBride, P. S. (1993). «Short's Total Quality Management Programme: Quality Management in Practice» (at Short Brothers, Belfast, Northern Ireland). *Quality Forum*, June 1993.
- Payne, Bernard J. (1987). «Overall QI/JQI: From 1% AQL to 10 ppm» (at Mullard Blackburn). *IMPRO 1987 Conference Proceedings*, Juran Institute, Inc., Wilton, CT.
- Scanlon, Robert J. (1991). «Installing a Quality Process in Record Time» (at Southern Pacific Transportation Company). *IMPRO 1991 Conference Proceedings*, Juran Institute, Inc., Wilton, CT.
- Tenner, Arthur R., and De Toro, Irving J. (1992). *Total Quality Management: Three Steps to Continuous Improvement* (at Banc One, based on the work of Charles A. Aubrey II). Addison-Wesley Publishing Company, Reading, MA.
- Young, John (1990). «Enabling Quality Improvement in British Telecom». *IMPRO 1991 Conference Proceedings*, Juran Institute, Inc., Wilton, CT.

Capítulo 6

GESTIÓN DE LOS PROCESOS

James F. Riley, Jr.

INTRODUCCIÓN	6.1	La fase de transferencia: transferir el plan del nuevo proceso a las operaciones	6.19
¿Por qué la gestión de la calidad de los procesos?	6.1	Fase de gestión de la operación: gestionar el nuevo proceso ..	6.21
Los orígenes de PQM	6.3		
Gestión de la calidad de los procesos, definición	6.4	LA INTEGRACIÓN DE PQM CON TQM	6.22
UN EJEMPLO DE APLICACIÓN: EL PROCESO DE GESTIÓN DEL CONTRATO	6.4	RESUMEN Y FACTORES CRÍTICOS PARA EL ÉXITO DE LA IMPLANTACIÓN DE PQM	6.23
LA METODOLOGÍA DE PQM	6.7	Puntos clave	6.23
Visión global	6.7	Factores críticos para el éxito de la implantación de PQM ...	6.23
Inicio de la actividad de PQM ...	6.7		
La fase de planificación: planificar el nuevo proceso	6.10	REFERENCIAS	6.24

INTRODUCCIÓN

¿Por qué la gestión de la calidad de los procesos? El entorno dinámico en el que se mueve actualmente la empresa se caracteriza por lo que se ha llamado las «seis ces»: cambio, complejidad, clientes (peticiones de los) competencia (presión de la), costes (impacto de los), y condicionantes. Todas tienen un gran impacto sobre la capacidad de la organización para cumplir con sus metas y objetivos declarados. Tradicionalmente, las organizaciones habían respondido a estos factores con nuevos productos y servicios. Rara vez habían introducido cambios en los procesos de apoyo a los nuevos productos y servicios.

La experiencia demuestra que el éxito en el logro de las metas y los objetivos depende en gran manera de procesos de empresa transversales, largos y complejos, como la planificación

del producto, el desarrollo del producto, la facturación, el cuidado paciente, las compras, el abastecimiento de materiales, la distribución de los elementos y cosas semejantes. A causa de una falta prolongada de atención por parte de la directiva, muchos de estos procesos se hacen obsoletos, se complican demasiado, se convierten en redundantes y excesivamente caros, están mal definidos y no se adaptan a las demandas de un entorno en constante cambio. En los procesos que han sufrido este descuido (y esto incluye un gran número de procesos por razones que explicaremos más adelante), la calidad de sus resultados queda muy lejos de la calidad requerida para ser competitivo.

Un proceso de empresa es la organización lógica de personas, materiales, energía, equipamiento e información en actividades de trabajo diseñadas para producir un resultado final requerido (producto o servicio) (Pall 1986).

Existen tres dimensiones principales para medir la calidad del proceso: efectividad, eficacia y adaptabilidad. El proceso es *efectivo* si su salida satisface las necesidades de los clientes. Es *eficaz* cuando es efectivo al menor coste. El proceso es *adaptable* cuando se mantiene efectivo y eficaz frente a los muchos cambios que ocurren en el transcurso del tiempo. Es vital una orientación a los procesos si la dirección ha de satisfacer las necesidades de los clientes y conseguir que la organización permanezca saludable.

A la vista de esto, parece obvia la necesidad de mantener una calidad alta en los procesos. Entender por qué una buena calidad de los procesos es la excepción y no la regla, exige mirar de cerca cómo se diseñan los procesos y lo que les ocurre en el transcurso del tiempo.

Primero, el diseño. El modelo de organización empresarial occidental ha evolucionado, por motivos históricos, hacia una jerarquía de departamentos especializados por funciones. La dirección de la gestión, las metas y las medidas se han desplegado de arriba abajo a través de esta jerarquía vertical. No obstante, los procesos que fructifican en los productos del trabajo, en particular esos productos que compran los clientes (y que justifican la existencia de la organización), fluyen horizontalmente cruzando la organización a través de los departamentos funcionales (Fig. 6.1). Tradicionalmente, cada elemento funcional de un proceso es incumbencia de un departamento, cuyo directivo es responsable del funcionamiento de ese elemento. Sin embargo, nadie es responsable del proceso entero. Surgen muchos problemas del conflicto entre las demandas de los departamentos y las demandas de los principales procesos globales.

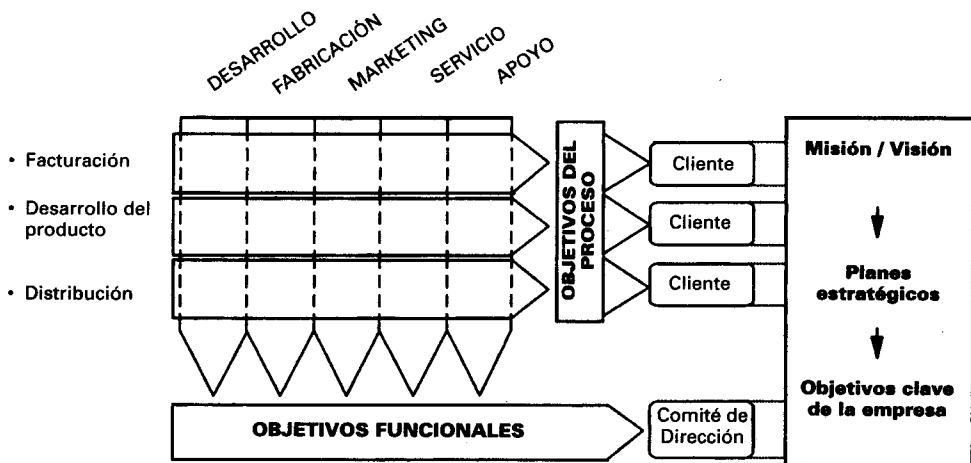


FIGURA 6.1 Flujo del trabajo en una organización funcional (Fuente: Juran Institute, Wilton, CT).

En la lucha por las metas funcionales, los recursos funcionales y las carreras funcionales, se descuida la atención a los procesos funcionales. Como resultado, los procesos tal como se operan no son ni efectivos ni eficaces, por lo que no son adaptables.

Una segunda fuente del mal funcionamiento de los procesos está en el natural deterioro a que se ven sometidos todos los procesos en el curso de su evolución. Por ejemplo, en una compañía ferroviaria su directorio telefónico reveló que había más empleados con el título de «empleado de reparación» que con el título de «empleado». Cada uno de los administrativos de los empleados de reparación había sido colocado para prevenir que se repitieran algunos problemas graves que ocurrían. En el transcurso del tiempo, el desequilibrio entre los títulos era la prueba evidente de procesos que habían establecido la reparación como norma de la organización.

La rapidez de la evolución tecnológica, en combinación con el alza de las expectativas de los clientes, ha creado presiones competitivas globales sobre los costes y la calidad. Estas presiones han estimulado la exploración de los procesos transversales, para identificarlos, comprenderlos y mejorar su funcionamiento. Ahora hay muchas pruebas de que dentro del ciclo total del producto un problema importante de mal funcionamiento del proceso se debe a la tecnología de gestión del proceso. Los objetivos funcionales entran frecuentemente en conflicto con las necesidades de los clientes, que deben estar servidos por procesos transversales. Además, los procesos generan una variedad de derroches (plazos finales no cumplidos, desechos de fábrica, etc.). No es difícil identificar productos, como la generación de facturas, la preparación de una política de seguridad o el pago de una reclamación, que llevan más de 20 días para efectuar menos de 20 minutos del tiempo real de trabajo. Tampoco se modifican con facilidad en respuesta al entorno en continuo cambio. Para servir mejor las necesidades de los clientes existe una necesidad de restaurar estos procesos para darles efectividad, eficacia y adaptabilidad.

Los orígenes de PQM. Entre las primeras empresas estadounidenses que percibieron los beneficios de la identificación y gestión de los procesos de la empresa está IBM Corporation. El espíritu inicial de IBM en la gestión de los procesos de la empresa en los primeros años de la década de los ochenta lo expresó un ejecutivo con las palabras «El enfoque en la mejora debe estar en el proceso de las tareas» (Kane 1986). La gestión de procesos se ha practicado desde hace tiempo en la fabricación. En la fabricación de productos, el directivo de planta «posee» una gran parte del proceso de fabricación: Este directivo tiene toda la responsabilidad de realizar esta parte del proceso de fabricación y es responsable de sus resultados. Como propietario, se espera del directivo que controle, mejore y optimice el proceso de fabricación para satisfacer las necesidades del cliente y las necesidades de la empresa (coste, duración del ciclo, eliminación de desperdicio, creación de valor, etc.). Para lograr estos objetivos, los directivos del proceso de fabricación han elaborado algunos conceptos y herramientas indispensables, que incluyen la definición de los requisitos del proceso, la documentación paso a paso del proceso, el establecimiento de medidas del proceso, la eliminación de defectos del proceso y el aseguramiento de la optimización del proceso. De hecho, gran parte de la ciencia de la ingeniería industrial se relaciona con estas tareas. Reconociendo el valor de estas herramientas en la fabricación y su aplicación a los procesos de la empresa, el comité superior de dirección de IBM ordenó que esta metodología de gestión de los procesos se aplicase a todos los procesos importantes de la empresa (como desarrollo del producto, planificación de la empresa, distribución, facturación, planificación del mercado, etc.) y no sólo al proceso de fabricación.

Aproximadamente en la misma época, cierto número de empresas norteamericanas, entre las que estaban AT&T, Ford Motor Company, Motorola, Corning y Hewlett-Packard, empezaron también a aplicar el concepto de gestión de procesos a sus procesos de empresa. En todas estas compañías se puso el énfasis en los procesos multifuncionales y transversales. La aplicación de la metodología de gestión de procesos dio como resultado la ruptura de las barreras

funcionales dentro de los procesos. En cada caso se estableció una nueva estructura permanente de gestión para los procesos objetivo.

A mediados de 1985, muchas organizaciones y sectores estaban gestionando procesos importantes de la empresa elegidos con la misma atención dedicada normalmente a las funciones, departamentos y otras unidades de la organización. Los primeros empeños llevaban nombres como Gestión de procesos de empresa, Mejora continua de los procesos y Mejora de la calidad de los procesos de empresa.

También puede mencionarse a la Reingeniería de procesos de empresa (RPE) como parte de esta familia de metodologías. Como las metodologías mencionadas previamente en esta sección, la RPE ocasiona una alteración en la orientación de la gestión desde la función al proceso. Según los consultores que describieron primero la RPE y le dieron su nombre, la RPE se distingue de las otras metodologías en que pone el énfasis en el cambio radical de los procesos más que en un cambio gradual. Además, la RPE busca a menudo cambiar más de un proceso a la vez. A causa del clima económico de los primeros años noventa y de los extraordinarios beneficios que algunos escritores atribuyen a la RPE, su popularidad creció rápidamente durante algún tiempo.

Sin embargo, se ha visto (incluido el testimonio de Michel Hammer, uno de los escritores sobre RPE más leídos) que en muchas de sus primeras aplicaciones el señuelo de una mejora rápida provocó que algunos directivos (y sus consultores), ignorando las limitaciones humanas, impusieran demasiados cambios en un período breve de tiempo, con efectos devastadores sobre los resultados de la organización a largo plazo. Además, en muchas de las primeras aplicaciones, los usuarios se fascinaron tanto con la promesa de un cambio radical que lo cambiaron todo, ignorando los elementos del diseño del proceso existente que funcionaban perfectamente y que habrían dado mejores resultados como parte del nuevo diseño. Dicha continuidad habría ahorrado tiempo, habría reducido las exigencias a los diseñadores y habría producido mejores resultados.

Mucho se ha publicado sobre la gestión de los procesos. AT&T (1988), Black (1985), Gibson (1991-1992), Hammer y Champy (1993), Kane (1986 y 1992), Pall (1987), Riley (1989), Rummler (1992), Schlesiona (1988) y Zachman (1990), todos han propuesto enfoques metodológicos similares que sólo difieren en detalles menores. Los detalles específicos de la metodología presentados en esta sección fueron elaborados en Juran Institute, Inc. [Gibson et al. (1990); Riley et al. (1994)], basándose en años de experiencia colectiva en diferentes sectores.

Gestión de la calidad de los procesos, definición. La metodología descrita en esta sección ha sido introducida con creciente éxito por cierto número de empresas importantes, incluidas las mencionadas anteriormente. Aunque puede variar de empresa a empresa en nombre y detalles, la metodología posee un núcleo de rasgos comunes que la distingue de otros enfoques de la gestión de calidad. Este núcleo de rasgos comunes incluye: una orientación consciente hacia los clientes y sus necesidades; un enfoque específico en la gestión de unos pocos procesos transversales clave, que afectan especialmente a la satisfacción de las necesidades de los clientes; un patrón claro de propiedad (responsabilidad de cada proceso clave); un equipo multifuncional responsable de realizar el proceso; aplicación a nivel del proceso de los procesos de gestión de la calidad (control de calidad, mejora de la calidad y planificación de la calidad). En esta sección se designará la metodología como gestión de la calidad de los procesos o PQM.

UN EJEMPLO DE APLICACIÓN: EL PROCESO DE GESTIÓN DEL CONTRATO

Antes de tratar los detalles del PQM, un ejemplo ilustrará cómo un proceso, al operar en una jerarquía funcional tradicional, puede responder mal ante un cambio aparentemente menor en

un entorno operativo y cómo los efectos de ese cambio pueden estimular mejoras espectaculares, posibles por la aplicación del enfoque de gestión de los procesos. También ilustra sobre cómo se reconoce más fácilmente el potencial de mejora espectacular ofrecido por una nueva tecnología (tecnología de la información en este caso) cuando es responsabilidad de alguien el hacer dichas mejoras.

En los comienzos de la década de los ochenta, un importante fabricante multinacional de sistemas de procesamiento de la información decidió cambiar su política tradicional de precios de alquiler o *leasing* del producto para incluir la venta directa. Este cambio estratégico condujo a una revisión completa de las políticas de contratos de la empresa, incluyendo términos y condiciones. En lugar de una lista de precios fijos, ahora eran posibles descuentos oficiales; para pedidos especialmente grandes, la empresa ofrecía descuentos no oficiales con cierto número de opciones de financiación. A partir de esta nueva política se desarrolló un nuevo proceso de gestión del contrato, una modificación gradual del proceso existente. El nuevo proceso tuvo que adaptar contratos especiales con una variedad de términos y condiciones no normalizados.

Al cabo de dos años, más del 10 por ciento de los beneficios de la empresa se habían generado con los «contratos especiales». Sin embargo, a medida que el porcentaje de estos beneficios aumentaba, la relación entre ventas cerradas y propuestas disminuía vertiginosamente a menos de 1 de cada 5 (un rendimiento del proceso del 20 por ciento). Tanto clientes como representantes del operativo se quejaban de la larga duración hasta su conclusión (el lapso de tiempo transcurrido desde la recepción de una solicitud de propuesta hasta al entrega de la propuesta al cliente), que era de unas 14 semanas de media. El proceso sencillamente no respondía a las necesidades de los clientes de la empresa.

Frente a oportunidades de negocio perdidas y a una batería de quejas de los representantes del operativo, el consejo ejecutivo de calidad marcó este proceso como objetivo para la aplicación de la gestión de la calidad de los procesos. Se designó propietario del proceso al director de la gestión de contratos, que formó un equipo de gestión del proceso que comprendía representantes del operativo, de la administración operativa, de los sistemas de la empresa, del desarrollo de productos, de finanzas, de las prácticas de marketing y de los servicios legales.

Originalmente, el proceso de gestión de contratos consistía en una serie de pasos (Figura 6.2). El proceso empezaba en el representante del operativo, quien recibía del cliente una solicitud de propuesta de contrato especial. Se preparaba entonces un borrador de la propuesta de contrato en la oficina local con ayuda de los servicios administrativos de la sucursal y lo revisaba el director de la sucursal. A continuación se sometía a revisión de la dirección regional (habitualmente en otro lugar geográfico) y finalmente a una evaluación total en la sede central a cargo de marketing de grandes cuentas, prácticas de marketing, finanzas y sistemas de la empresa. Si la propuesta estaba en orden, se preparaba un contrato. El departamento de gestión de contratos elaboraba hasta 28 aprobaciones secuenciales del contrato a nivel ejecutivo, implicando a distintas funciones, como desarrollo del producto, finanzas, servicios legales, etc.

Habiendo superado con éxito todos estos obstáculos, el contrato era entonces aprobado y devuelto a la división de marketing de la sede central, para un mayor refinamiento y procesado. Finalmente, unos tres o cuatro meses más tarde, el contrato propuesto era devuelto a la oficina de la sucursal para presentarlo al cliente. En muchos casos llegaba demasiado tarde. El cliente se había ido a un competidor.

El equipo de gestión del proceso elaboró un gráfico del flujo del proceso y validó cierto número de hipótesis. Entre éstas estaban: el procesado manual era lento; había demoras en el servicio postal; el proceso seriado de aprobación, consistente en hasta 28 firmas ejecutivas de alto nivel, era demasiado largo; las pautas generadas por memorándum para el formato y el contenido de la propuesta de contrato eran vagas, contrapuestas y de difícil acceso, y existía una resistencia significativa a cambiar a la nueva estrategia de sólo compra, especialmente a cargo de finanzas, prácticas de la empresa y funciones legales.

Oficina local	Oficina regional	Marketing de grandes cuentas de la sede central	Gestión de contratos especiales de la sede central	Directivos varios de alto nivel
Prepara la propuesta de contrato especial →	Revisa, aprueba, transmite →	Registra, revisa y prepara para aprobación →	Revisa, pone precio, términos y condiciones; fija el calendario de aprobaciones →	28 aprobaciones secuenciales ↓
Presentación del plan			← Consolida los cambios y las aprobaciones; finaliza el contrato especial	←

FIGURA 6.2 Proceso de gestión de los contratos especiales (antes de la aplicación de los principios de gestión de procesos) (Fuente: Juran Institute, Wilton, CT).

Después de varios meses de rediseño y ensayo del proceso, el equipo lanzó el nuevo proceso de gestión de los contratos especiales, que se muestra en la Figura 6.3. El nuevo proceso se ocupaba de todas las causas de las demoras que el equipo había descubierto. Hacía especialmente buen uso del apoyo de la nueva tecnología de la información, de la que no se disponía en los años anteriores cuando empezó la operación de gestión de los contratos especiales.

Al diseñar el nuevo proceso, el equipo incorporó cierto número de importantes características nuevas:

- El equipo escribió pautas nuevas para la preparación de propuestas de contrato y las instaló on-line, usando un sistema nacional de correo electrónico. Estableció un sistema para mantener las pautas actualizadas continuamente. Esta medida aceleró tanto la preparación como la transmisión de las propuestas de contrato.
- Dispuso que la autoridad para la aprobación de los contratos sencillos —los de un volumen bajo de dólares o los que no tenían requisitos especiales de ingeniería— se delegara en el directivo regional de marketing.
- Estableció dos comités de revisión para revisión y aprobación concurrentes de los contratos especiales. Los procesos concurrentes sustituyeron a los procesos secuenciales.
- Descubrió que el trabajo de equipo requerido por el acuerdo multifuncional tenía el efecto añadido de reducir la rivalidad entre funciones y la resistencia a la nueva política de marketing.
- Estableció requisitos de duración del ciclo en cada actividad del proceso, luego midió y siguió el resultado real frente a las normas. Siempre que se producían demoras superiores a los objetivos de duración especificados, iniciaba acciones correctoras. Por ejemplo, cada comité de revisión tenía cinco días laborables para revisar las propuestas, aprobarlas y transmitir las. Con el margen establecido, para el comité era un asunto relativamente sencillo controlar sus propios resultados frente a la norma.

Oficina local	Oficina regional	Marketing de grandes cuentas de la sede central	Gestión de contratos especiales de la sede central	Directivos varios de alto nivel	Comité de revisión #1	Comité de revisión # 2
Prepara la propuesta de contrato especial →	Revisa, aprueba →		Selecciona, registra y supervisa las acciones del comité de revisión →	[Aprobaciones secuenciales eliminadas] →	Evalúa y aprueba →	Evalúa y aprueba ↓
Presentación del plan			← Finaliza el contrato especial			←

FIGURA 6.3 Proceso de gestión de contratos especiales (después de la aplicación de los principios de gestión de procesos) (Fuente: Juran Institute, Wilton, CT).

Este nuevo enfoque de la gestión dio como resultado una mejora del 83 por ciento en la duración promedio del ciclo (de 14 semanas a 17 días) y en un aumento del rendimiento del proceso del 180 por ciento (del 20 al 56 por ciento). Aun así, el equipo no estaba satisfecho. Implantaron dos rediseños más en los tres años siguientes. Después de cinco años de enfoque en el PQM, el proceso de gestión de contratos especiales funcionaba con un rendimiento del 60 por ciento. Para los contratos sencillos, que suponen un 92 por ciento del volumen del proceso, la duración del ciclo es de 24 horas.

Antes de su rediseño, este proceso consumía el equivalente a 117 personas a tiempo completo; a partir de 1995, después de varios rediseños, requería menos de 60. Los ingresos por los contratos especiales exceden ahora el 30 por ciento de los ingresos totales de EE.UU.: los más altos de todos los tiempos. Clientes y dirección de empresa están de acuerdo en que los resultados del proceso actual pueden ser considerados efectivos y eficaces. A medida que se requieran nuevos rediseños para responder a los cambios inevitables en el entorno, los directivos creen que el proceso probará que también es adaptable.

LA METODOLOGÍA DE PQM

Visión global. Un proyecto de PQM se inicia cuando la dirección ejecutiva selecciona procesos clave, identifica propietarios y equipos, y les proporciona declaraciones de misión y metas del proceso. Después de que los propietarios y el equipo se hayan formado en la metodología del proceso, realizan las tres fases de la metodología de PQM: planificación, transferencia y gestión operativa.

La *fase de planificación*, en la que tiene lugar el diseño (o rediseño) del proceso, implica cinco pasos:

1. Definir el proceso actual.
2. Determinar las necesidades de los clientes y el flujo del proceso.
3. Establecer las medidas del proceso.
4. Realizar análisis de medidas y de otros datos.
5. Diseñar el nuevo proceso. La salida es el nuevo plan del proceso.

La planificación es la etapa que más tiempo consume de las tres.

La *fase de transferencia* es la segunda fase, en la que los planes desarrollados en la primera fase se traspasan del equipo del proceso a las fuerzas operativas y se ponen en operación.

Gestión operativa es la tercera fase del PQM. En ella, el propietario del trabajo y el equipo controlan primero el rendimiento del nuevo proceso, centrándose en las medidas de la eficiencia y la eficacia del proceso. Aplican técnicas de control de la calidad, cuando resulta conveniente, para mantener el funcionamiento del proceso. Usan técnicas de mejora de la calidad para librarse de las deficiencias crónicas del proceso. Finalmente, realizan una revisión de gestión y una evaluación periódicas por la dirección para asegurar que el proceso continúa cumpliendo con las necesidades de los clientes y con las necesidades de la empresa, y sigue siendo competitivo.

La replanificación, vuelta del ciclo a la primera fase, se solicita cuando esté indicado. El PQM no es un acontecimiento singular; es en sí mismo un proceso continuo.

Inicio de la actividad de PQM

Seleccionar el o los procesos clave. Las organizaciones realizan docenas de procesos de empresa importantes transversales. De éstos, se seleccionan unos pocos procesos clave como centro del PQM. El Plan Estratégico de la organización proporciona orientaciones para seleccionar los procesos clave (véase el Capítulo 13, «Despliegue estratégico»).

Existen varios enfoques en la selección de los procesos de empresa clave:

- El enfoque del Factor Crítico del Éxito mantiene que en toda organización sólo pueden identificarse unos pocos factores (no más de ocho) como «necesarios y suficientes» para alcanzar su misión y visión. Una vez identificados, estos factores se usan para seleccionar los procesos clave de empresa y ordenarlos por orden de prioridad (Hardaker y Ward 1987).
- El Cuadro de Mando Integral (Kaplan y Norton 1992) mide el rendimiento de la empresa en cuatro dimensiones: rendimiento financiero, rendimiento a los ojos de los clientes, rendimiento interno de los procesos y rendimiento en formación e innovación de la organización. Para cada dimensión, se crean las medidas del rendimiento y se fijan las metas del rendimiento. El uso de estas medidas para supervisar el rendimiento proporciona una evaluación «equilibrada» del rendimiento de la empresa. Los procesos que crean desequilibrios en el Cuadro de Mando se identifican como los procesos que necesitan más atención: los procesos clave.
- Otro enfoque consiste en invitar a la alta dirección a que identifique unos pocos (de cuatro a seis) criterios críticos de selección específicos de la organización para usarlos en la evaluación de los procesos. Ejemplos de dichos criterios son: efecto en el éxito de la empresa, efecto en la satisfacción de los clientes, importancia de problemas asociados con el proceso, volumen de recursos dedicados normalmente al proceso, potencial de mejora, facilidad en la adopción de la gestión del proceso, y efecto del proceso sobre la programación. Mediante el uso de estos criterios y algún sistema sencillo de calificación (como «bajo, medio o alto»), los directivos evalúan los distintos procesos de una larga lista de procesos de empresa importantes de la organización (de 10 a 25), y comparando las evaluaciones, identifican los procesos clave. (La larga lista puede prepararse por adelantado en un estudio de identificación de procesos realizado por separado, con frecuencia por el principal responsable de calidad, y a menudo con el apoyo de un consultor).

Cualquiera que sea el enfoque utilizado para identificar los procesos clave, puede usarse el mapa de procesos para desplegar los resultados. El «mapa de procesos» es una herramienta gráfica que describe una organización según sus procesos de empresa y sus relaciones con los principales grupos con interés de la organización. El organigrama tradicional responde a la pregunta «¿Quién responde ante quién?». El mapa de proceso responde a la pregunta «¿Cómo se ejecuta el trabajo en la organización?».

La Figura 6.4 describe el trabajo de Educational Testing Services (Servicios de Examen de la Educación) (ETS), la organización que en Estados Unidos prepara y administra exámenes de acceso a la educación. En este mapa de procesos, las organizaciones y departamentos están representados por bloques sombreados con los títulos en negrita. Las unidades operativas clave de ETS, incluidas las unidades externas designadas «socios» por ETS, están localizadas dentro de una línea límite titulada «ETS». Los procesos de empresa importantes de ETS figuran marcados por un asterisco (*) en la lista dentro de esos límites. Estos son los procesos elegibles para ser centro del PQM, mostrados en sus relaciones con las distintas partes de la organización. Describir la organización desde una perspectiva de proceso proporciona a la alta dirección una herramienta útil para reflexionar y discutir sobre la organización según su trabajo y los procesos que emplea para ejecutar el trabajo.

Organización: Asignar la propiedad, elegir el equipo e infraestructura PQM. Dado que ciertos importantes procesos empresariales transversales, los *procesos clave*, son críticos para el éxito de la empresa, el comité de calidad procura que dichos procesos se organicen de un modo especial. Después de seleccionar los procesos clave, el comité de calidad nombra un propietario del proceso, que es responsable de que el proceso sea efectivo, eficaz y adaptable, y que pueda responder de su rendimiento (Riley, 1989 y 1994).

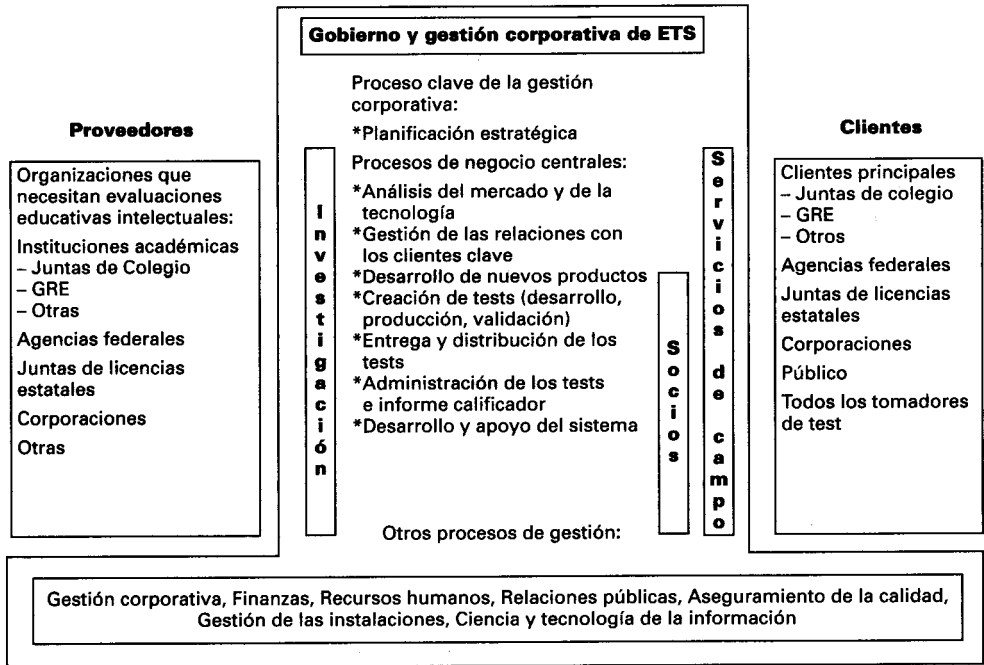


FIGURA 6.4 Mapa de proceso de los principales procesos de empresa en Educational Testing Services (Fuente: Juran Institute, Wilton, CT).

Para procesos complejos grandes, especialmente en grandes empresas, lo más frecuente es acordar una propiedad a dos niveles. Un ejecutivo asignado opera como patrocinador, campeón y defensor a nivel de la alta dirección, y es responsable de los resultados del proceso. A nivel operativo, un propietario operativo, normalmente un directivo de primer o segundo nivel, lidera el equipo de gestión del proceso responsable del día a día de la operación. Las asignaciones de propietario —propietario ejecutivo y propietario operativo— son continuas. La mayor ventaja de esta estructura es que hay al mismo tiempo una implicación de los «agentes» y un apoyo de la alta dirección y una gestión adecuada de los detalles del proceso.

El equipo de gestión del proceso es un grupo a nivel similar que incluye un gestor o supervisor de cada función principal dentro del proceso. Cada miembro es un experto en un segmento del proceso. Lo ideal es que los equipos de gestión del proceso no tengan más de ocho miembros y que los individuos elegidos sean líderes probados. El equipo es responsable de la gestión y mejora continua del proceso. El equipo comparte con el propietario la responsabilidad de su eficiencia y eficacia. Lo más frecuente es que las asignaciones de equipo sean continuas.

De cuando en cuando, un propietario del proceso crea un equipo *ad hoc* para ocuparse de algún tema especial (recursos humanos, tecnología de la información, coste según actividad, etc.). La misión de dicho equipo orientado a un proyecto es limitada y el equipo se dispersa una vez terminada su misión. El equipo *ad hoc* es distinto del equipo de gestión del proceso.

La Figura 6.5 es un diagrama simplificado de una organización multifuncional y uno de sus procesos principales. Las porciones compartidas son: el propietario ejecutivo, el propietario

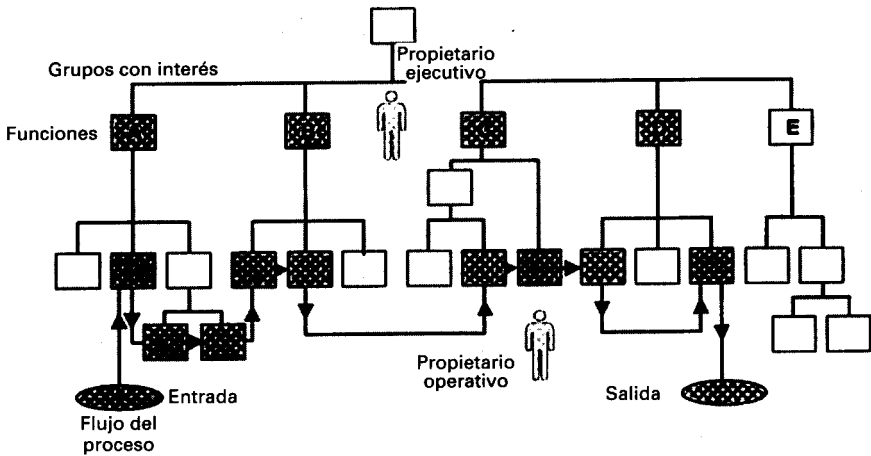


FIGURA 6.5 Infraestructura de la organización para la gestión de procesos en organizaciones multifuncionales (Fuente: Juran Institute, Wilton, CT).

operativo, el equipo de gestión del proceso y los grupos con interés: jefes funcionales a nivel ejecutivo, con actividades de trabajo de este proceso de empresa que entra dentro de su función. Habitualmente, los grupos con interés son miembros del comité de calidad, lo mismo que el propietario ejecutivo. En conjunto, esta porción compartida se llama Infraestructura de PQM.

Establecer las misiones y metas del equipo. El comité de calidad comunica la misión preliminar del proceso y sus metas de mejora a los propietarios (niveles ejecutivo y operativo) y al equipo. Para ejecutar más eficazmente sus tareas, los propietarios y el equipo deben hacer suyas la misión y las metas. Hacen esto en el primer paso de la fase de planificación: definir el proceso.

La fase de planificación: planificar el nuevo proceso. La primera fase de PQM es la planificación, que consta de cinco pasos: (1) definir el proceso; (2) descubrir las necesidades de los clientes y diseñar el flujo del proceso; (3) establecer las medidas del proceso; (4) analizar las medidas del proceso y otros datos, y (5) diseñar (o rediseñar) el proceso. El resultado de la fase de planificación es el nuevo plan de proceso.

Definir el proceso actual. El propietario o los propietarios y equipo colaboran para definir el proceso con precisión. Para lograrlo, su punto de partida y referencia principal es la documentación del proceso elaborada por el comité de calidad durante la selección de los procesos clave y la identificación de los propietarios y del equipo. Esta documentación incluye las declaraciones preliminares de misión y metas.

Las declaraciones efectivas de misión y metas informan explícitamente de:

- El propósito y alcance del proceso.
- Los objetivos «ambiciosos» para las necesidades de los clientes y las necesidades empresariales.

(El propósito del objetivo ambicioso es provocar una actividad enérgica de mejora del proceso).

Sirva como ejemplo una declaración de misión para el proceso de gestión de contratos especiales: proporcionar precios especiales competitivos y términos y condiciones favorables para la adquisición de grandes sistemas de información que satisfagan las necesidades de los clientes relativas a valor, apoyo contractual y plazos de tiempo a un coste abordable.

Las metas para el mismo proceso son:

1. Entregar un precio aprobado y un documento de respaldo del contrato en los 30 días siguientes a la declaración de intenciones del cliente.
2. Conseguir un rendimiento en las propuestas de contratos especiales (porcentaje de propuestas cerradas como ventas) no menor del 50 por ciento.

El equipo debe llegar a un consenso sobre la conveniencia de dichas declaraciones, proponer modificaciones para su aprobación por el comité de calidad, si es necesario, y también documentar su alcance, objetivos y contenido. Basándose en los datos disponibles y en la experiencia colectiva del equipo, éste documentará el flujo del proceso, sus puntos fuertes y puntos débiles, la historia del rendimiento, las medidas, costes, quejas, entorno, recursos, etc. Todo esto implicará probablemente documentación minuciosa y requerirá ciertamente el uso de diagramas de flujo.

Para delimitar el proceso, se empieza con un inventario de los principales subprocesos —de seis a ocho es lo normal— de que consta el proceso de negocio. El inventario debe incluir los subprocesos de «puesta en marcha» (los primeros subprocesos ejecutados), los subprocesos de «punto final» (los últimos ejecutados) y los principales subprocesos intermedios. Si tienen un efecto significativo sobre la calidad del proceso, se incluirán dentro de los límites del proceso las actividades hacia el inicio del proceso. Para centrarse y evitar ambigüedad es también útil hacer una lista de los subprocesos excluidos explícitamente del proceso de negocio. La información acumulada sobre los componentes del proceso se representa en forma de diagrama, que evoluciona, a medida que se completan los pasos de la fase de planificación, desde una colección de subprocesos hacia un diagrama de flujo.

La Figura 6.6 muestra el diagrama de alto nivel del proceso de contratos especiales que resultó del análisis del proceso, pero antes de que se rediseñara el proceso. Al final del paso de definición del proceso, dicho diagrama no es todavía un diagrama de flujo, pues no hay indicación de la secuencia en que ocurren los subprocesos. Establecer dichas relaciones como existen realmente es la tarea del paso 2.

Descubrir las necesidades de los clientes y dibujar el flujo del proceso. Para que el proceso funcione como debe, el equipo debe identificar todos los clientes, determinar sus necesidades y ordenar la información por prioridades. Las prioridades permiten al equipo centrar la atención y emplear las energías donde serán más efectivas. (El tema de la identificación de los clientes y sus necesidades se trata en detalle en el Capítulo 3, «El proceso de planificación de la calidad»).

Determinar las necesidades y expectativas de los clientes requiere una actividad disciplinada y continua. Los propietarios del proceso deben asegurarse de que esta actividad está incorporada en la ejecución diaria del proceso de empresa como subprocesos de requisitos de los clientes y asignar la responsabilidad de sus resultados. La salida de esta actividad crucial es una declaración de requisitos de los clientes continuamente actualizada.

En el diagrama de flujo del proceso es habitual indicar los proveedores y clientes clave y su papel en el proceso, como suministradores o receptores de materiales, producto, información, etc. Aunque el diagrama puede servir a diferentes propósitos concretos, lo más importante aquí es crear en el propietario y en los miembros del equipo una comprensión común de alto nivel del funcionamiento del proceso: de cómo se relacionan los subprocesos entre ellos y con los clientes y los proveedores y de cómo la información y el producto se mueven alrededor y a lo largo del proceso. Al crear el diagrama de flujo, el equipo verificará también la lista de clientes y puede, a medida que se ahonda la comprensión del proceso, aumentar esta lista de clientes.

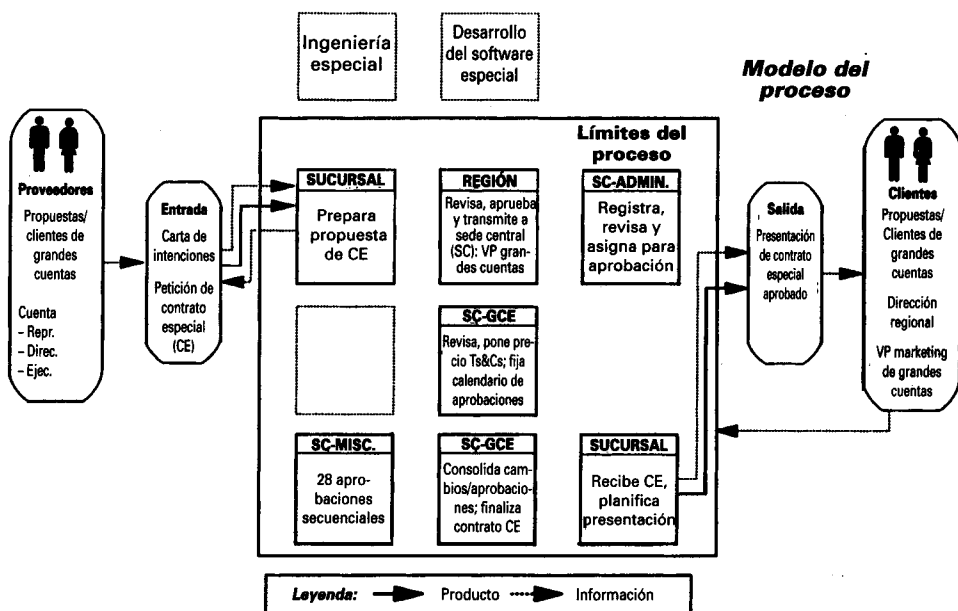


FIGURA 6.6 Diagrama de alto nivel del proceso de los contratos especiales, una salida del análisis del proceso (Fuente: Juran Institute, Wilton, CT).

El diagrama de flujo del proceso es la principal herramienta para analizar si el proceso puede satisfacer las necesidades de los clientes. Estudiando juntos el diagrama, paso a paso, compartiendo preguntas y experiencia colectiva, el equipo determina si el proceso está correctamente representado, ajustando el diagrama cuando sea necesario para reflejar el proceso tal como funciona en la realidad.

Cuando se ha completado este paso, el equipo cuenta con un punto de partida para analizar y mejorar el proceso. En la Figura 6.8 se muestra el flujo del producto con líneas continuas y el flujo de información con líneas punteadas.

Establecer las medidas del proceso. Lo que se mide, se hace. Establecer, recoger y usar las medidas correctas es crítico para gestionar la calidad del proceso de negocio. «Capacidad del proceso», «rendimiento del proceso» y otras medidas del proceso no tienen ningún significado práctico si el proceso al que pretenden describir no está gestionado. Para ser gestionado, el proceso debe cumplir con ciertas condiciones mínimas:

- Tiene un propietario.
- Está definido.
- La infraestructura de gestión está en su sitio.
- Se han establecido sus requisitos.
- Se han establecido sus medidas y puntos de control.
- Presenta unos resultados estables, previsibles y repetibles.

De un proceso que cumpla con estas condiciones mínimas se dice que es *gestionable*. La capacidad de ser gestionado es la condición previa para el trabajo posterior en PQM.

De estos criterios, se han tratado en este capítulo los criterios (a), (b), (c) y (d). De los criterios (e) y (f) se tratará a continuación.

Medidas de los procesos (véase también el Capítulo 9). Para decidir qué aspectos del proceso medir, recurrimos a las orientaciones de la misión del proceso y a nuestra lista de necesidades de los clientes. Las medidas basadas en las necesidades de los clientes proporcionan un medio de medir la eficacia del proceso. Por ejemplo, si el cliente pide la entrega de un pedido a las 24 horas de hacer el pedido, incorporaremos en nuestro proceso de ejecución de pedidos una medida como «tiempo transcurrido entre recepción del pedido y entrega del pedido», y un sistema para recoger, procesar, resumir y entregar la información de los datos generados. El dato estadístico entregado al propietario ejecutivo será «tanto por ciento de pedidos entregados en 24 horas», una estadística que resume los resultados puntuales. El equipo también necesitará datos sobre los que basar el análisis y la corrección de problemas y la mejora continua del proceso. Con este objetivo, el equipo necesita datos a partir de los que poder calcular estadísticas descriptivas tales como distribución de los tiempos de entrega por tipo de producto, etc. En el momento del diseño del proceso se debe pensar cuidadosamente para qué se van a usar los datos, y así minimizar el rediseño de las medidas y de los sistemas de medidas.

Las medidas del proceso basadas en costes, duración del ciclo, productividad laboral, rendimiento del proceso, etc., son medidas de la eficacia del proceso. Supongamos que una meta de nuestro proceso de ejecución de pedidos es reducir los errores a uno por cada mil líneas de pedido. Gestionar para esta meta requiere identificar los errores en la recogida de pedidos con relación al número de líneas de pedido recogidas. En cuanto a errores en la recogida de pedidos que pasan inadvertidos —es decir, cuando ocurren, el recogedor no se da cuenta de ellos—, medirlos requiere una inspección separada que detecte errores. En una auditoría aleatoria sobre una muestra de pedidos recogidos, un inspector identifica errores y los registra. Igual que con la medida del tiempo de entrega, el equipo debe reflexionar sobre el uso que hará de estas medidas. Los datos necesarios para un informe de promedio estimado de errores son: número de errores y número de líneas de pedido inspeccionadas. Para mejorar los resultados del proceso en esta categoría, los datos deben ayudar al equipo a identificar las fuentes de error y a determinar la raíz de las causas. Para que ocurra esto, cada error debe asociarse con la hora del día, el turno, el tipo de producto, el tamaño del embalaje, etc., de forma que los datos se puedan estratificar para probar las diversas teorías sobre las causas raíz.

Aunque no es una categoría de medida, la adaptabilidad del proceso es una consideración importante a tener en cuenta por los propietarios y equipos del proceso. La adaptabilidad se tratará más adelante en este capítulo.

Deben ligarse las medidas del proceso a los resultados del negocio. Si ciertos procesos clave deben funcionar excepcionalmente bien para asegurar el éxito de la organización, se deduce que el éxito colectivo de los procesos clave es bueno para los resultados del negocio. Los propietarios del proceso deben poner cuidado en seleccionar las medidas del proceso que estén fuertemente relacionadas con los indicadores tradicionales del negocio, como ingresos, beneficio, ROI, ganancias por acción, productividad por empleado, etc. En las revisiones de alto nivel del plan de la empresa, los directivos se sienten motivados y recompensados por mantener esta ligazón entre proceso y medidas de los resultados del negocio, a causa de los dos valores que el PQM apoya: el éxito de la organización es bueno, y la gestión del proceso es el medio con el que conseguiremos el éxito de la organización.

La Figura 6.7 muestra algunas medidas típicas del proceso y los indicadores tradicionales de empresa a los que están ligados. Como ejemplo, el «tanto por ciento de cuota de ventas conseguido» es un indicador tradicional de empresa que se relaciona con el objetivo de la empresa de mejorar los ingresos. El proceso de gestión de los contratos especiales tiene un impacto grande sobre el indicador, ya que más del 30 por ciento de los ingresos de EE. UU. proceden de este proceso. Por tanto, el promedio de cierre de contratos (relación entre el valor de los contratos firmes y el valor total de las propuestas presentadas) del proceso de gestión de los contratos especiales está ligado al porcentaje de cuota de ventas y a otras medidas tradicionales de ingresos, y es, por consiguiente, una medida de gran importancia para la gestión. Los puntos de medida aparecen en el diagrama de flujo del proceso.

Punto de vista tradicional de la empresa		Punto de vista del proceso	
Objetivo de la empresa	Indicador de la empresa	Proceso clave	Medida del proceso
Ingresos más altos	Porcentaje de cuota de ventas conseguido.	Gestión de con- tratos.	Promedio de contratos cerrados.
	Porcentaje de plan de ingre- sos conseguido.	Desarrollo de pro- ductos.	Duración del ciclo de desarrollo.
	Valor de pedidos cancelados después del envío.	Gestión de las cuentas.	Gestión de pedidos pendientes y plazos del sistema de aseguramiento.
	Días de entrega pendientes de cobrar.		Índice de calidad de la facturación.
Reducción de costes	Rotaciones de inventario.	Fabricación.	Duración del ciclo de fabricación.

FIGURA 6.7 Enlaces entre objetivos de empresa, indicadores tradicionales de la empresa y medidas del proceso generadas por el enfoque de gestión de procesos: unos ejemplos (Fuente: Juran Institute, Wilton, CT).

Puntos de control. La medida del proceso forma parte también de los mecanismos de control establecidos para mantener el funcionamiento planificado en el nuevo proceso. Para controlar el proceso se requiere que cada una de las pocas variables del proceso seleccionadas sean los elementos del control de un bucle de realimentación de control. Habitualmente, habrá de cinco a seis puntos de control en el nivel de los macroprocesos para variables asociadas con: salida externa, entrada externa, productos clave intermedios y otros puntos de gran influencia en el proceso.

Los puntos de control en el proceso de gestión de los contratos especiales están representados gráficamente en la Figura 6.8. El diseño del bucle de realimentación y otros temas concernientes al control del proceso se trataron con más detalle en el Capítulo 4, «El proceso de control de la calidad».

Variabilidad, estabilidad y capacidad del proceso. Como todos los procesos, los procesos de empresa muestran variabilidad. Las herramientas de control estadístico de procesos tales como el gráfico de control de Shewhart (véase el Capítulo 45, «Control estadístico del proceso») ayudan al equipo a minimizar la variación del proceso y a evaluar su estabilidad.

La evaluación de la capacidad del proceso es un paso importante en la mejora de la calidad. La capacidad del proceso es una medida de la variación en un proceso que opera bajo condiciones estables. «Bajo condiciones estables» significa que toda variación en el proceso es atribuible a causas aleatorias. El criterio habitual de estabilidad es que el proceso, tal como se dibujó e interpretó en el gráfico de control de Shewhart, está «bajo control».

El control estadístico de procesos, la capacidad del proceso y las herramientas asociadas son componentes útiles del surtido de herramientas del equipo del proceso. Se trata de ellas en el Capítulo 44, «Métodos estadísticos básicos».

El resultado del paso de medidas es un plan de medidas, una lista de medidas del proceso a realizar y los detalles de cada una de ellas: quién la hará, cómo la hará, según qué calendario, etc.

Analizar el proceso. El análisis del proceso se realiza con los objetivos siguientes:

- Evaluar la efectividad y eficacia del proceso actual.
- Identificar las causas subyacentes de toda falta de adecuación de los resultados.
- Identificar las oportunidades de mejora.
- Realizar las mejoras.

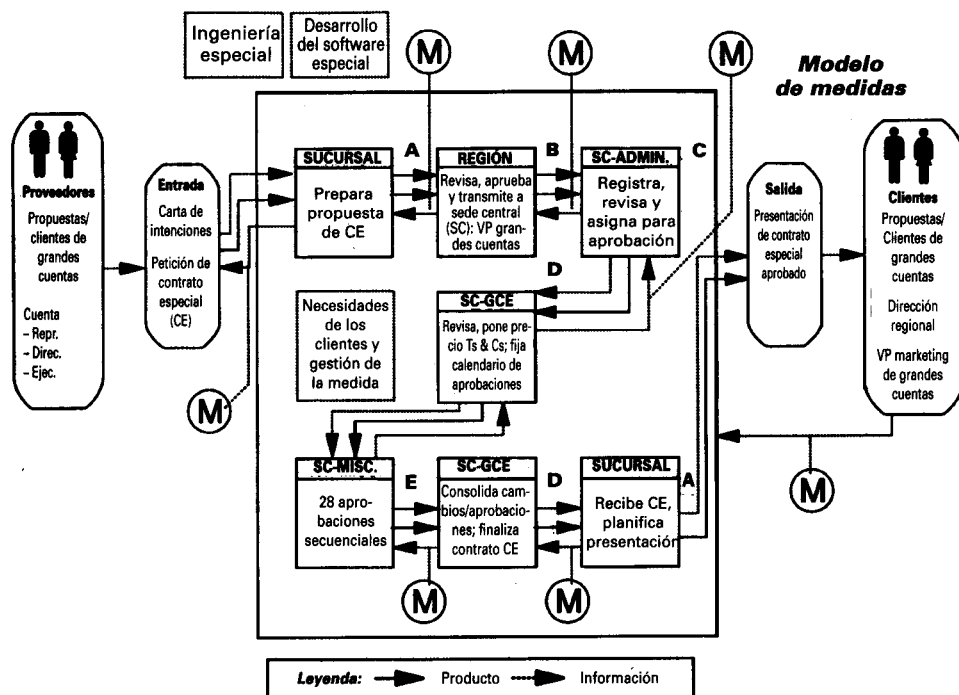


FIGURA 6.8 Diagrama del proceso de gestión de los contratos especiales, incluidos los puntos de control del proceso (Fuente: Juran Institute, Wilton, CT).

En primer lugar, en referencia al diagrama de flujo del proceso, el equipo divide el proceso en las actividades que lo componen, usando un procedimiento llamado «descomposición del proceso», que consiste en la división progresiva del proceso, nivel a nivel, empezando con el macronivel. A medida que avanza la descomposición, el proceso se describe en detalles cada vez más finos.

Conforme se comprenden los puntos fuertes y los puntos débiles del proceso en un nivel, las teorías y conclusiones provisionales del equipo de gestión del proceso ayudarán a decidir dónde continuar el análisis. El equipo descubrirá que ciertos subprocesos influyen más que otros sobre los resultados del proceso global de empresa (un ejemplo del principio de Pareto). Estos subprocesos más significativos se convierten en el objetivo del siguiente nivel de análisis.

La descomposición está terminada cuando las partes del proceso son lo suficientemente pequeñas como para juzgar su efectividad y eficacia. La Figura 6.9 da ejemplos de tres niveles de descomposición (subproceso, actividad y tarea) de tres procesos de empresa típicos (aprovisionamiento, ingeniería de desarrollo y administración).

Los datos de las medidas se recogen de acuerdo con el plan de medidas para determinar la efectividad y eficacia del proceso. Se analizan los datos para ver su efectividad (conformidad con las necesidades de los clientes) y su capacidad a largo plazo de satisfacer los requisitos actuales y futuros de los clientes.

La meta de la eficacia del proceso es que todos los procesos clave del negocio funcionen a un mínimo global en coste y duración del ciclo, satisfaciendo a la vez los requisitos de los clientes.

Proceso de empresa	Subproceso	Actividad	Tarea
Aprovisionamiento	Selección de proveedor.	Encuesta al proveedor.	Documentación del proveedor externo.
Ingeniería de desarrollo	Diseño del hardware.	Cambio de ingeniería.	Convocar el Comité de Cambios.
Administración	Proporcionar servicios de secretaría.	Gestión del calendario.	Realizar un cambio en el calendario existente.

FIGURA 6.9 Descomposición del proceso: ejemplos de elementos del proceso descubiertos dentro de los procesos típicos de empresa (*Fuente: Juran Institute, Wilton, CT*).

La *efectividad* y la *eficacia* del proceso se analizan conjuntamente. Maximizar la efectividad y la eficacia a la vez significa que el proceso produce calidad alta a coste bajo; en otras palabras, puede proporcionar el máximo *valor* a los clientes.

La «adaptabilidad del proceso de empresa» es la facultad de un proceso de acomodarse fácilmente a los cambios tanto en los requisitos como en el entorno, manteniendo a la vez su efectividad y eficacia en el tiempo.

Para analizar un proceso de empresa, se examina el diagrama de flujo en cuatro pasos y se modifica si es necesario. Los pasos son:

- Examinar cada símbolo de decisión:
 - ¿Es esto una actividad de comprobación?
 - Si es así, ¿es esto una comprobación completa o pasan algunos errores sin ser detectados?
 - ¿Es esto una comprobación redundante?
- Examinar cada bucle de reparación del trabajo:
 - ¿Necesitaríamos ejecutar estas actividades si no hubiera fallos?
 - ¿Cómo es de «largo» este bucle de reparación (medido en número de pasos, tiempo perdido, recursos consumidos, etc.)?
 - ¿Previene este bucle de reparación que vuelva a ocurrir el problema?
- Examinar cada símbolo de actividad:
 - ¿Es esta una actividad redundante?
 - ¿Cuál es el valor de esta actividad con relación a su coste?
 - ¿Cómo hemos prevenido los errores en esta actividad?
- Examinar cada símbolo de documento y de base de datos:
 - ¿Es esto necesario?
 - ¿Cómo se mantiene actualizado?
 - ¿Hay una sola fuente para esta información?
 - ¿Cómo podemos usar esta información para controlar y mejorar el proceso?

El «Informe resumen del análisis del proceso» es la culminación y resultado clave de este paso del análisis del proceso. Incluye los hallazgos del análisis, o sea, los motivos de la falta de adecuación de su proceso de rendimiento y las soluciones potenciales que se han propuesto y registrado por el propietario y por el equipo a medida que avanzaba el análisis. La finalización de este informe es el momento oportuno para una revisión ejecutiva conjunta del propietario y los grupos con interés.

Las revisiones conjuntas del propietario ejecutivo y los grupos con interés pueden ser muy motivadoras para propietarios, equipos, grupos con interés y comité de calidad. De interés particular es la presentación de las soluciones potenciales para la operación mejorada del proceso. Se habrán recogido a lo largo de toda la fase de planificación y se habrán almacenado en un cajón de ideas. Estas sugerencias de diseño están ahora documentadas y organizadas para la revisión ejecutiva como parte de la presentación del informe resumen del análisis del proceso.

Al revisar las soluciones potenciales, el propietario ejecutivo y el comité de calidad proporcionan los criterios de selección de alternativas aceptables de diseño del proceso. Conocer los criterios de la alta dirección respecto a las soluciones propuestas ayuda a centrar los esfuerzos de diseño del equipo de gestión del proceso y facilita una favorable recepción del plan rediseñado del nuevo proceso.

Diseñar (o rediseñar) el proceso. En el diseño del proceso, el equipo define los medios operativos específicos para alcanzar las metas declaradas del producto. El resultado es un plan de proceso desarrollado de nuevo. Los cambios en el diseño pertenecen a las siguientes categorías generales: flujo de trabajo, tecnología, personal y organización, infraestructura física, y política y reglamentaciones.

En el paso del diseño, el propietario y el equipo deben decidir si crear un diseño nuevo del proceso o rediseñar el proceso existente. Crear un diseño nuevo puede significar un cambio radical; normalmente, rediseñar significa un cambio gradual con algún aprovechamiento de las características de diseño existentes.

El equipo generará varios diseños alternativos, con aportación de fuentes internas y externas. Un modo de generar estas alternativas de diseño desde fuentes internas consiste en preparar a quienes ejecutan tareas para que apliquen un pensamiento creativo al rediseño de sus procesos.

Las ideas generadas en estas sesiones se documentan y se añaden al cajón de las ideas. El benchmarking puede proporcionar una rica fuente de ideas de fuentes externas, incluyendo ideas para un cambio radical. El benchmarking se trata en detalle en el Capítulo 12.

Al diseñar para la efectividad del proceso, la variable de más interés es normalmente la duración del ciclo del proceso. En la competencia orientada al servicio, la duración menor del ciclo de proceso es a menudo la característica decisiva. Más aún, la reducción de la duración del ciclo habitualmente se traduce también en ganancia en eficacia. Para muchos procesos, la fuente de reducción de la duración del ciclo más prometedora es la introducción de nueva tecnología, especialmente de tecnología de la información.

Diseñar para conseguir rapidez crea beneficios competitivos sorprendentes: aumento de la cuota de mercado y reducción de las necesidades de inventario. Hewlett-Packard, Brunswick Corp., la División de Distribución Eléctrica y Control de GE, AT&T y Benetton están entre las empresas que han informado de logros asombrosos en la reducción de la duración del ciclo, tanto para el desarrollo del producto como para la fabricación (Dumaine 1989). En cada una de estas empresas, los frutos resultaron de los esfuerzos basados en centrarse en los principales procesos. Otras características comunes de estos esfuerzos son:

- Expandir los objetivos propuestos por la alta dirección.
- Sujeción absoluta al calendario, una vez acordado.
- Aplicación de tecnología punta de la información.
- Reducción de niveles de gestión en favor de apoderar a los empleados y de equipos de trabajo autodirigidos.
- Introducir la rapidez en la cultura.

Al diseñar para conseguir rapidez, los rediseños con éxito se originan con frecuencia a partir de unas pocas pautas relativamente sencillas: eliminar traspasos en el proceso, eliminar problemas causados en el inicio de la actividad, suprimir demoras o errores durante los traspasos entre áreas funcionales y combinar pasos que conecten negocios o funciones. Se dan algunos ejemplos:

- *Eliminar traspasos en el proceso.* Un «traspaso» es la transferencia de material o información de una persona a otra, especialmente a través de límites departamentales. En todo proceso que implique más de una sola persona, son inevitables los traspasos. Debe reconocerse, sin embargo, que el traspaso consume tiempo y es peligroso para la integridad

del proceso: instrucciones que faltan, identificaciones de elementos confundidas, especificaciones obsoletas, peticiones de clientes mal transmitidas.

En el proceso de gestión de los contratos especiales, tratado previamente en este capítulo, el uso de comités de revisión concurrentes eliminó las 28 aprobaciones ejecutivas secuenciales y los trasposos asociados.

- *Eliminar problemas causados en el inicio de la actividad.* Los errores en la anotación de pedidos en una empresa de ordenadores de EE.UU. fueron causados porque los representantes de ventas configuraron incorrectamente los sistemas. Como resultado, el coste del proceso de ventas y pedidos era un 30 por ciento más alto que el de los competidores, y los porcentajes de error para algunos productos llegaban a ser del 100 por ciento. Un rediseño transversal arregló tanto los problemas de configuración como el de habilidades del grupo de ventas, de forma que se mejoró la entrega a tiempo con un ahorro considerable de costes (Hall, Rosenthal y Wade 1993).
- *Suprimir demoras o errores durante los trasposos entre áreas funcionales.* El procesamiento de una nueva póliza en una empresa aseguradora del Reino Unido implicaba 10 trasposos y tardaba en completarse por lo menos 40 días. La empresa implantó un enfoque de gestor de casos, por el que sólo ocurría un trasposo y la póliza se procesaba en menos de siete días (Hall, Rosenthal y Wade 1993).
- *Combinar pasos que conecten negocios o funciones.* En una empresa fabricante de equipos electrónicos de EE.UU., hasta siete títulos de denominaciones de puestos de trabajo en tres funciones diferentes estaban implicados en los nueve pasos requeridos para diseñar, producir, instalar y mantener hardware. La empresa eliminó todas menos dos denominaciones, dejando un puesto en ventas y un puesto en fabricación (Hall, Rosenthal y Wade 1993).

El proceso de pago de cuentas de Ford proporciona un ejemplo clásico de rediseño del proceso. Los detalles se encuentran en Hammer y Champy (1993). La gestión de la calidad de los procesos tiene éxito cuando el paso del diseño supone un cambio radical. Hammer y Champy proponen los siguientes principios para dicho cambio radical de un proceso:

- Organizar el proceso en torno de los resultados, no de las tareas.
- Hacer que ejecuten el proceso los que usan la salida del proceso.
- Incorporar el trabajo de procesamiento de la información al trabajo real que produce la información.
- Tratar los recursos geográficamente dispersos como si estuvieran centralizados.
- Coordinar las funciones paralelas dentro del proceso, no en pasos consecutivos.
- Colocar el punto de decisión donde se ejecuta el trabajo y crear un control dentro del proceso.
- Capturar la información sólo una vez y en la propia fuente.

Antes de implantar el nuevo diseño, se requiere una revisión del diseño. Su objetivo es moderar el entusiasmo del equipo con la objetividad de otras personas experimentadas. Normalmente, el propietario del proceso reúne un panel de expertos de la propia organización (pero fuera del proceso) para que proporcionen la evaluación de los diseños alternativos.

La prueba del diseño del proceso se realiza para determinar si los diseños alternativos del proceso funcionarán en condiciones operativas. La prueba del diseño puede incluir planes piloto, ensayos, simulaciones, etc. Se usan los resultados para predecir el funcionamiento del nuevo proceso, su viabilidad coste/beneficio.

Un diseño de proceso con éxito requiere la participación e implicación de los empleados. Descuidar dicha participación supone perder una oportunidad para la mejora y crear una barrera significativa para ella. La creatividad de la fuerza laboral de primera línea para generar diseños nuevos puede ser significativa.

Byrne (1993) informa de que muchas empresas están adoptando el «diseño de organización horizontal», que tiene como característica el uso de equipos de trabajo autodirigidos y organizados en torno al proceso. Eastman Chemical tiene más de 1.000 equipos; la confianza creciente de la empresa en los equipos autodirigidos le ha permitido eliminar puestos de vicepresidente (VP) senior en administración, fabricación e I&D (véase también el Capítulo 15, «Recursos humanos y calidad»).

Lexmark International, una antigua división de IBM, abolió el 60 por ciento de los puestos de gestión en fabricación y servicios de apoyo. En su lugar, se organizó en todo el mundo en torno a equipos transversales.

Crear el plan del nuevo proceso. Tras haber redefinido un proceso clave, debemos documentar el nuevo proceso y explicar cuidadosamente los nuevos pasos. El plan del nuevo proceso incluye ahora el diseño del nuevo proceso y su plan de control para mantener el nuevo nivel de resultados del proceso. El plan del nuevo proceso para la gestión de los contratos especiales, mostrado como un esquema de proceso de alto nivel, se ve en la Figura 6.10.

La fase de transferencia: transferir el plan del nuevo proceso a las operaciones. La fase de transferencia consta de tres pasos: (1) planificar para prevenir los problemas de implantación; (2) planificar para la acción de implantación, y (3) desplegar el plan del nuevo proceso.

Planificar para prevenir los problemas de implantación. Un proyecto importante de PQM puede implicar gastos enormes y precipitar un cambio fundamental en una organización, afectando a miles de tareas. Todo esto plantea cambios de gestión importantes. Todos los cambios deben planificarse, fecharse y completarse de forma que el nuevo proceso pueda desplegarse

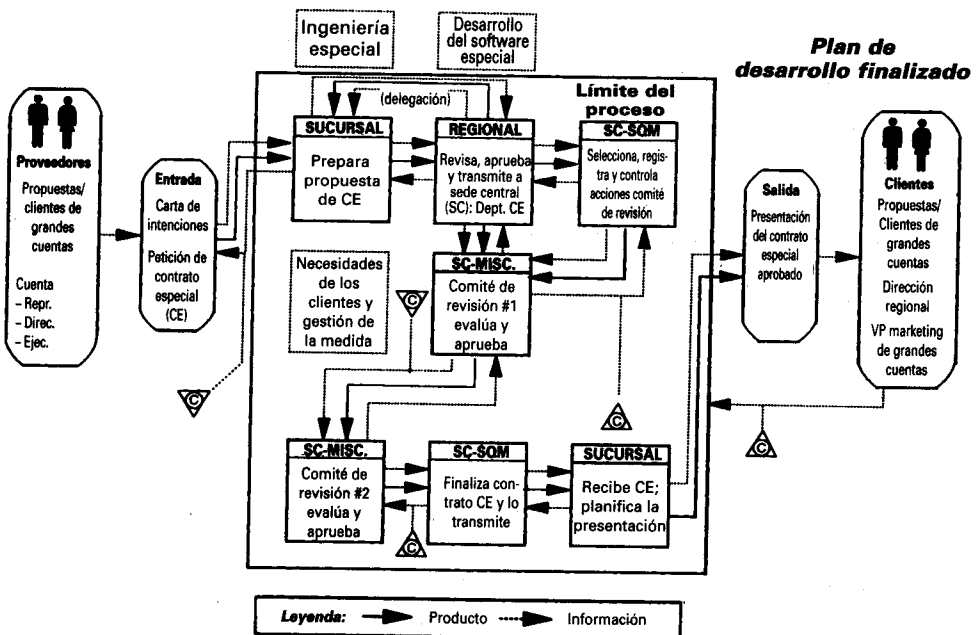


FIGURA 6.10 Diagrama del plan de proceso finalizado para el proceso de gestión de los contratos especiales (Fuente: Juran Institute, Wilton, CT).

para su gestión operativa. La Figura 6.11 identifica las categorías específicas de problemas que hay que tratar y los elementos clave que están incluidos.

De las cinco categorías listadas en la Figura 6.11, Personal y organización es habitualmente la fuente de los asuntos más peliagudos relacionados con el cambio en cualquier proyecto de PQM. Los asuntos de implantación en la categoría de diseño de organización y personal incluyen: nuevas tareas, que normalmente son mayores; nueva descripción de las tareas; formación de personal en las nuevas tareas; planes y objetivos de rendimiento nuevos; nuevos sistemas de compensación (paga de incentivos, participación en los beneficios, etc.); nuevos mecanismos de reconocimiento y recompensa; nuevos convenios laborales con los sindicatos; introducción de conceptos de trabajo en equipo y formación de equipo esenciales para la orientación del proceso; formación de equipos de trabajo autodirigidos; educación de equipo; reducción de niveles de gestión; nuevas relaciones de responsabilidad; desarrollo y gestión de planes de cese para aquellos cuyas tareas se eliminan; continuación temporal de prestaciones; programas de colocación externa, y nuevas formas de hacer carrera basadas en el conocimiento y la contribución, más que en la promoción dentro de una jerarquía. La lista no acaba aquí. Adicionalmente, hay que tratar con cambios en tecnología, política, infraestructura física, etc.

La importancia de las habilidades para gestionar el cambio queda patente. Desplegar un nuevo proceso puede ser una amenaza para los afectados. El propietario y el equipo deben ser hábiles en superar las resistencias al cambio.

Crear disposición al cambio: un modelo para el cambio. El cambio ocurre cuando se combinan cuatro condiciones. Primera, el estado actual debe verse como insatisfactorio, incluso como penoso; debe constituir una tensión hacia el cambio. Segunda, debe haber una alternativa satisfactoria, una visión de cómo las cosas pueden resultar mejores. Tercera, deben ser posibles algunos pasos prácticos para alcanzar ese estado satisfactorio, incluyendo instrucciones de cómo dar esos pasos y apoyo durante el tránsito. Cuarta, para mantener el cambio, la organización y el personal deben adquirir habilidades y conseguir un estado de autoeficacia.

Estas cuatro condiciones refuerzan el intento de cambio. El avance hacia este cambio debe controlarse continuamente para convertir el cambio en permanente. En la fase de gestión operativa, los controles operativos, la actividad de mejora continua y la revisión y la evaluación continuas contribuyen a asegurar que el plan del nuevo proceso continúe funcionando como se planificó (véase también Resistencia al cambio y cómo tratarla en el Capítulo 5, «El proceso de mejora de la calidad»).

Planificar para la acción de implantación. La salida de este paso es un plan complejo de trabajo, que deben llevar a cabo el propietario y el equipo de gestión del proceso. Podrán beneficiarse de habilidades en técnicas de Gestión del proyecto (véase el Capítulo 17, «Gestión de proyectos y desarrollo de productos»).

Categoría	Elementos clave incluidos
Flujo del trabajo	Anatomía del proceso (macro/micro, transversal, intrafuncional, interdepartamental e intradepartamental).
Tecnología	Tecnología de la información y automatización.
Personal y organización	Tareas, descripción de tareas, formación y desarrollo, gestión del funcionamiento, compensación (basada en incentivos o no), reconocimiento/recompensa, implicación sindical, equipos, equipos de trabajo autodirigidos, relaciones de responsabilidad y eliminación de estratos.
Infraestructura (física)	Localización, espacio, disposición, equipamiento, herramientas y accesorios.
Política/reglamentaciones	Gobierno, comunidad, sector, empresa, normas y cultura.
Asuntos del diseño del nuevo proceso	

FIGURA 6.11 Categorías de diseño (Fuente: Juran Institute, Wilton, CT).

Desplegar el plan del nuevo proceso. Antes de implantar realmente el nuevo proceso, el equipo debe probar el plan del proceso. Se prueban componentes seleccionados del proceso y se pueden realizar simulaciones por ordenador. Su objetivo es predecir el funcionamiento del nuevo proceso y determinar su viabilidad. También, las pruebas ayudan al equipo a refinar el «despliegue progresivo» del proceso y decidir si ejecutar una operación paralela (el proceso antiguo y el nuevo proceso funcionando simultáneamente). El equipo debe decidir cómo desplegar el nuevo proceso. Existen varias opciones:

- *Despliegue horizontal*, función por función.
- *Despliegue vertical*, de arriba abajo, todas las funciones a la vez.
- *Despliegue modular*, actividad por actividad, hasta que todas estén desplegadas.
- *Despliegue por prioridad*, subprocesos y actividades en secuencia prioritaria, en primer lugar los que tienen el potencial de mejora más alto.
- *Despliegue de prueba*, un ensayo piloto a pequeña escala de todo el proceso, luego la expansión hasta la implantación completa. Esta técnica se usó en el primer rediseño del proceso de gestión de contratos especiales, es decir, una prueba regional precedió a la expansión nacional. La empresa aseguradora USAA realiza todos los ensayos piloto de diseños de nuevos procesos en su región de los Grandes Lagos. Además de «quitar los virus del nuevo diseño antes de convertirlo en nacional», USAA usa este enfoque como una «experiencia de ampliación de carrera para directivos prometedores» y para «desarrollar el nuevo diseño ante el resto de la organización con mucha menos resistencia» (Garvin 1995).

El despliegue completo del nuevo proceso incluye el desarrollo y despliegue de un plan de control actualizado. La Figura 6.12 lista los contenidos del nuevo plan del proceso.

Fase de gestión de la operación: gestionar el nuevo proceso. La fase de gestión de la operación empieza cuando el proceso se pone en operación. Las principales actividades de la gestión de la operación son: (1) control de la calidad del proceso; (2) mejora de la calidad del proceso, y (3) revisión y evaluación periódicas del proceso.

• Misión del proceso
• Metas del proceso
• Infraestructura de gestión del proceso (es decir, propietario/equipo/grupos con interés)
• Contrato del proceso
• Descripción/modelo del proceso
• Requisitos de los clientes (es decir, lista de clientes, necesidades de los clientes y declaración de requisitos)
• Flujo del proceso
• Plan de medidas
• Informe resumen del análisis del proceso
• Plan de control
• Plan de acción de la implantación
• Plan de recursos
• Calendario/plazos

FIGURA 6.12 Contenido del plan del proceso completo (Fuente: Juran Institute, Wilton, CT).

Control de la calidad del proceso. El «control del proceso» es un proceso de gestión continuo, en el que se evalúa el funcionamiento real del proceso operativo mediante medidas tomadas en los puntos de control, comparando las medidas con los objetivos de calidad y emprendiendo acciones sobre las diferencias. La meta del control del proceso es mantener el funcionamiento del proceso de empresa en su nivel planificado (véase el Capítulo 4, «El proceso de control de la calidad»).

Mejora de la calidad del proceso. Mediante el control del funcionamiento del proceso con respecto a los requisitos de los clientes, el propietario del proceso puede identificar las brechas entre lo que el proceso entrega y lo que se requiere para la completa satisfacción de los clientes. Estas brechas constituyen los objetivos de los esfuerzos de la mejora de la calidad del proceso. Aparecen como defectos, quejas, altos costes de mala calidad y otras deficiencias (véase el Capítulo 5, «El proceso de mejora de la calidad»).

Revisión y evaluación periódicas del proceso. El propietario realiza revisiones y evaluaciones del funcionamiento real del proceso para asegurar que el proceso está funcionando de acuerdo con el plan. La revisión deberá incluir la revisión y evaluación del diseño del proceso mismo para protegerlo contra cambios en las hipótesis del diseño y contra cambios futuros previsibles, como cambios en las necesidades de los clientes, tecnología nueva o diseños de proceso de los competidores. Merece la pena que el propietario del proceso establezca un calendario de revisión de las necesidades de los clientes y de evaluación y benchmarking del proceso actual.

Conforme cambian las necesidades de los clientes, las medidas del proceso deben refinarse para reflejar estos cambios. Este refinamiento continuo es el objeto de un subproceso de gestión de las medidas, que los propietarios y el equipo establecen y que complementa el subproceso de las necesidades de los clientes. Los dos procesos van de la mano.

La categoría de gestión de procesos de los criterios del Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige (1998) proporciona una base para la revisión de la gestión y evaluación del funcionamiento del proceso.

Otros criterios externos de premios de fuentes internacionales, así como muchas normas nacionales e internacionales, sirven de inspiración y orientación a los propietarios y al equipo que estudian revisiones del proceso (véase el Capítulo 14, «Gestión de la calidad total», y el Capítulo 11, «La familia de normas internacionales ISO 9000»).

LA INTEGRACIÓN DE PQM CON TQM

Los criterios del Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige están considerados como la definición de facto de TQM (véase el Capítulo 14). La gestión de la calidad de los procesos es un concepto importante dentro del marco de TQM.

Las organizaciones han aprendido a no limitar la atención de la dirección a la dimensión financiera. Han adquirido experiencia en la definición, identificación y gestión de la dimensión de la calidad. Se han acostumbrado a pensar estratégicamente: fijar una visión, misión y metas, todas en línea. Y tendrán experiencia en revisar el avance frente a dichas metas.

El proceso de mejora de la calidad, que empezó en Japón en los años cincuenta y se desplegó ampliamente en Estados Unidos en los primeros ochenta, fue un paso importante más allá de la gestión funcional. Las organizaciones descubrieron que la mejora de la calidad requería dos nuevas piezas en la maquinaria de la organización: el comité de calidad y el equipo de proyectos transversal. El comité de calidad consiste habitualmente en el equipo de alta dirección; a su responsabilidad tradicional de gestión de las finanzas se le añade la responsabilidad de gestión de la calidad. El equipo de proyectos reconoce que en una organización funcional la responsabilidad de reducir las deficiencias crónicas tiene que asignarse a un equipo transversal.

PQM es una extensión natural de muchas de las lecciones aprendidas en las primeras actividades de mejora de la calidad. Requiere un cambio conceptual: de confiar en la especialización funcional a comprender las ventajas de centrarse en los procesos principales del negocio. Requiere también una pieza adicional en la maquinaria de la organización: una infraestructura para cada uno de los procesos principales.

RESUMEN Y FACTORES CRÍTICOS PARA EL ÉXITO DE LA IMPLANTACIÓN DE PQM

Puntos clave. PQM se distingue por lo siguiente:

- Una orientación estratégica, es decir,
 - Una misión, valores y visión claros para la organización.
 - Metas estratégicas ligadas a la visión de la organización, que son compartidas por el liderazgo ejecutivo y desplegadas a través de la organización en forma de objetivos clave del negocio.
 - Alineación y enlace de los procesos de la organización con su visión, planes estratégicos y objetivos.
- Una orientación transversal en lugar de la organización jerárquica.
- Equipos de proceso transversales, apoyados por el sistema de gestión (educación, comunicación, gestión del funcionamiento, reconocimiento y recompensa, compensación, nuevas estructuras de carrera profesional, etc.). La misión de cada equipo consiste en mejorar drásticamente la efectividad, eficacia y adaptabilidad de cada proceso principal de la empresa al que está asignado.
- Enfoque primordial de la organización en las necesidades de los clientes, externos e internos, y en las necesidades de la empresa, como coste, duración del ciclo, eliminación de desperdicio, etc.
- El manejo de todos los procesos de trabajo ateniéndose a la calidad de los productos y de los servicios y a la creación de valor global.

Factores críticos para el éxito de la implantación de PQM. Los factores siguientes son importantes para el éxito de una iniciativa de PQM:

- Liderazgo desde la cima de la organización.
- Dirección que comunica la visión, metas estratégicas y objetivos clave del negocio a través de toda la organización.
- Visión compartida por toda la organización.
- Empleados con autoridad y responsabilidad para actuar en apoyo de estos objetivos clave del negocio.
- Conocimientos prácticos en la gestión del cambio a disposición de toda la organización para facilitar un cambio drástico.
- Mejora continua.
- Habilidades extendidas en la gestión de proyectos que permitan a los distintos equipos de PQM manejar los calendarios, costes y planes de trabajo que estén siendo coordinados e implantados en toda la organización.
- Promoción por la dirección ejecutiva de la importancia, impacto y éxito del esfuerzo de PQM en toda la organización y ante los grupos de interés.
- Es obligación de la alta dirección el posibilitar y promocionar tres objetivos principales: enfoque en el cliente, orientación al proceso y apoderamiento de los empleados a todos los niveles.

Los líderes de aquellas organizaciones que han adoptado PQM como herramienta de gestión saben que la gestión de la calidad de los procesos es un enfoque de gestión permanente, no un suceso único o un arreglo rápido. También saben que un enfoque constante en los procesos de empresa es esencial para el éxito a largo plazo de su organización.

REFERENCIAS

- AT&T Quality Steering Committee (1988). *Process Quality Management & Improvement Guidelines*, AT&T Information Center, Indianapolis, IN.
- Black, John (1985). *Business Process Analysis—Guide to Total Quality*, Boeing Commercial Airplane Company, Seattle, WA, revised 1987.
- Byrne, John A. (1993). «The Horizontal Corporation», *Business Week*, Dec. 20, pp. 76-81.
- Dumaine, Brian (1989). «How Managers Can Succeed Through Speed», *Fortune*, Feb. 13, pp. 54-60.
- Garvin, David A. (1995). «Leveraging Processes for Strategic Advantage», *Harvard Business Review*, Sept./Oct., vol. 73, no. 5, pp. 77-90.
- Gibson, Michael J. W. (1991-92). «The Quality Process: Business Process Quality Management», *International Manufacturing Strategy Resource Book*, pp. 167-179.
- Gibson, Michael J. W., Gabriel, A., and Riley, James F., Jr. (1990). *Managing Business Process Quality (MBPQ)*, 1st ed., Juran Institute, Inc., Wilton, CT.
- Hall, Gene, Rosenthal, Jim, and Wade, Judy (1993). «How to Make Reengineering Really Work», *Harvard Business Review*, Nov./Dec., vol. 71, no. 6, pp. 99-130.
- Hammer, Michael, and Champy, James (1993). *Reengineering the Corporation*, Harper Collins, New York.
- Hardaker, Maurice, and Ward, Bryan K. (1987). «Getting Things Done: How to Make a Team Work», *Harvard Business Review*, Nov./Dec., vol. 65, pp. 112-119.
- Kane, Edward J. (1986). «IBM's Focus on the Business Process», *Quality Progress*, April, p. 26.
- Kane, Edward J. (1992). «Process Management Methodology Brings Uniformity to DBS», *Quality Progress*, June, vol. 25, no. 6, pp. 41-46.
- Kaplan, Robert S., and Norton, David P. (1992). «The Balanced Scorecard—Measures that Drive Performance», *Harvard Business Review*, Jan./Feb., vol. 7, no. 1, pp. 71-79, reprint #92105.
- Pall, Gabriel A. (1987). *Quality Process Management*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ.
- Riley, James F., Jr. (1989). *Executive Quality Focus: Discussion Leader's Guide*, Science Research Associates, Inc., Chicago.
- Riley, James F., Jr., Pall, Gabriel A., and Harshbarger, Richard W. (1994). *Reengineering Processes for Competitive Advantage: Business Process Quality Management (BPQM)*, 2nd ed., Juran Institute, Inc., Wilton, CT.
- Rummler, Geary (1992). «Managing the White Space: The Work of Geary Rummler», *Training and Development*, Special Report, August, pp. 26-30.
- Schlesiona, Peter (1988). *Business Process Management*, Science Research Associates, Inc., Chicago.
- Zachman, James W. (1990). «Developing and Executing Business Strategies Using Process Quality Management», *IMPRO Conference Proceedings*, Juran Institute, Wilton, CT., pp. 2a-9-21.

Capítulo 9

MEDICIÓN, INFORMACIÓN Y TOMA DE DECISIONES

Thomas C. Redman

INTRODUCCIÓN	9.1	La calidad de los datos y fiabilidad de las mediciones	9.13
Los gestores necesitan información	9.1	Lista de verificación	9.14
Los sistemas de medición	9.2	JERARQUÍAS DE LAS MEDICIONES	9.16
Sobre este capítulo	9.4	Mediciones objetivas <i>versus</i> subjetivas	9.16
LOS SISTEMAS DE MEDICIÓN Y SUS ELEMENTOS	9.5	Sistemas de sistemas	9.16
Toma de decisiones/actuación ..	9.5	Intuición del gestor	9.16
Entendimiento del entorno	9.6	COMIENZO Y EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS DE MEDICIÓN ...	9.16
Planificación de mediciones	9.8	RESUMEN DE PRINCIPIOS	9.17
Recopilación de datos	9.11	REFERENCIAS	9.18
Analizar, sintetizar, formular resultados y presentar resultados y recomendaciones	9.11		

INTRODUCCIÓN

Los gestores necesitan información. El líder del negocio y los gestores de calidad comparten un lamento eterno inicialmente expresado por Alejandro Magno: «¡Datos, datos, datos! Estoy rodeado de datos. ¿No puede alguien conseguirme la información que realmente necesito?». Alejandro necesitaba respuestas a algunas de las más básicas preguntas. «¿Dónde está el enemigo? ¿Qué dimensiones tienen sus tropas? ¿Con cuánto valor lucharán? ¿Cuándo llegarán nuestros suministros?». Sus espías, lugartenientes y otros recogieron datos. Pero ellos no siempre pudieron satisfacer la necesidad de información que tenía Alejandro.

El actual gestor de un negocio también tiene un apetito voraz por la información (véase también Drucker 1995). Obtener la información que necesita consume mucho tiempo, es caro y lleno de complicaciones. Y finalmente, al gestor se le informa a menudo menos que a Alejandro Magno. Preguntas básicas como «¿Qué quieren realmente los clientes? ¿Hasta qué punto conocemos sus necesidades? ¿Cuál será el próximo movimiento de nuestro competidor?», no son fáciles de contestar. Esto, a pesar de la asombrosa proliferación de dispositivos de medición, inspección de clientes, métodos estadísticos y bancos de datos conectados a redes informáticas. En este punto, la dirección de calidad es un viaje sin final, y además de ser una labor de aprendizaje en obtención, clasificación, síntesis y entendimiento de todos los datos e información que podrían ser aprovechados, parece que el apetito de información de los gestores nunca se satisfará.

Los sistemas de medición. Normalmente se considera que la información esclarece decisiones que los gerentes deben tomar y las acciones que deben emprender. La información juega un papel similar en la ciencia. El método científico es esencialmente un proceso por el que se proponen las hipótesis, se diseñan experimentos para someter a prueba aspectos de dichas hipótesis, se recopilan datos y se analizan. Conforme evolucionan estas hipótesis, serán descartadas o modificadas. Se aplican patrones rígidos con su tiempo de pruebas. La mayoría de los negocios no pueden permitirse el lujo del rigor requerido. El sistema de medición presentado aquí es paralelo al método científico, pero los patrones son diferentes. «Precaución» es el lema en la ciencia. «Éxito» es el lema en el negocio (véase el Capítulo 47 para una referencia extensa al método científico y de diseño de experimentos).

En algunos casos, al gestor se le presentan varias opciones bien definidas. Un ejemplo simple es la pregunta «¿Está el proceso controlado?». El gerente puede decidir que el proceso está controlado y no emprender ninguna acción, o decidir que el proceso no está controlado y pasar a la acción para encontrar y eliminar la causa especial que lo provoca (véase el Capítulo 4, «El proceso de control de la calidad»). En otras situaciones, las opciones están mal definidas y/o mal delimitadas. En muchos casos (quizás demasiados), el gestor puede incluso optar por recopilar más datos. En casi todos los casos, aparece como un axioma que cuanto mejor es la información, mejor será la decisión. Aquí *mejor información* podría tener varios atributos, incluyendo más completa, más exacta, más apropiada, más actual, de una fuente más fiable, más precisa, organizada en una forma más convincente, presentada en un formato más llamativo, y así sucesivamente.

Un paso crítico para obtener la información necesaria es la medición. Medir es «calcular, estimar, o determinar la magnitud, dimensiones o capacidad, especialmente para ciertas reglas o patrones» (Webster 1979). La medición, entonces, implica la recolección de datos como materia prima. Para muchos tipos de mediciones han aumentado los campos especializados y hay un considerable cuerpo de expertos en toma de mediciones. Dos de esas tareas son los ensayos químicos y tests de preferencias de los consumidores. La recogida de datos puede implicar métodos menos formales, como investigación en biblioteca, obtención de datos recogidos para otros propósitos, conversaciones con clientes y similares. Para nuestros propósitos, tales datos pueden ser considerados mediciones.

Por supuesto que hay más que desarrollar para dar al director la información que necesita que simplemente la recopilación de datos (de hecho, en eso consiste el lamento de Alejandro). Como ejemplos citamos «más relevantes» y «presentados en un formato más llamativo» como atributos de una buena información. Es evidente que la elección de lo que se va a medir y el análisis, síntesis y presentación de la información resultante son tan importantes como el hecho de la propia medición. La información de calidad sólo es el resultado de un calibre de calidad y un plan conjunto de diseño, recopilación de datos y análisis/síntesis/presentación. De esta forma distinguimos entre el *acto de medir*, o recopilación de los datos, y la *medición elaborada*, que incluye diseño, recopilación de los datos y análisis/síntesis/presentación. Este proceso se presenta en la Figura 9.1 y se describe a través de este capítulo.

Pero una buena información no es una decisión. Así, la Figura 9.1 va más allá. El proceso de medición es precedido por un paso «Entendimiento del entorno» y seguido por otro paso «Toma de decisiones/actuación». Estos pasos sitúan el proceso de medición en el contexto apropiado y representan a los proveedores y clientes del proceso de medición. Finalmente, la Figura 9.1 descubre un importante aspecto que va más allá. Los que toman las decisiones en la mayoría de las organizaciones están a menudo demasiado ocupados para considerar de forma cuidadosa todos los datos y evaluar las alternativas. Lo que ellos requieren son recomendaciones, no sólo información claramente presentada. Así, el paso análisis/síntesis/presentación estaría mejor descrito como análisis/síntesis/recomendaciones/presentación de resultados y recomendaciones. Se podría argumentar que la formulación de resultados se elabora mejor, incluso, como parte de la toma de decisiones. Pero es muy frecuente esperar que esos datos analizados sirvan para hacer las recomendaciones. De hecho, se podrían solicitar a los que toman las decisiones para aprobar sus recomendaciones.

Aunque discutible, tomar decisiones es, a menudo, un proceso político complejo en sí mismo. Así, el contexto en el que se produce la información es crítico. En altos niveles, el marco define el contexto global en el que se tomarán las decisiones, incluyendo consideraciones tales como las metas de negocio de la organización, su posición competitiva y sus recursos disponibles; los requisitos del cliente; las metas y prejuicios de los que toman las decisiones, y cualquier restricción pertinente durante el proceso de medición o la toma de decisiones. Para cualquier decisión particular, el marco incluye las consecuencias específicas de seguir esa dirección. Tomados juntos estos cinco elementos (marco, diseño, recopilación de datos, análisis/síntesis/recomendaciones/presentación y decisión/acción), todos componen un «sistema de medición».

A la larga, la meta es ayudar a la organización a tomar de forma consecuente mejores decisiones y mejores acciones. Aquí se definen las *mejores decisiones* en términos de resultados en la consecución de objetivos de la organización. Los buenos sistemas de medición apoyan los objetivos de la organización, que no es poco (Kaplan y Norton 1992, 1993; Meyer 1994). Suele ocurrir que «lo que se puede medir se puede gestionar». La mayoría de las organizaciones intentan perseguir gran variedad de metas, satisfaciendo a los clientes, proporcionando un saludable y motivador lugar de trabajo, cumpliendo con los objetivos financieros, y así sucesivamente. Entre otras muchas, la dimensión financiera es la que está mejor desarrollada y desplegada. No es sorprendente que las consideraciones financieras dominen la toma de decisiones en tales organizaciones (Eccles 1991).

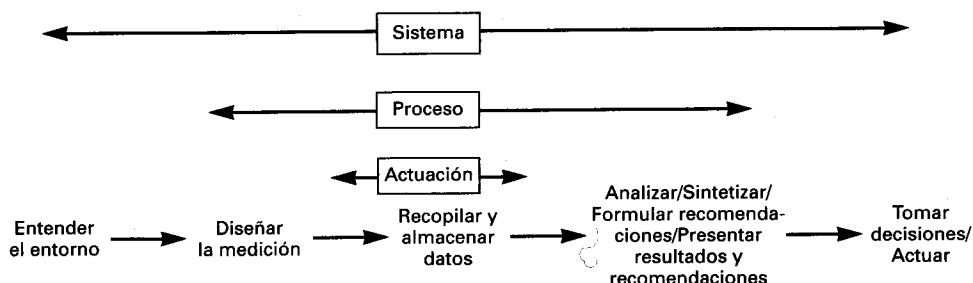


FIGURA 9.1 El acto de medir sólo es un paso en un amplio sistema de medición. Aquí consideraremos que el proceso de medición consiste en los pasos necesarios para recopilar datos y presentar resultados. Un sistema de medición más amplio también abarca las decisiones tomadas y el contexto en el que el proceso opera.

El punto más importante de este capítulo es que aquellos que definen y operan en un proceso de medición (por ejemplo, aquellos que recogen o analizan los datos o quienes recomiendan lo que la organización debe hacer) deben considerar el sistema, incluso el medio en que opera, en su conjunto. No es suficiente ser técnicamente excelente o poseer uno o dos elementos para ser excelente (véase Futrell 1994 para una revisión de los fracasos en el reconocimiento de lo que satisface al cliente). La efectividad global está tan determinada por el modo en que los elementos se relacionen entre sí y con otros sistemas en la empresa como por la excelencia en cualquier área. La siguiente anécdota personal ilustra este punto.

En los inicios de mi carrera se me pidió que recomendara el terminal de gráficos a color que nuestra sección debería comprar. Gasté mucho tiempo y esfuerzo en el proceso de medición. Hablé con varios usuarios sobre sus necesidades, llamé a varios vendedores, concerté algunas demostraciones y leí la literatura pertinente. En ese momento (al comienzo de los años ochenta), la tecnología subyacente era incipiente, lo que conllevaba muchos problemas y un terminal costaba aproximadamente 15.000\$. Además, muchas personas anticipaban una dramática e inminente mejora de la tecnología y una sustanciosa reducción del precio. Así que recomendé que se esperara un año y entonces reconsideráramos la compra. Yo estaba orgulloso de mi trabajo y de la recomendación y lo presenté a mi gerente. Él me informó rápidamente que yo había entendido mal su pregunta. La pregunta no era «¿Debemos comprar un terminal?», sino «¿Qué terminal debemos comprar?» (y «ninguno» no era una respuesta admisible). Mirando atrás, pude haber definido explícitamente las posibles decisiones ya tomadas o haber pensado en el contexto. Mi gerente era un pensador que se anticipaba. Él había visto el potencial para la informática personal y claramente quería experimentar. Incluso una consideración casual de sus objetivos me habría aclarado que «esperar un año» era una recomendación inaplicable.

Sobre este capítulo. El público al que se dirige en primer lugar es a personas interesadas en ayudar a sus organizaciones a tomar bien las decisiones. Ya he destacado que obtener la información pertinente puede consumir mucho tiempo, ser caro y estar cargado de dificultad. Por otro lado, hay muchas prácticas rentables que todos podemos tomar para reducir la distancia entre la información deseada y la información de la que se dispone.

Los lectores pueden tener varios intereses:

- Aquellos para los que mediciones y procesos de decisión están bien definidos, pueden estar especialmente interesados en comparar sus procesos con los «ideales» descritos aquí.
- Aquellos que toman mediciones y/o decisiones rutinariamente pero cuyos procesos son *ad hoc*, pueden estar interesados sobre todo en aplicar las técnicas de dirección del proceso para mejorar sus mediciones y decisiones.
- Aquellos cuyos intereses se centran en solo un «proyecto», pueden interesarse con especial atención en el aprendizaje de los pasos que su proyecto debe seguir.

Este capítulo no considera muchos detalles técnicos. Se han escrito volúmenes con detalles técnicos sobre toma de mediciones (véanse Finkelstein y Leaning 1984 y Roberts 1979, por ejemplo), análisis estadístico (véanse, por ejemplo, los Capítulos 4, 44, 45 y 47 de este Manual), la representación gráfica de los datos, y similares.

En la próxima sección consideramos los sistemas de medición con mayor detalle. Se definen rendimientos de cada paso y las actividades necesarias para producir esos rendimientos que se describen. Por tanto, consideramos los sistemas de medición más complejos, con jerarquías de medidas. La cuarta sección proporciona consejos prácticos para empezar y desarrollar un sistema de medición. La última sección resume las buenas prácticas en una lista del «Los diez principios del sistema de medición».

Para ilustrar los puntos principales, se usan tres ejemplos de complejidad escalonada. En el llamado «nivel operativo», consideramos el sistema de medición de una sola complejidad

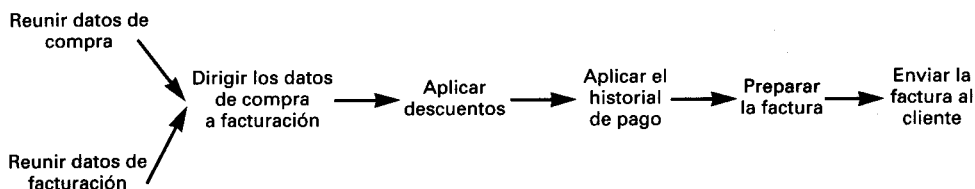


Figura 9.2 Un hipotético proceso de facturación.

para el proceso de facturación, resumido en la Figura 9.2. En el «nivel táctico», consideramos el sistema de medición necesario para apoyar los cambios asociados a las facturas (el resultado del proceso de facturación). También consideramos los sistemas de medición que son necesarios para apoyar las decisiones estratégicas. Virtualmente todos estamos envueltos, de alguna u otra manera, en los tres niveles de toma de decisiones.

Un mando intermedio se puede encontrar jugando los papeles siguientes:

- Diseñador del sistema de medición a nivel operativo.
- Responsable de la toma de decisiones a nivel táctico.
- Proveedor de datos para decisiones estratégicas.

LOS SISTEMAS DE MEDICIÓN Y SUS ELEMENTOS

La Figura 9.3 amplía el contenido de la Figura 9.1 de dos maneras: lista los resultados producidos a cada paso y describe las actividades de trabajo con más detalle. Los primeros dos pasos (entendimiento del marco y planificación de la medición) modelan los pasos. No hay ningún sustituto de una planificación cuidadosa, así que la mayoría de las discusiones se centran en la planificación. Los resultados más importantes del sistema son decisiones y acciones. Otros resultados se orientan a mejorar decisiones y acciones. Por lo que empezamos la discusión con el paso final: toma de decisiones/actuación.

Toma de decisiones/actuación. El primer paso en la definición de un sistema de medición es entender quién tomará las decisiones y cómo. Muchas decisiones, y sobre todo todas las decisiones con consecuencias, no son tomadas por un individuo, sino por un comité u otro grupo. En algunos casos esto ayuda a estructurar el apoyo para su implantación. En otros es más un vehículo para difundir la responsabilidad. Algunos grupos deciden por la regla de la mayoría; otros por consenso. La mayoría de los grupos tienen algunos individuos clave. Algunos son los líderes pensantes; otros, dominantes-amenazadores. Pocos decisores son completamente imparciales; la mayoría tiene intereses, por lo menos hasta cierto punto, en sus carreras. Los individuos toman decisiones intuitivamente basadas en diferentes criterios. Algunos asumen riesgos; otros sienten aversión al riesgo. Algunos sólo consideran el impacto financiero de fin de trimestre; otros el largo plazo. Y aquellos que cargan con la responsabilidad de la implantación tienen otras perspectivas. Así, tomar decisiones es también un proceso político en el que el diseñador del sistema de medición se asesora bien para entenderlo al completo.

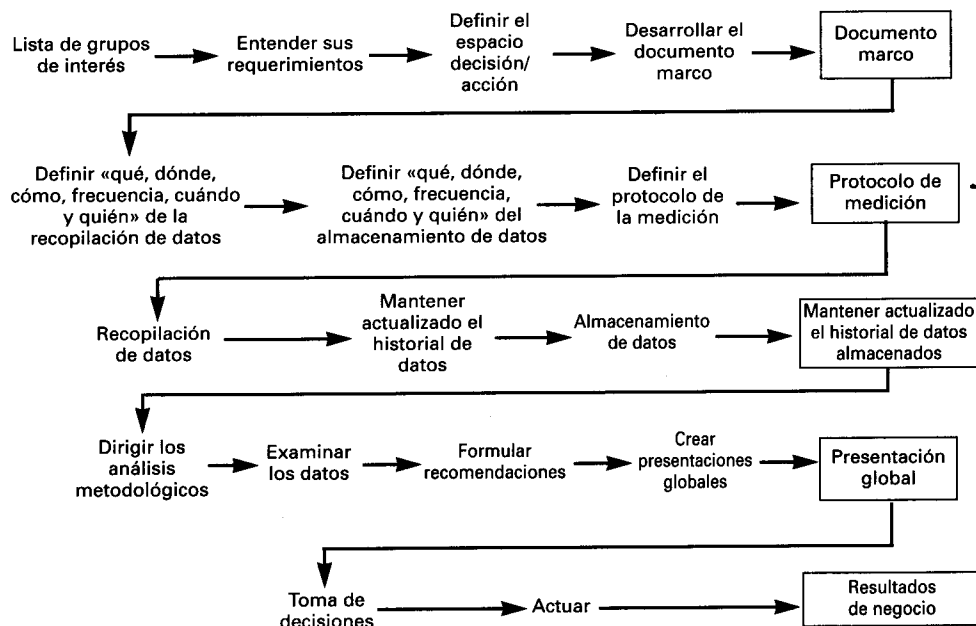


FIGURA 9.3 Detalle de los subprocesos del sistema de medición. Para cada subproceso se da el resultado del trabajo principal y varios pasos.

Entendimiento del entorno. Antes de determinar qué medir y cómo medirlo, es importante entender el contexto global en que opera el sistema de medida. Ya hemos apuntado la naturaleza política de la toma de decisiones. Los que toman decisiones y emprenden acciones son miembros de organizaciones y todas las organizaciones tienen su propia política y cultura que definen las direcciones aceptables, los riesgos, las conductas y las políticas que deben seguirse. Estos rasgos de la organización forman parte del entorno o marco para el sistema de medición. Los buenos sistemas de medición normalmente se desarrollan en concordancia con la cultura de la organización. Pero también son capaces de señalar la necesidad de cambios fundamentales en la cultura.

Definir el marco es algo parecido al análisis que hace el corredor de apuestas, pero en la planificación estratégica. Los corredores de apuestas incluyen por lo menos tres grupos: clientes, dueños (y quizás la sociedad) y empleados. Cada uno tiene válidas, y a veces en conflicto, metas para la organización. Estas impactan sobre el modelo de negocio de la organización y a su vez sobre el sistema de medición. Consideremos cada vez uno (véase Figura 9.4).

1. **Clientes.** Una meta de la mayoría de las organizaciones es mantener y mejorar la satisfacción del cliente, su fidelización y lealtad. Normalmente se exponen las necesidades del cliente como condiciones subjetivas. A nivel operativo, un consumidor puede querer simplemente que «la factura esté correcta». A nivel táctico, un requisito importante puede ser que la factura alimente el sistema de pago de facturas del cliente. Finalmente, a nivel estratégico, los clientes comerciales pueden querer establecer fuentes únicas de suministro con las compañías en las que ellos confían. Es importante reconocer que hay un elemento de subjetividad en cada requisito del cliente. Los técnicos a menudo se desaniman por la falta de habilidad de los clientes para exponer los requisitos claros, objetivos. Pero los clientes y sus habilidades de comunicación son explícitamente parte del contexto global.

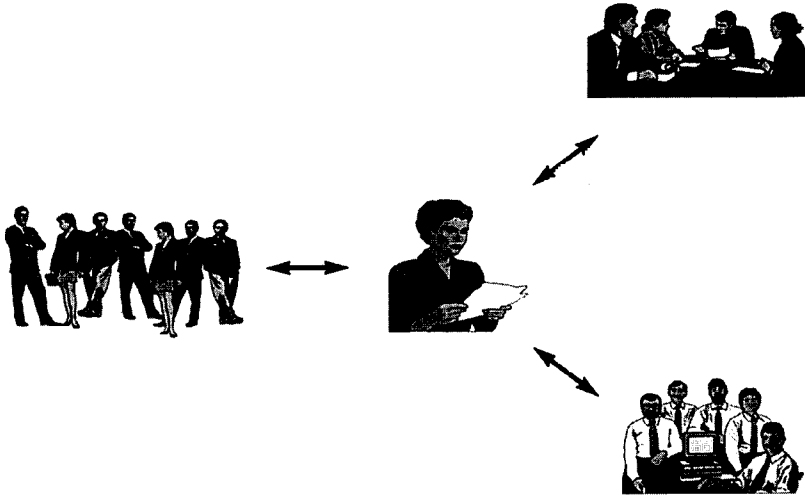


FIGURA 9.4 El sistema de medición está influenciado por prácticamente todos los sistemas internos de una organización, que a su vez se ven influenciados por dicho sistema de medición.

2. *Los propietarios.* Los propietarios del negocio normalmente se preocupan menos por las consideraciones diarias que por la viabilidad económica del negocio, tanto a corto plazo como a largo. Sus intereses se reflejan en la dirección corporativa, posición competitiva y la actuación financiera. Normalmente desean, implícitamente por lo menos, ver que los costes se mantienen en los niveles más bajos.

El impacto de sus intereses en el sistema de medición radica en que ciertas cosas son más importantes de medir que otras. Considere una compañía que desea seguir una estrategia de liderazgo en precio. Desea ser percibido como «tan bueno» como su mayor competidor, pero quiere mantener los costes de subsistencias tan bajos como sea posible. Esta compañía diseñará su sistema de medición en torno a la inteligencia competitiva. Por ejemplo, no invertirá en «aprender de los clientes» los formatos de factura preferidos por ellos. Por el contrario, una compañía que da valor y trato al cliente diseñará su sistema de medición para aprender más sobre ellos, cómo utilizar los productos y servicios de la organización y cómo utilizar estas mediciones en la prevención de los defectos. Invertirá en cómo hacer de sus facturas una ventaja competitiva.

3. *Los empleados.* En la medida en que nos conciernen los sistemas de medición, los empleados son los corredores de apuestas, porque ellos dependen de la organización para su sustento. Muchos son también corredores de apuestas porque toman decisiones y emprenden acciones; otros porque recopilan los datos, y así sucesivamente. Los empleados pueden ver el sistema de medición como un dispositivo de mando por parte de la dirección, pero los buenos sistemas de medición también confieren poder. En nuestro ejemplo operativo, el que toma las decisiones día a día podría ser el dueño de la función principal, el dueño del proceso de facturación o incluso el gerente del producto. Puede haber buenas razones para ser el dueño-local del proceso, la habilidad requerida, la unión de reglas para ser el que toma las decisiones. Pero normalmente es preferible que las decisiones se tomen tan cerca de la acción como sea posible. Así, a menos que haya una razón presionando por otra parte, el dueño de la función principal es el que preferiblemente tomará la decisión. Por el contrario, los sistemas de medición malos requieren mucho tiempo adicional y son de valor dudoso.

Un segundo aspecto del marco de entendimiento implica la gama de posibles decisiones y acciones. Una lista de tales decisiones y acciones se llama el «espacio de decisión/acción». En algunos casos crear esta lista es un ejercicio honrado y en otros es casi imposible. Al nivel más bajo u operativo es posible describir completamente el espacio de decisión. Así, en nuestro primer ejemplo, hay sólo unas pocas posibles decisiones:

- El proceso está controlado y se desarrolla a un nivel aceptable y se puede dejar así.
- El proceso está fuera de control y debe controlarse.
- El proceso está controlado pero no se desarrolla a un nivel aceptable. Debe mejorarse.

A niveles tácticos y estratégicos, el ejercicio de definir el espacio de decisión/acción se pone más difícil. El rango de posibles decisiones puede ser enorme, muchas decisiones posibles pueden ser de antemano difíciles de especificar y algunas decisiones pueden ser enormemente complejas. En nuestro segundo ejemplo (táctico), una posible decisión es dejar la factura como está. Pero la factura también puede mejorarse, posiblemente en un número casi ilimitado de formas. Hay un número creciente de mejoras en cuanto al formato y códigos de contabilidad. O la factura puede rediseñarse totalmente. Una factura en papel puede reemplazarse con una electrónica, por ejemplo. Finalmente, la factura incluso puede reemplazarse con una factura mejor basada en el comercio electrónico por Internet.

La experiencia sugiere que cuanto más cuidadosamente se defina el espacio de decisión/acción, mejores serán las decisiones resultantes. Esto se cumple tanto a nivel estratégico como a nivel operativo.

Desafortunadamente, no hay plantillas modelo para definir el marco. Pueden ser pertinentes otras consideraciones. Como ejemplos, las obligaciones legales, las normas de seguridad o las limitaciones técnicas pueden ser muy importantes.

Documento marco. El resultado final debe ser un documento sobre el contexto que contenga todos los puntos principales señalados hasta aquí. Debería describir metas y estrategias comerciales y requisitos del cliente, definir el espacio de decisión/acción y los responsables de tomar decisiones (por el nombre en algunos casos, por la clasificación del trabajo en otros), anotar las restricciones importantes (financieras y otras) y referenciar detalladamente los planes comerciales y requisitos del cliente. Y conforme el negocio crece y cambia, así también el documento marco.

Planificación de mediciones. Una vez que el proyectista entiende el espacio de decisión y el marco en el que el sistema de medición opera, queda elaborada la programación de los pasos restantes del proceso. El resultado de este paso es un «protocolo de medición», un documento que describe «qué, cuándo, dónde, cómo y la frecuencia» de la recopilación de datos, almacenamiento y diseño del análisis. Quizá pretenciosamente, el protocolo también debería describir «quién» (quién es el responsable de cada uno de los pasos). La Figura 9.5 refleja el alcance que debe cubrirse. Los problemas más importantes que deben tratarse se discuten más adelante.

Recopilación de datos: lo que se mide. Anteriormente se anotaba que la mayoría de los requisitos del cliente se exponían como condiciones subjetivas. Estos requisitos tienen que ser traducidos a medidas objetivas. Un buen ejemplo se tiene en los primeros momentos de la telefonía. El requisito más básico de los clientes era «oír y ser oído». Un número casi ilimitado de problemas puede frustrar este requisito básico. Y salvo el sonido emitido hacia la boquilla y el que emana del auricular, una llamada telefónica se transporta eléctricamente. Una serie notable de experimentos ayudaron a determinar que tres parámetros, la pérdida, ruido y eco, cada uno mensurable en cualquier circuito del teléfono o porción del mismo, determinan si el cliente puede oír y ser oído (Cavanaugh, Hatch y Sullivan 1976; AT&T 1982).

	Recopilación de datos	Almacenamiento de datos	Análisis, síntesis, presentación de recomendaciones
Qué			
Dónde			
Cuándo			
Cómo			
Frecuencia			
Quién			

FIGURA 9.5 Elementos que deben definirse en un protocolo de medición.

En años recientes, el despliegue de la función calidad (Hauser y Clausing 1988) ha demostrado ser una herramienta inestimable para ayudar a traducir los requisitos subjetivos del usuario en criterios objetivos para el desarrollo del proceso. La Figura 9.6 ilustra un escenario ideal en el que el requisito del usuario para una «factura correcta» es traducido en un número pequeño de parámetros objetivos, que se traducen en los requisitos de cada paso en el proceso de facturación.

Naturalmente, muchos requisitos nunca se prestarán a una medición objetiva. Nuestro segundo ejemplo, el que implica los cambios sobre un conjunto de características, es un mero ejemplo. Aquí las fuentes primarias de datos serán investigaciones sobre la satisfacción del cliente, la retroalimentación del cliente, las características observadas de los competidores y perspectivas de innovaciones tecnológicas.

En algunos casos está bastante claro lo que nos gustaría medir, pero simplemente no puede medirse. Una historia famosa relata la vulnerabilidad a los disparos enemigos en los aviones de la Segunda Guerra Mundial. El objetivo era tener el mayor número de aviones que hubieran completado sus misiones y regresado a salvo. Y a uno le gustaría determinar dónde fueron abatidos los aviones que no volvieron. Pero no se podía disponer de esos datos. Era necesario suplantar correctamente las mediciones. El problema con la aviación de la Segunda Guerra Mundial se solventó examinando dónde fueron disparados otros aviones que regresaron y asumir que aquellos que no volvían eran abatidos en otra parte.

En casi todos los casos, son posibles, literalmente, docenas de posibles mediciones. El proyectista normalmente se aconseja bien para seleccionar algunas medidas «críticas». Demasiadas mediciones pueden agobiar el sistema de medición. El proyectista debe listar las

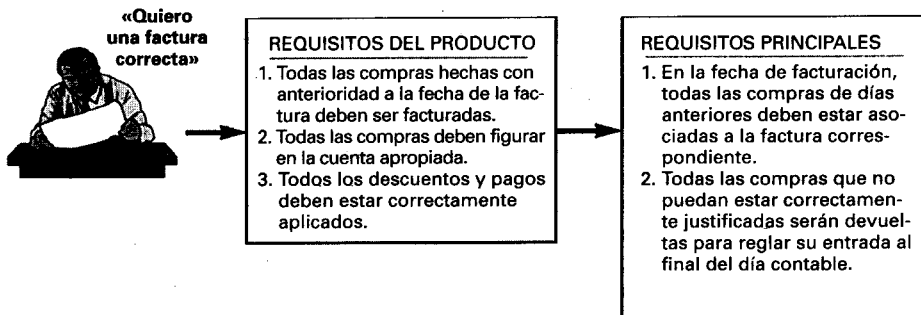


FIGURA 9.6 Los requisitos del cliente suelen ser subjetivos. Necesitan ser traducidos a parámetros mensurables objetivos. Aquí se hace para el requisito «Quiero una factura correcta» y la fase principal del proceso de facturación.

posibles mediciones y ordenarlas por prioridades. Habrá unas pocas esenciales que se deban seleccionar. Sólo deben admitirse, en caso de necesidad, otras mediciones. La referencia al marco normalmente es muy útil para hacer la selección necesaria.

Muchos proyectistas entran en una trampa concentrándose en conseguir unas buenas mediciones en cada paso de un proceso y no prestar la atención suficiente a la medición global. Hay una lógica común que, en facturas por ejemplo, si cada paso se realiza correctamente, entonces el proceso global se realizará correctamente. Desgraciadamente esta lógica no es siempre correcta. Pueden surgir demasiados problemas entre los pasos donde la responsabilidad no esté clara. Se hace necesaria una medición global de la corrección de la factura y mediciones de lo que es correcto en cada paso. Los principios sobre dirección de un proceso se tratan en el Capítulo 6.

Son esenciales las definiciones precisas de lo que es mensurable, porque algunos cambios insignificantes en la definición pueden producir resultados muy diferentes, un hecho que los publicistas pueden aprovechar (véase Schlesinger 1988 como ejemplo).

Recopilación de datos: dónde. El proyectista debe determinar simultáneamente dónde hacer las mediciones. En la dirección de calidad, la evolución habitual es desde la inspección hasta el final de un proceso de producción para la medición del desarrollo del proceso. Los sistemas inmaduros ponen el mayor peso en la inspección; los más maduros, en las mediciones internas del proceso (véase Ishikawa 1990).

Recopilación de datos: cuándo, cómo, con qué frecuencia. En algunos casos no se recogen datos nuevos, sino que se utilizan los existentes en las «cuentas de cliente» u otros bancos de datos. El proyectista todavía se hace aconsejar para conocer las peculiaridades de la recopilación de datos, ya que los datos recogidos para un propósito no tienen por qué satisfacer cualquier otro.

El proyectista seguidamente especifica cómo, cuándo y la frecuencia con que deben hacerse las mediciones. Cada una debe desggranarse al detalle. «Cómo» no sólo se refiere a cómo se hace esa medida en particular, sino también cómo se equilibra y mantiene el equipo de medida y cómo se obtienen los datos precisos. El «cuándo» y la «frecuencia» deben establecerse para asegurar que haya datos suficientes disponibles. El lector interesado puede dirigirse a los Capítulos 44, 45 y 47.

Acceso y almacenamiento de datos. Quizás no hay nada más frustrante que descubrir que «los datos que están en el ordenador» son inaccesibles. Los proyectistas, con demasiada frecuencia, no prestan la suficiente atención a esta actividad ni al almacenamiento de datos, y la recuperación se vuelve el talón de Aquiles del sistema. Lo que es suficiente para darse cuenta de que, a pesar de la explosión en tecnología de los bancos de datos, especialmente en la facilidad de uso, el almacenamiento de los datos y recuperación no son asuntos fáciles y deben planearse cuidadosamente.

Análisis de datos, síntesis, recomendaciones y presentación. Finalmente, el proyectista debe considerar el análisis, síntesis, formulación de recomendaciones y la fase de la presentación. Mientras que los análisis externos no pueden planificarse, algunos básicos sí se deberían. Así, en nuestro ejemplo operativo, la suma de un punto a un gráfico de control a intervalos especificados debería planificarse de antemano.

Quién. Igual de importante que el qué, dónde, cuándo y cómo es el quién. Quién recoge los datos, quién los almacena, quién traza los puntos en los gráficos de control, quién observa los datos desde otras perspectivas. Todo debe especificarse.

El protocolo de medición. El fin de este paso es un protocolo de la medición que documenta la planificación para la recopilación de los datos y el almacenamiento, análisis/síntesis y presentación. En efecto, el protocolo de la medición define los subprocesos que se

seguirán en los pasos siguientes. Los protocolos escritos aparecen corrientemente en fabricación, servicios y en el cuidado de la salud. En muchas otras áreas, particularmente las áreas de servicio, los protocolos escritos son menos comunes. Esta práctica es mala y peligrosa. Deben escribirse protocolos y deben circular sin trabas por aquellos que deben seguirlos. Hay simplemente demasiadas formas de interpretar y/o desviar las instrucciones verbales. El protocolo debe conservarse con cuidado. Como muchos documentos útiles, éste estará en constante revisión.

Recopilación de datos. Cuando todo va bien, la recopilación de datos no es más que seguir el protocolo de la medición. Que todo vaya bien parece ser la excepción en vez de la regla; sin embargo, por esta razón, esas tomas de mediciones deben mantenerse registradas cuidadosamente. La buena costumbre de mantener los registros es importante. Los registros deben guardarse incluso cuando la calibración y procedimientos de medida van según lo planificado. Es muy importante que cualquier excepción se documente cuidadosamente. Un tópico, la calidad de los datos, merece una atención especial (véanse también Redman 1996 y Capítulo 34). Desgraciadamente, las mediciones de los aparatos no se hacen siempre según lo planificado. Por ejemplo, los operadores pueden repetir las mediciones cuando los valores están fuera de rango. O los analistas de datos pueden anular valores sospechosos. Descubrir y corregir los datos erróneos pasa por muchos nombres: el depurado de datos, limpieza de datos, revisión de datos, y así sucesivamente. Es mejor descubrir y corregir las lecturas conforme se van haciendo, y no después. Y, naturalmente, es mejor controlar la recopilación de los datos para prevenir errores en el primer momento. Pero dondequiera que se recojan los errores, deben registrarse los cambios en los datos cuidadosamente.

Los protocolos para los sistemas tácticos y estratégicos requieren a menudo examinar la literatura que sirve de ayuda en conferencias profesionales, discusión con consultores, etc. Cuando se recopilan los datos de este modo, es importante que se documenten las fuentes. Lo mejor es determinar las fuentes originales.

Analizar, sintetizar, formular resultados y presentar resultados y recomendaciones. Una vez que se han recogido los datos, deben resumirse y presentarse en un formato que sea entendible para los que toman las decisiones. Este paso se llama a menudo «análisis de datos». Pero ese término es un nombre equivocado. «Análisis» se define como «separar o romper un todo en sus partes para averiguar su naturaleza, la proporción, la función, la relación, etcétera». El análisis es completamente esencial, pero es sólo un cuarto de la actividad requerida. Los otros tres cuartos son la «síntesis», la «formulación de resultados» y la «presentación». La síntesis es «la composición; el reunir dos o más cosas para formar un todo: opuesto al análisis». Los secuaces de Alejandro (y muchos otros) parecen no haber oído hablar de síntesis. Luego se desarrollan las «recomendaciones» específicas para decidir/ actuar. Finalmente, la presentación implica poner los resultados más importantes y recomendaciones en un formato fácilmente entendible.

En general, utilizamos el término «análisis» para englobar los conceptos de análisis, síntesis, formulación de resultados y presentación. Hay cuatro pasos:

- Completar el análisis planificado.
- Análisis de exploración de los datos (cuando sea oportuno).
- Formulación de resultados y recomendaciones.
- Presentación de resultados y recomendaciones.

Para el ejemplo de las operaciones, el análisis planificado de los datos y su presentación no implica más que computar un promedio y los límites de control y anotarlos junto con las líneas de requisitos en un gráfico. Dicho gráfico se presenta en la Figura 9.7. Por su simplicidad, el gráfico de control es ideal:

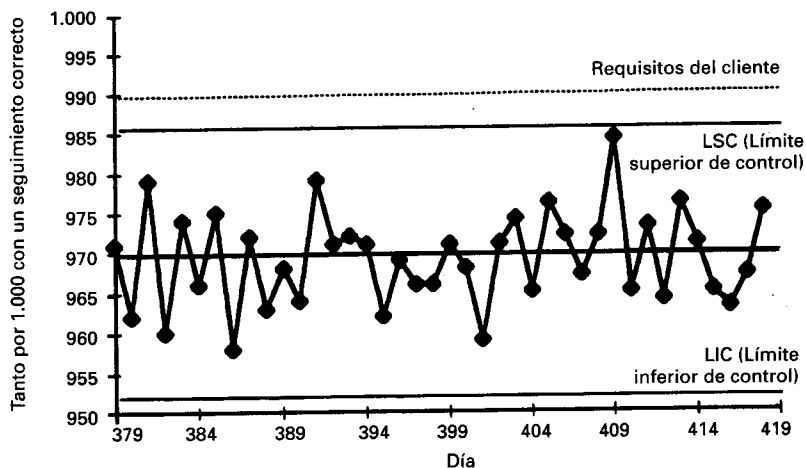


FIGURA 9.7 El gráfico de control es posiblemente la mejor herramienta de presentación en gestión de calidad.

1. Prescribe la decisión apropiada para el gestor.
2. Es gráfico (y la mayoría de las personas interpreta los gráficos muy fácilmente) y atrae visualmente.
3. Es fácil de crear, ya que no requiere un cálculo extenso (a esto se debe su mayor utilidad a pie de fábrica).
4. Otorga autoridad a aquellos que lo crean o lo usan.
5. Y quizás lo más importante: el gráfico de control mantiene una base para predecir el futuro, no simplemente explicando el pasado. Y el resultado global de la toma de decisiones es provocar un impacto positivo en el futuro.

Desgraciadamente, en situaciones tácticas y estratégicas, este paso no es tan simple. Ya hemos admitido que deben planificarse muchos análisis de antemano. El tiempo también debería repartirse para la exploración de los datos (también llamado análisis de datos, análisis de exploración de los datos, visualización de datos, etc.). A menudo hay «tesoros ocultos» esperando ser descubiertos. De hecho, los avances en bases de datos y tecnologías de exploración de gráficos pueden aumentar la habilidad de cualquier organización para explorar los datos. Cada vez más, todos los datos están disponibles, incluso los detalles de todas las transacciones y operaciones del cliente. El elemento más crítico, sin embargo, no son las herramientas, sino las personas insistentes que disfrutan del trabajo de investigación necesario para descubrir los tesoros.

El fin de este paso es una «presentación global», que podría ser nada más que el gráfico de control. Las nuevas herramientas también permiten que cada organización pueda presentar los resultados con claridad, de forma entendible y atractiva para cada una de ellas. La experiencia sugiere que una buena presentación sea:

- *Comprensible.* La presentación cubre los puntos de vista de los agentes pertinentes. Es, a todos los efectos, «un cuadro de mando integral» (Kaplan y Norton 1992; Eccles 1991).
- *Presentado por fases.* Se presentan resúmenes de alto nivel que cubran el asunto en una apreciación global y capas de detalle adicionales disponibles, si son necesarias.

- *Gráficos.* Casi todos preferimos los resúmenes gráficos bien concebidos a otras formas de presentación [véanse Tukey (1976), Tufte (1983) y Chambers et al. (1983) para buenos ejemplos y prácticas].
- *Correcta e imparcial.*
- *Concreta en lo importante.* Las recomendaciones deben ser específicas y claras.

Se puede concluir con una cita: «También se encuentra que el despliegue de datos comunes, cuando se aplica cuidadosamente, es a menudo suficiente para incluso análisis complejos...» (Hoaglin y Velleman 1995).

La calidad de los datos y fiabilidad de las mediciones. Claramente, las decisiones no son mejores que los datos en los que se basan. Y un programa de calidad de los datos puede ayudar a asegurar que esos datos sean de la más alta calidad posible. Un componente de un programa de calidad de los datos es la fiabilidad de las mediciones. El NIST (National Institute of Standard and Technology) define un programa de aseguramiento de medidas como «un programa de aseguramiento de calidad para un proceso de medición que cuantifica la incertidumbre total de las medidas (ambos, azar y componentes sistemáticos de error) con respecto a normas nacionales u otras y demuestra que la incertidumbre total es suficientemente pequeña como para reunir los requisitos del usuario» (Carey 1994, citando Belanger 1984). Otras definiciones (Eisenhart 1969; Speitel 1982) extendieron, redujeron o reorientaron esta definición ligera. Todas las definiciones reconocen explícitamente que «la recopilación de los datos», como se usa aquí, es generalmente en sí mismo un proceso repetible. Así, es aplicable el amplio rango de métodos de calidad. Claramente, la fiabilidad de las medidas es un componente de un buen sistema de medición.

Pero el programa de calidad de datos debe extenderse al sistema entero, no sólo en la recopilación de datos. El sistema de medición puede adulterarse en cualquier punto, no sólo en la recopilación de datos. Hay que considerar lo fácil que es para un gestor tomar una decisión inapropiada. La Figura 9.8 ilustra de manera simple una situación ya clásica. Hay que resaltar que el gráfico de control indica un proceso estable que está satisfaciendo las necesidades del cliente claramente. Sin embargo, un gerente inexperto, en el punto indicado en el gráfico, anotaría

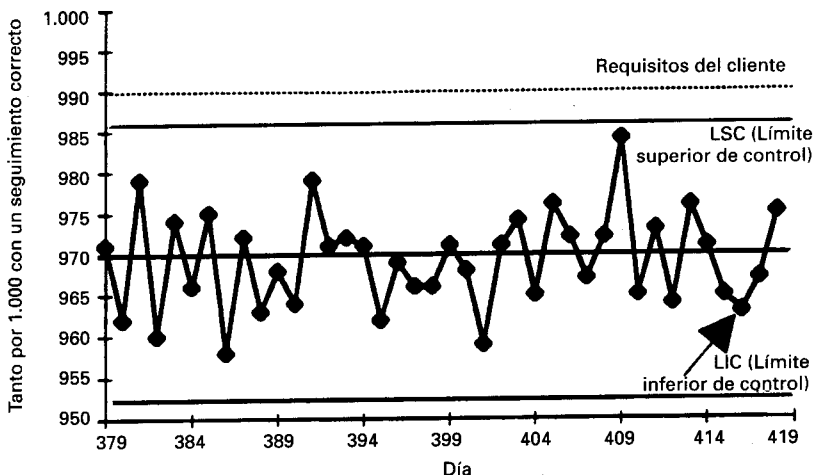


FIGURA 9.8 Gráfico de control mal interpretado. En el punto 417, el gestor demasiado entusiasta ve evidencias de disminución del rendimiento.

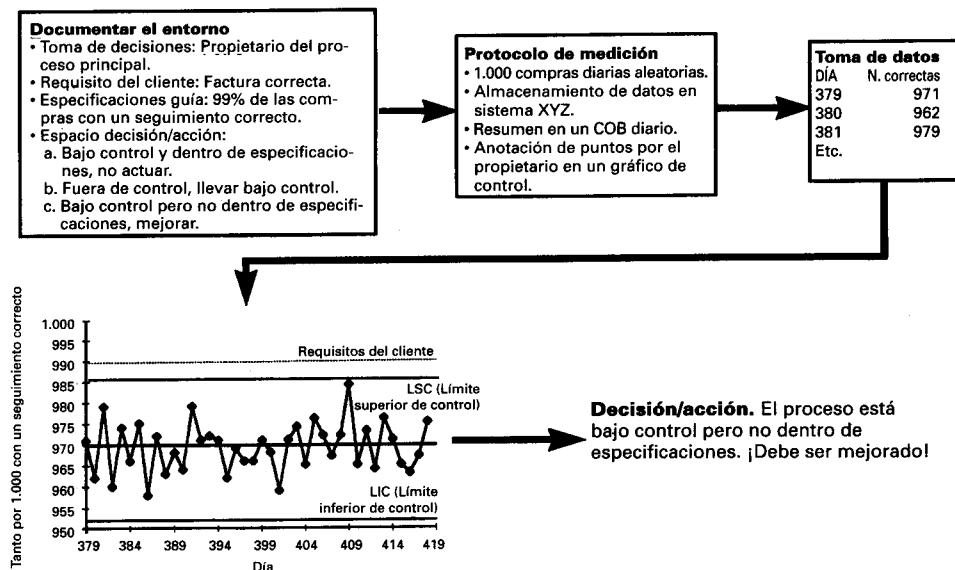


FIGURA 9.9 Resumen de la mayor parte de los elementos de un sistema de medición en sus fases principales.

«desviaciones del rendimiento en los tres períodos previos». El gestor puede decidir que es necesaria la acción correctiva y llevarla a cabo, aunque no haya ninguna indicación. Dicho gestor es un «entrometido». A menos que, con suerte, lo peor para él o ella pueda ser gastar tiempo y dinero. En el peor de los casos, él o ella provocan que el proceso se des controle con la consecuente disminución del rendimiento.

En muchas organizaciones es muy común la «gestión de las mediciones, no del proceso». Gestores departamentales que son instados a reducir sus costes de viaje pueden mover fácilmente dichos costes a sus presupuestos de formación, por ejemplo. En los buenos sistemas de medición, el programa de aseguramiento de mediciones ayuda a que todos los componentes estén planificados.

Lista de verificación. La Figura 9.9 resume los elementos de un buen sistema de medición para el ejemplo de facturación. El proyectista, moviéndose de izquierda a derecha en la figura, define primero el espacio de decisión/acción. Luego define el contexto global, que consiste en tres componentes: los requisitos globales del cliente y los requisitos específicos en un paso, la opción del operador como decisor y como entendedor de los gráficos de control, y el reparto del presupuesto para el control de calidad en este tipo de líneas de ensamblaje. El protocolo de medición especifica el programa de recopilación de datos y su consonancia con la unión de nuevos datos. El gráfico de control es el vehículo de la presentación.

Para concluir esta sección, la Figura 9.10 presenta una lista de verificación para el planificador o proyectista de un sistema de medición, que puede usarse para planificar, evaluar o mejorar un sistema. No todos los puntos de la lista dada tienen la misma importancia en todos los sistemas.

LISTA DE VERIFICACIÓN DEL PROYECTISTA**Tomar decisiones/actuar**

- ¿Está el espacio de decisión/acción especificado lo más claro posible?
- Las acciones planificadas, ¿son consecuentes con la decisión y los datos que llevan a ello?

Marco de definición

- Los requisitos del cliente, ¿están claramente definidos?
- Los requisitos de los dueños, ¿están claramente definidos?
- Los requisitos del empleado, ¿están claramente definidos?
- ¿Están identificados el resto de agentes importantes? ¿Sus requisitos se definen claramente?
- ¿Están nombrados los que toman las decisiones?
- ¿Está el marco documentado?

Planificar las mediciones

- Existen planes claros para tomar mediciones, incluyendo:
 - ¿Qué será medido?
 - ¿Cuándo serán hechas las mediciones?
 - ¿Dónde se toman las mediciones?
 - ¿Cómo se hacen las mediciones, incluso las rutinas de la calibración, la revisión de los datos, y cómo se usa un historial de mediciones?
 - ¿Con qué frecuencia se toman las mediciones?
 - ¿Quién es el responsable de la medición, incluso de la calibración?
- Existen planes claros de almacenamiento de datos, incluyendo:
 - ¿Qué datos serán guardados?
 - ¿Cuándo serán guardados?
 - ¿Dónde se guardarán?
 - ¿Cómo se terminará el almacenamiento?
 - ¿Con qué frecuencia se guardarán los datos? ¿Con qué frecuencia se hará copia de seguridad de los datos?
 - ¿Quién es el responsable del almacenamiento y gestión de los datos?
- Se planifican claramente el análisis y la presentación de datos, incluyendo:
 - ¿Qué análisis se planifica?
 - ¿Cuándo se planifican análisis dirigidos?
 - ¿Qué conllevan los análisis dirigidos? (por ejemplo, los análisis medioambientales).
 - ¿Cómo se llevan a cabo los análisis planificados?
 - ¿Con qué frecuencia se harán análisis rutinarios?
 - ¿Quién dirige los análisis planificados?
- ¿Está escrito el protocolo de la medición?
- ¿Están familiarizados con el protocolo los que realizan las mediciones?
- ¿Está el protocolo sometido a una gestión de los cambios?

Recopilar y almacenar los datos

- ¿Se sigue el protocolo de la medición?
- ¿Los planes de recopilación de datos, contienen datos de la más alta calidad?
- ¿Se mantiene actualizado un historial de medidas excepcionales?

Análisis, síntesis, presentación de resultados

- ¿Se sigue el protocolo de la medición?
- ¿Se hacen presentaciones claras y entendibles?
- ¿Se presentan los resultados de una manera comprensiva y correcta?
- ¿Se reparte el tiempo adecuadamente para la exploración de los datos?

El programa de calidad de datos

- ¿Es comprensible el programa de calidad de datos? ¿Cubre todos los aspectos del sistema de medición?
- ¿Está documentado el programa de calidad de datos?

FIGURA 9.10 Lista de verificación para un diseñador de un sistema de medición.

JERARQUÍAS DE LAS MEDICIONES

Mediciones objetivas versus subjetivas. Los textos de ciencia, gestión y estadística a menudo exaltan las virtudes de la medición objetiva, hechos con escala, por encima de las «opiniones» subjetivas, especialmente aquellos de variación «Sí/No». Las razones son simples: las opiniones son imprecisas y susceptibles de cambios.

Aun con estas desventajas, las mediciones subjetivas tienen ciertas ventajas que no deben desperdiciarse. Por encima de todo, la opinión del cliente es el último árbitro en la gestión de la calidad. En segundo lugar, siempre hay requisitos que los clientes no pueden declarar en términos objetivos. Un requisito del cliente bastante típico es: «Quiero confiar en mis proveedores». «Confianza» no se traduce fácilmente en términos objetivos. Claro que el cliente puede dar ejemplos que ilustren cómo un proveedor puede ganar la confianza, pero estos ejemplos no forman una base sólida para un sistema de medición. Finalmente, hay una riqueza de emociones en opinión del cliente que no se traduce bien en parámetros objetivos. Si el cliente que discute la confianza agrega: «Si este componente crítico falla, nuestro producto fallará. Si eso pasara perderíamos clientes y trabajos». No puede haber errores en cuanto a las prioridades de este cliente y el sentido de urgencia asociado con tales componentes.

Aunque todavía se hace necesario hacer mediciones objetivas, el diseñador del sistema de medición también debe trabajar para asegurar que todos oímos «la voz del cliente» (Davis 1987).

Sistemas de sistemas. Hasta ahora se han tratado ejemplos operativos, tácticos y estratégicos como si ellos fueran independientes entre sí. Obviamente, éste no es el caso. Con suerte, mediciones hechas al más bajo nivel pueden ser integradas en las mediciones del más alto nivel, y las mediciones del nivel más alto proporcionan el contexto (marco) que ayuda a integrar las mediciones del nivel más bajo. Llamamos a esta propiedad «integrabilidad». El requisito del cliente para una «factura correcta» debería conllevar las medidas globales del rendimiento del proceso de facturación y del rendimiento de cada paso. Es posible lograr un cierto grado de integrabilidad. Pero, en un sentido práctico, la integrabilidad es más difícil que lo que uno podría esperar, incluso con mediciones financieras.

Intuición del gestor. Los sistemas de medición sólo pueden tener hasta ahora a un gestor. Ni siquiera los sistemas de medición más buenos pueden eliminar todo el riesgo de la toma de decisiones. Y Lloyd Nelson se dio cuenta de que «las figuras más importantes son desconocidas e impenetrables» (Deming 1986). Las tradiciones corporativas han hecho a un líder furiosamente independiente que desafía los números para llevar la organización hacia una trayectoria nueva y de éxito (aunque sospecho que muchas organizaciones durante largo tiempo han desaparecido debido a decisiones similares). La decisión de Morita de invertir en Walkman es un ejemplo famoso de semejante tradición. Claramente, hay muchas ocasiones en las que se debe asumir la intuición de los que toman las decisiones. Los gestores y las organizaciones deben reconocer esta situación. Ciertamente se prefieren las decisiones apoyadas en datos, pero las organizaciones no deben solicitar que todas las decisiones se apoyen totalmente en éstos. El peligro de que una oportunidad pase o una crisis potencial crezca escalonadamente, mientras gestores diligentes buscan los datos para apoyar una directriz clara, es verdaderamente demasiado grande. Las organizaciones deben apoyar a gestores individuales que asuman riesgos prudentes. Y los gestores individuales deberían entrenar su intuición.

COMIENZO Y EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS DE MEDICIÓN

Cuando las organizaciones son adaptables, lo son también sus sistemas. Los sistemas de medición deben estar de entre los más adaptables. De forma cotidiana, son ingredientes del funcio-

namiento de la organización a todos los niveles. Esto no es suficiente para que los sistemas de medición se mantengan al corriente de los cambios. También deben anunciar la necesidad de cambios fundamentales. En esta sección proporcionamos algún consejo práctico para comenzar y desarrollar los sistemas de medición:

1. Normalmente es mejor incluirlo en el sistema existente que intentar empezar desde el principio. Todas las organizaciones existentes han integrado los sistemas de medición. Incluso en los inicios se tienen sistemas financieros rudimentarios. Así que uno casi nunca empieza con una «hoja de papel en blanco». Los cambios de negocio fundamentales requerirán nuevos tipos de mediciones (de hecho, la revolución de la calidad obligó a muchas organizaciones a extender su enfoque para incluir a los clientes), pero sólo eliminarán, raramente, mediciones establecidas o prácticas de medición. Además, en tiempos de grandes cambios, el sistema de medición es un viejo amigo con el que puede contarse para proporcionar un cierto grado de seguridad.
2. Experimentar con nuevas mediciones, análisis y presentaciones. Aprender lo que otros están haciendo e incorporar las mejores ideas a nuestro sistema.
3. El prototipo. Es difícil introducir nuevas mediciones. Hacer prototipos ayuda a separar las ideas buenas de las malas, proporciona un ambiente en el que los detalles técnicos pueden resolverse con seguridad, y da a las personas el tiempo necesario para aprender cómo usarlos.
4. Eliminar activamente mediciones que ya no son útiles. Esto puede ser muy difícil en algunas organizaciones. Pero ya indicamos que los buenos sistemas de medición no son opresivos. De forma similar, se ha señalado la necesidad de crear nuevas mediciones. Así que aquellos que han sobrevivido a su utilidad deben eliminarse.
5. Esperar los conflictos. En la sección anterior se comentó que, normalmente, no es posible integrar totalmente mediciones. Los conflictos surgirán. Correctamente aprovechados, son una fuente de buenas ideas para adaptar un sistema de medición.
6. Entrenar activamente a las personas sobre las nuevas mediciones, su significado y cómo usarlas.

RESUMEN DE PRINCIPIOS

Concluimos este capítulo con «Los diez principios de un sistema de medición»:

1. Manejar la medición como un sistema global, incluyendo sus relaciones con otros sistemas de la organización.
2. Entender quién toma las decisiones y cómo se realizan.
3. Tomar decisiones y realizar mediciones tan cerca de las actividades implicadas como sea posible.
4. Seleccionar un programa metódico de mediciones y asegurar que cubre lo que hay «entre las funciones».
5. Definir de antemano los planes para el almacenamiento de los datos y análisis/síntesis/recomendaciones/presentaciones.
6. Buscar la simplicidad en la medición, la recomendación y la presentación.
7. Definir y documentar el protocolo de medición y el programa de calidad de los datos.
8. Desarrollar y mejorar continuamente el sistema de medición.
9. Ayudar a los que toman las decisiones a aprender a gestionar sus procesos y áreas de responsabilidad en lugar del sistema de medición.
10. Reconocer que todos los sistemas de medición tienen limitaciones.

RECONOCIMIENTOS

El autor desea agradecer a Anany Levitin, de la Universidad de Villanova, y Charles Redman, de Nashville, TN, cuyos comentarios sobre el borrador de este capítulo lo llevó a una mejora sustancial.

REFERENCIAS

- AT&T Engineering and Operations in the Bell System. Members of Technical Staff, AT&T Bell Laboratories (1982), Holmdel, NJ.
- Belanger, B. (1984). *Measurement Assurance Programs: Part 1: General Introduction*. National Bureau of Standards, NBS Special Publication 676-1, Washington, D.C.
- Carey, M. B. (1994). «Measurement Assurance: Role of Statistics and Support: from International Statistical Standards». *International Statistical Review*, vol. 61, pp. 27-40.
- Cavanaugh, J. R., R. W. Hatch, and J. L. Sullivan (1976). «Models for the Subjective Effects of Loss, Noise and Talker Echo on Telephone Connections». *Bell System Technical Journal*, vol. 55, November, pp. 1319-1371.
- Chambers, J. M., W. S. Cleveland, B. Kleiner, and P. A. Tukey (1983). *Graphical Methods for Data Analysis*. Wadsworth International Group, Belmont, CA.
- Davis, S. M. (1987). *Future Perfect*. Addison-Wesley, Reading, MA.
- Deming, W. E. (1986). *Out of the Crisis*. Massachusetts Institute of Technology Center for Advanced Engineering Study, Cambridge, MA.
- Drucker, P. F. (1995). «The Information Executives Truly Need». *Harvard Business Review*, vol. 73, no. 1, January-February, pp. 54-63.
- Eccles, R. G. (1991). «The Performance Measurement Manifesto». *Harvard Business Review*, vol. 69, no. 1, January-February, pp. 131-137.
- Eisenhart, C. (1969). «Realistic Evaluation of the Precision and Accuracy of Instrument Calibration Systems», in Ku, H. K. (ed.). *Precision Measurements and Calibration—Statistical Concepts and Procedures*. National Bureau of Standards, NBS Special Publication 330-1, Washington, D.C.
- Finkelstein, L., and M. S. Leaning (1984). «A review of fundamental concepts of measurement». *Measurement*, vol. 2, January-March, pp. 25-34.
- Futrell, D. (1994). «Ten Reasons Why Surveys Fail», *Quality Progress*, vol. 27, April, pp. 65-69.
- Hauser, R., and D. Clausing (1988). «The House of Quality». *Harvard Business Review*, vol. 66, no. 3, May-June, pp. 17-23.
- Hoaglin, D. C., and P. F. Velleman (1995). «A Critical Look at Some Analyses of Major League Baseball Salaries». *The American Statistician*, vol. 49, August, pp. 277-285.
- Ishikawa, K. (1990). *Introduction to Quality Control*. 3A Corporation, Tokyo.
- Kaplan, R. S., and D. P. Norton (1992). «The Balanced Scorecard—Measures that Drive Performance». *Harvard Business Review*, vol. 70, no. 1, January-February, pp. 71-79.
- Kaplan, R. S., and D. P. Norton (1993). «Putting the Balanced Scorecard to Work». *Harvard Business Review*, vol. 71, no. 5, September-October, pp. 134-149.
- Meyer, C. (1994). «How the Right Measures Help Teams Excel». *Harvard Business Review*, vol. 72, no. 3, May-June, pp. 95-103.
- Redman, T. C. (1996). *Data Quality for the Information Age*. Artech, Norwood, MA.
- Roberts, F. S. (1979). *Measurement Theory with Applications to Decisionmaking, Utility and the Social Sciences*. Addison-Wesley, Reading, MA.
- Schlesinger, J. M. (1988). «Ford's Claims About Quality Show Difficulty of Identifying Top Autos». *Wall Street Journal*, March 14.
- Speitel, K. F. (1982). «Measurement Assurance», in G. Salvendy, *Handbook of Industrial Engineering*. Wiley, New York.
- Tufte, E. R. (1983). *The Visual Display of Quantitative Information*. Graphics Press, Cheshire, CT.
- Tukey, J. W. (1976). *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley, Reading, MA.
- Webster (1979). *Webster's New Twentieth Century Dictionary*, 2nd ed. William Collins Publishers, Simon & Schuster, New York.

Capítulo 12

BENCHMARKING

Robert C. Camp e Irving J. DeToro

INTRODUCCIÓN	12.2	Externas	12.9
Benchmarking: definición	12.2	Originales	12.9
Objetivos del benchmarking	12.2	PASO 3B: ORGANIZAR LA VISITA DE INSPECCIÓN	12.9
FUNDAMENTOS DEL BENCHMARKING	12.3	PASO 4: ANALIZAR LA BRECHA EN LOS RESULTADOS	12.10
Prácticas y niveles de resultados	12.3	PASO 5: NIVELES DE RESULTADOS DEL PROYECTO	12.13
EL PROCESO DE BENCHMARKING EN DIEZ PASOS	12.3	PASO 6: COMUNICAR LOS HALLAZGOS	12.14
Fase 1: Planificación	12.4	Decidir quién necesita saberlo ..	12.14
Fase 2: Análisis	12.4	Seleccionar el mejor vehículo de presentación	12.14
Fase 3: Integración	12.5	Organizar los hallazgos	12.14
Fase 4: Acción	12.5	Presentar las recomendaciones ..	12.14
Fase 5: Madurez	12.5	PASO 7: ESTABLECER LAS METAS FUNCIONALES	12.15
Desencadenantes del benchmarking	12.5	Revisar las metas operativas ...	12.15
Equipos de benchmarking	12.5	Analizar el impacto sobre otros ..	12.15
PASO 1: QUÉ EMULAR	12.6	Asegurar la aprobación de la dirección	12.15
Documentación	12.6	PASO 8: DESARROLLAR EL PLAN DE ACCIÓN	12.16
PASO 2: A QUIÉN EMULAR	12.7	Fijar las prioridades para la implantación	12.16
Benchmarking interno	12.7	Mostrar las revisiones de la brecha en los resultados	12.18
Benchmarking competitivo	12.7		
Benchmarking funcional y líderes de clase mundial	12.7		
Coparticipación	12.8		
PASO 3A: RECOGIDA DE DATOS ..	12.8		
Internas	12.8		

Desarrollar planes de acción ... 12.18

PASO 9: IMPLANTAR EL PLAN Y CONTROLAR LOS RESULTADOS 12.18

PASO 10: RECALIBRAR LOS BENCHMARKS 12.20

FACTORES DE ÉXITO Y CONSIDERACIONES DE LA DIRECCIÓN ... 12.21

Beneficios en el comportamiento 12.22

Competitividad 12.22

REFERENCIAS 12.22

Este capítulo define el benchmarking* y esboza los diez pasos del proceso de benchmarking, tal como se desarrolla en Camp (1989 y 1994). Resume las actividades de los equipos típicos de benchmarking, incluyendo sus objetivos, tareas y responsabilidades.

INTRODUCCIÓN

«Benchmarking» es el término nuevo del campo de la calidad más candente y menos comprendido. Xerox lo hace. Ford lo hace. GTE, AT&T, DEC, TI, duPont, HP, J&J, IBM y Motorola lo hacen. ¿Qué es exactamente?

El benchmarking es una investigación y una experiencia formativa continuas. Asegura que se descubren, adoptan e implantan las mejores prácticas. El benchmarking es un proceso de investigación industrial que permite a los directivos realizar comparaciones entre empresas de los procesos y prácticas para identificar «lo mejor de lo mejor» y alcanzar un nivel de superioridad o una ventaja competitiva.

El benchmarking es un método de establecer las metas de resultados y los proyectos de mejora de la calidad basándose en las mejores prácticas del sector. Es una de las más excitantes herramientas nuevas del campo de la calidad. Buscar y emular al mejor puede estimular la motivación de todos los implicados, produciendo a menudo resultados espectaculares.

La palabra japonesa *dantotsu* —esforzarse por ser el mejor de los mejores— abarca la esencia del benchmarking. Es un proceso positivo, proactivo para cambiar las operaciones de un modo estructurado y conseguir unos resultados superiores. El objetivo del benchmarking es conseguir la ventaja competitiva.

Benchmarking: definición. La definición precisa de benchmarking es «El proceso continuo de medir productos, servicios y prácticas frente a los más duros competidores de la empresa o frente a aquellas empresas reputadas como líderes del sector» (Camp 1994).

Objetivos del benchmarking. El propósito del benchmarking se deriva principalmente de la necesidad de establecer metas creíbles y perseguir la mejora continua. Se trata de un proceso para fijar la orientación, pero más aún, es un medio mediante el cual se descubren y comprenden las prácticas necesarias para alcanzar las nuevas metas.

El benchmarking legitima las metas basadas en una orientación externa, en vez de extra-polarlas de prácticas internas y tendencias pasadas. Dado que el entorno externo cambia tan

* El sustantivo *benchmarking* y el verbo *benchmark* se traducen por emulación y emular, respectivamente. Aunque se ha mantenido en general «benchmarking», dado su uso generalizado, se usan los vocablos españoles cuando resulta más conveniente (*Nota del traductor*).

rápidamente, la fijación de metas, enfocadas internamente, fallan con frecuencia en su intento de satisfacer las expectativas de los clientes respecto de sus proveedores.

Las expectativas de los clientes se rigen por las normas fijadas por los mejores proveedores del sector, así como por experiencias con proveedores de otros sectores. Por ello, el beneficio último del benchmarking consiste en ayudar a conseguir los niveles de resultados de liderazgo que satisfagan completamente las siempre crecientes expectativas de los clientes.

El benchmarking es un ingrediente importante de la planificación estratégica y la mejora operativa. Para seguir siendo competitivas, las estrategias a largo plazo requieren que las organizaciones se adapten continuamente al mercado cambiante. Para potenciar y motivar a su personal, una organización debe:

- Establecer que existe la necesidad de cambio.
- Identificar lo que se debe cambiar.
- Crear una imagen del aspecto que habrá de ofrecer la organización después del cambio.

El benchmarking consigue los tres puntos. Al identificar brechas entre la organización y la competencia, el benchmarking establece que existe una necesidad. Al ayudar a entender cómo hacen las cosas los líderes del sector, el benchmarking ayuda a identificar qué se debe cambiar. Y al mostrar qué es posible y qué han hecho otras empresas, el benchmarking crea una imagen del aspecto que presentará la organización después del cambio.

FUNDAMENTOS DEL BENCHMARKING

Embarcarse en una actividad de benchmarking requiere la aceptación de los principios básicos siguientes:

- Conocer la operación. Evaluar los puntos fuertes y los puntos débiles. Esto deberá implicar la documentación de las prácticas y pasos del proceso del trabajo, así como una definición de las medidas de resultados críticos utilizadas.
- Conocer a los competidores y líderes del sector. Sólo se distinguen las capacidades si se conocen los puntos fuertes y los puntos débiles de los líderes.
- Incorporar lo mejor y llegar a una posición superior. Adaptar e integrar estas mejores prácticas para conseguir una posición de liderazgo.

Prácticas y niveles de resultados. El benchmarking se puede dividir en dos partes: prácticas y niveles de resultados. Por experiencia, la mayoría de los directivos comprende ahora que deben centrarse primero en las mejores prácticas del sector. Los niveles de resultados que resultan de estas prácticas se pueden analizar y sintetizar más tarde. Habiendo identificado las mejores prácticas de varias empresas, las lecciones aprendidas se pueden integrar para crear procesos de trabajo de nivel mundial. En esta etapa se pueden determinar los resultados esperados de estos procesos de trabajo, de modo que se puedan proporcionar niveles de servicio superiores al mejor de los competidores.

Cuando se está preparando el benchmarking, es importante involucrar a la directiva ejecutiva, para que se entiendan y acepten los hallazgos y den como resultado un compromiso para emprender acciones. Esto requiere una implicación concertada de la directiva y comunicaciones cuidadosamente diseñadas a la organización que debe implantar los planes de acción.

EL PROCESO DE BENCHMARKING EN DIEZ PASOS

El proceso de diez pasos para dirigir una investigación de benchmarking consta de las cinco fases esenciales siguientes (véase Figura 12.1).

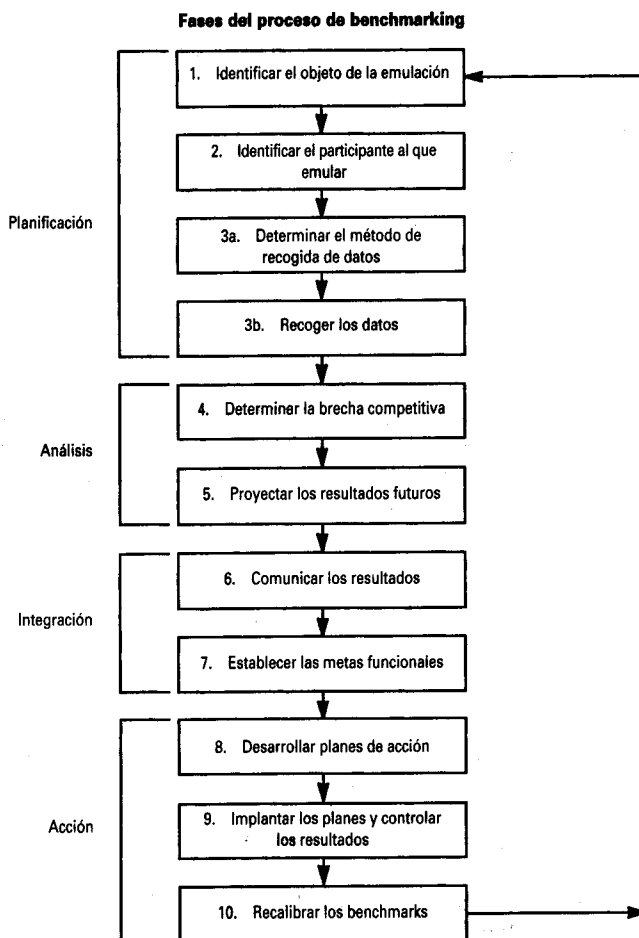


FIGURA 12.1 Los diez pasos del proceso formal del benchmarking (*Quality Resources, a division of The Kraus Organization Limited, White Plains, NY, a través de ASQC Quarterly Press*).

Fase 1: Planificación

- Decidir qué emular. Todas las funciones tienen un producto o salida. Éstas son candidatas prioritarias al benchmark buscando oportunidades de mejora de los resultados.
- A quién emular. Empresas de liderazgo mundial o funciones con prácticas de trabajo superior, dondequiera que se hallen, son las comparaciones adecuadas.
- Planificar la investigación y dirigirla. Recoger fuentes de datos. Existe una amplia gama de fuentes, y una biblioteca de empresa es un buen punto de partida. Se puede solicitar una búsqueda electrónica de información publicada recientemente sobre un área de interés. Empezar a recogerla. Observar las mejores prácticas.

Fase 2: Análisis

- Es importante tener una comprensión total de los procesos internos del negocio antes de compararlos con los de organizaciones externas. Después de esto, examinar las mejores prácticas de otras organizaciones. Luego medir la brecha con ellas.

- Proyectar los niveles futuros de resultados. La comparación de los niveles de resultados proporciona una base objetiva sobre la que actuar y ayuda a determinar cómo conseguir una ventaja en resultados.

Fase 3: Integración

- Redefinir las metas e incorporarlas al proceso de planificación.
- Comunicar los hallazgos del benchmarking y ganar la aceptación de la alta dirección.
- Revisar las metas de los resultados.
- Recordar que la competencia no permanecerá quieta mientras las organizaciones mejoran. Por eso se necesitan metas que reflejen las mejoras proyectadas.
- Sobre la base de los hallazgos del benchmarking, se deberán integrar los objetivos y las estrategias dentro de los planes de la empresa y de las revisiones operativas, y se deberán actualizar cuando sea necesario.

Fase 4: Acción

- Las mejores prácticas se implantan y se recalibran periódicamente cuando sea necesario.
- Desarrollar e implantar los planes de acción.
- Controlar el progreso.
- Recalibrar los benchmarks.

Fase 5: Madurez

- Determinar cuándo se alcanza una posición de liderazgo. La madurez se consigue cuando se incorporan las mejores prácticas en todos los procesos de la empresa; cuando el benchmarking se ha convertido en una parte normalizada de la guía de trabajo, y cuando los niveles de resultados están mejorando continuamente hacia una posición de liderazgo. Evaluar el benchmarking como un proceso continuo.

Desencadenantes del benchmarking. Los hechos que provocan que se inicie un proyecto de benchmarking se inscriben habitualmente en uno de estos tres grupos: problema, innovación o política.

Problema. Si ocurre una crisis dentro de una organización, tal como un gran sobrecoste o la amenaza de un cliente importante de cancelar un contrato existente, puede quedar aparente el objeto de un proyecto de mejora.

Innovación. Si la organización se entera de algún proceso, tecnología o práctica innovadores empleado por otra organización, esta información puede muy bien causar que una organización encargue un estudio de benchmarking.

Política. Si la organización no tiene un problema significativo ni necesita entender una práctica innovadora, entonces puede resultar difícil seleccionar un proyecto de benchmarking. Esto es especialmente cierto en una organización que emplea una filosofía de gestión de calidad total (TQM). No obstante, un esfuerzo bien establecido de gestión de la calidad incluye un proceso de planificación estratégica. En organizaciones que integran dichos esfuerzos es habitual que una de las salidas del proceso de planificación sea una lista de selección de proyectos adecuados para benchmarking.

Equipos de benchmarking. El benchmarking lo realizan equipos compuestos por individuos con experiencia directa de las operaciones y conocimiento del proceso. Los miembros deberán poseer habilidades analíticas, de investigación, de documentación del proceso y de for-

mación de equipo. Estos requisitos favorecen a los candidatos con formación ingenieril o técnica y a los que tienen experiencia en investigación. Los equipos de benchmarking reciben normalmente el encargo del tutor del proceso. Los equipos rara vez funcionan eficazmente si se componen de más de 9 a 12 miembros. El tamaño de equipo preferido es el de 3 a 6 personas. Se pueden concebir equipos grandes, pero lo más probable es que se subdividan en pequeños grupos para hacer el trabajo.

PASO 1: QUÉ EMULAR

El primer paso al determinar qué emular es identificar el producto o salida del proceso o función de la empresa. Para esto es fundamental desarrollar una declaración de misión clara que detalle la razón de la existencia de la organización, incluyendo los resultados clave esperados por sus clientes y cruciales para cumplir la misión satisfactoriamente. Lo siguiente es descomponer los objetivos amplios de cada función en resultados específicos de los que hacer benchmarking. Se deberán documentar los resultados hasta el grado de detalle necesario para el análisis de las tareas clave, los traslados de información, mediciones tanto de los procesos intermedios como de los resultados finales, y los análisis de calidad, coste y entrega.

Un buen modo de determinar qué resultados necesitan más el benchmarking es formular una serie de preguntas que puedan revelar temas actuales a los que hace frente la función. Las preguntas se pueden centrar en la atención al cliente (incluido el servicio), en el coste o en la percepción de lo que ofrece el producto. Otro modo de identificar los resultados clave consiste en convertir los problemas, temas y retos a los que hace frente la función en declaraciones de problemas y entonces desarrollarlos en un diagrama de causa-efecto de Ishikawa. Las causas en el diagrama son candidatos al benchmarking.

El completar con éxito un proyecto de benchmarking depende de seleccionar un tema que valga la pena. No deberá ser demasiado amplio ni demasiado trivial, ni uno que no asegure una ventaja competitiva. Para evitar estos problemas, el tema deberá seleccionarse después de cierto análisis para cerciorarse de que los recursos de la organización se emplean justificadamente. El propósito del paso 1 es confirmar el tema ya seleccionado, reducir o ampliar el alcance de un proyecto, o seleccionar un tema que pueda contribuir mejor al éxito de la organización.

Si los recursos son limitados, se deberá pensar en mejorar lo antes posible un área del proceso, ya que si éste se mejora, puede tener un efecto beneficioso sobre todas las actividades subsiguientes.

Se deberá probar el acierto del proceso candidato formulando preguntas tales como: ¿Es esta área de la que más se quejan los clientes? ¿Son estas áreas con sobrecostes importantes las que necesitan atención? ¿Hay algo que si no se arregla inmediatamente afectará al mercado?

Documentación. El equipo debe describir cómo se desempeña en la actualidad el trabajo preparando gráficos de flujo detallados. Esto es esencial porque ayuda al equipo a alcanzar el consenso sobre cómo se efectúa el trabajo realmente, el tiempo que lleva realizarlo, el coste y los errores creados en el flujo normal del trabajo. Esta comprensión es esencial porque la comparación con un sistema superior no revelará deficiencias en el sistema en vigor a menos que tal comprensión y documentación existan.

Se deberá preparar una descripción breve, de dos o tres páginas, del proyecto de benchmarking y se hará circular entre los patrocinadores, directivos, grupos con intereses y otras partes interesadas. Este documento abarca todo lo que se ha especulado al seleccionar el proyecto, los recursos potenciales requeridos y los resultados esperados. A medida que se reúne más información y el equipo complete otros pasos del modelo de diez pasos del benchmarking, se podrá actualizar la descripción del modelo y usarlo como medio de tener informados a los patrocinadores.

PASO 2: A QUIÉN EMULAR

La dificultad estriba en identificar las empresas con un perfil de líder que verdaderamente tienen las mejores prácticas. Determinar a quién emular es un proceso de investigación que empieza por tomar en consideración, en términos amplios, a los competidores principales de la actividad y luego se extiende a las empresas líderes que no son competidoras. Aunque el proceso estriba en una comparación, la meta está en identificar y entender dónde las cosas hechas de manera diferente pueden producir resultados espectaculares.

Un enfoque de éxito abarca el benchmarking interno, el competitivo y el funcional. El benchmarking *interno* es la comparación de prácticas entre actividades similares dentro de una empresa. Un beneficio claro del benchmarking interno está en que obliga a documentar y permite la comparación fácil del proceso de trabajo para descubrir las mejores prácticas. El benchmarking *competitivo* es la comparación con los mejores competidores directos y sirve para evitar la complacencia. No obstante, es el benchmarking *funcional* —la comparación entre actividades funcionales, incluso en sectores distintos— el que contiene el mayor potencial para descubrir y estimular prácticas innovadoras.

Benchmarking interno. Dentro de cada organización existe otro departamento que puede estar realizando un trabajo idéntico o similar al del equipo de benchmarking. Si esto es así, entonces los primeros copartícipes del benchmarking pueden estar dentro de la propia organización. La formación técnica, por ejemplo, no es habitualmente la única actividad de formación dentro de la organización. Normalmente, existe también formación de directivos, formación en ventas, formación en manejo de informática, formación en diversidad y formación en tareas específicas.

Benchmarking competitivo. Los competidores del benchmarking son una parte esencial de cualquier comparación externa. Sin embargo, el benchmarking no es espionaje industrial, sino acopio de información industrial, y por ello son necesarias algunas precauciones para estudiar a la competencia de una manera ética y legal. Un sistema consiste en recoger información sin contactar directamente con el competidor. Existe tanta información de dominio público que puede ser posible determinar las mejores prácticas de un competidor sin tener que hablar directamente con él. Se habla de algunas de estas fuentes públicas en el paso 3, y en Camp (1994) se pueden encontrar técnicas detalladas de investigación.

Si es posible un intercambio directo de benchmarking con el competidor, la técnica para evitar problemas legales y éticos al comparar las mejores prácticas estriba en centrarse en la información del *proceso* y no en los datos de la empresa. Por ejemplo, es posible discutir el porcentaje de errores de facturación, el coste o el tiempo del ciclo por miles de facturas, o comparar los pasos del proceso o la tecnología informática empleada. No es adecuado preguntar o discutir el número de productos vendidos por factura, el valor de retorno de cada factura o el número de dichas facturas por período contable. El equipo de benchmarking deberá evitar preguntar por información que su propia organización no querría proporcionar.

Los competidores a veces reducen al mínimo las dificultades del benchmarking con otros miembros al cooperar en un estudio conjunto dirigido por un tercero. En este caso, un grupo de competidores puede contratar un consultor para recoger y analizar los datos, proteger las fuentes de información y publicar en todo el sector la información de los participantes.

Desde principios de los años ochenta se ha gestionado éticamente un benchmarking serio, en parte debido a la existencia del Código de Contacto del Benchmarking, desarrollado por la International Benchmarking Clearing House (Camp 1989). Este código describe el carácter del intercambio del benchmarking que deberá efectuarse entre copartícipes y abarca puntos como la legalidad, el intercambio, la confidencialidad y el uso de la información.

Benchmarking funcional y líderes de clase mundial. Un estudio de benchmarking no deberá constreñirse a un sector cuando una organización en un sector diferente esté consi-

guiendo resultados superiores en una función similar. En esta fuente de mejores prácticas es donde son posibles los beneficios grandes de procesos. La búsqueda aquí no está restringida a una aplicación corriente, sino a un método o práctica dentro de un proceso que se pueda adoptar y adaptar a un proceso específico.

Por ejemplo, una compañía aérea de bajo coste en el sudoeste de Texas emprendió un proyecto para maximizar sus beneficios mediante el benchmarking del tiempo que un avión consume en tierra. Al fin y al cabo, los ingresos sólo se generaban cuando el avión estaba en el aire. El proyecto consistía en determinar cómo podían los servicios de tierra, con plena seguridad, limpiar, dar servicio al aparato, recargarlo de combustible, cambiar los neumáticos y proporcionar el servicio de comidas, de la manera más eficiente para minimizar el tiempo en tierra. El equipo de benchmarking decidió reunirse con personas que habían perfeccionado dichas técnicas: los servicios de los fosos de carreras del circuito de Indianápolis. Los profesionales de las carreras son verdaderos expertos en estas prácticas porque se enfrentan con estos mismos problemas y han conseguido una gran habilidad en dar servicio rápido.

Otros ejemplos de benchmarking funcional e innovador se hallan en Xerox. Ha funcionado con algunas de las mayores empresas de América, incluidas American Express (facturación y cobro); American Hospital Supply (control automatizado de inventario); Ford Motor Company (disposición de la planta de fabricación); IBM y General Electric (centros de apoyo del servicio al cliente); L. L. Bean, Hershey Foods y Mary Kay Cosmetics (almacenamiento y distribución); Westinghouse (aspirante a National Quality Award, control de almacenes, código de barras), y Florida Power and Light (proceso de calidad).

Habiendo identificado las fuentes de las mejores prácticas, deberán ahora usarse en el proyecto de benchmarking específico del equipo. Es decir, para cada segmento importante del proceso objeto del benchmarking, el equipo necesita identificar organizaciones comparables internamente, funcional e innovadoramente. Normalmente, un equipo puede examinar unas 20 organizaciones internas y competitivas para el benchmarking. Las comparaciones funcionales e innovadoras requieren más trabajo para identificarlas. Parte del trabajo empezado aquí se completará en el paso 3. El punto clave aquí consiste en que el equipo debe tratar de identificar por lo menos a 100 posibles candidatos de benchmarking, entre los cuales seleccionar tres o cuatro para estudiarlos en detalle. La limitación de candidatos desde el punto de partida puede dar más tarde como resultado que se seleccionen coparticipes inadecuados.

Coparticipación. Se conoce como «coparticipe» a la organización a la que se emulará. El concepto de coparticipación es importante porque introduce la noción de que en un intercambio de benchmarking debe haber algo para ambas partes. Puede haber un interés común en un proceso particular o el coparticipe del benchmarking puede pedir ayuda para concertar una visita de benchmarking con otro departamento de la organización solicitante. Sin un beneficio mutuo, es poco probable que el intercambio de benchmarking sea duradero y tenga éxito.

PASO 3A: RECOGIDA DE DATOS

El equipo de benchmarking debe beber en las siguientes fuentes de información:

Internas. Sólo algunas organizaciones tienen una biblioteca propia, pero todo el mundo tiene acceso a una biblioteca pública. Durante los últimos cinco años se han podido realizar, mediante las posibilidades que ofrece la informática on-line, búsquedas de toda la documentación publicada sobre el tema encargado al equipo. Este intento revela habitualmente una riqueza de información que se puede ampliar con el contacto directo con los autores de los artículos más pertinentes. Otras fuentes internas comprenden la revisión de la investigación interna del mercado y los estudios competitivos.

Externas. Existe tanta información sobre organizaciones que es de dominio público que el problema radica en manejar montañas de datos. Se puede disponer de fuentes como las asociaciones profesionales, los seminarios públicos, las conferencias, las exposiciones comerciales y los discursos ante audiencias públicas.

Originales. Puede ser necesario contactar directamente con copartícipes potenciales del benchmarking por medio de encuestas telefónicas o por correo. Este sistema utiliza una serie de cuestionarios cada vez más detallados. Por ejemplo, si se ha identificado como candidatos a 100 organizaciones, el equipo de benchmarking puede enviar un cuestionario sencillo a cada una de ellas preguntándole sobre los resultados del proceso objeto y sobre la disposición de la organización a hacer el benchmarking. El equipo deberá proporcionar sus datos de resultados sobre las mismas preguntas que formula. Esto fija el tono correcto de apertura, participación y posible colaboración. Una vez que se han recibido las respuestas, se pueden remitir cuestionarios más detallados hasta que el equipo de benchmarking crea que ha encontrado el reducido número de organizaciones selectas que desea visitar. Si estas organizaciones seleccionadas están de acuerdo en el intercambio de benchmarking, entonces el equipo necesita prepararse para la visita de inspección.

PASO 3B: ORGANIZAR LA VISITA DE INSPECCIÓN

Organizar una visita a un establecimiento no es una actividad trivial. Se requiere una extensa preparación para asegurar que la visita resulte productiva y mutuamente útil. Una simple visita a otra organización puede ser agradable socialmente, pero no es probable que en ella se aprenda mucho. Además, las organizaciones de nivel mundial que están agobiadas por solicitudes de visitas de benchmarking no permitirán que se celebre una sin estar muy seguras de que la visita será productiva.

Las preguntas que se formularán durante la visita al establecimiento deberán prepararse y enviarse a los copartícipes del benchmarking antes de la visita. Ésta es habitualmente la primera prueba que le sirve al posible copartícipe para saber el grado de preparación del equipo solicitante.

La preparación de preguntas buenas e incisivas necesita una buena reflexión. El equipo deberá elaborar una lista de temas, por prioridades, de lo que quiere preguntar. Existen varias formas de preguntar: con respuesta abierta, con elección múltiple, con elección forzada y preguntas escalonadas. Cada una de ellas tiene una utilidad y se deberán usar todas las formas para extraer la información requerida.

Se deberán probar las preguntas con un copartícipe de benchmarking interno. Todo primer intento de elaborar preguntas sucintas y pertinentes es difícil, y al usarlo internamente, cualquier deficiencia de diseño quedará patente. Una vez perfeccionadas, estas preguntas se formularán durante la visita de inspección.

Otra razón para preparar intensamente las preguntas es que no resulta útil preguntar a un copartícipe un conjunto de cuestiones y a otro copartícipe un conjunto diferente de cuestiones. Cuando esto ocurre, las contestaciones son imposibles de interrelacionar y resumir.

Se preparará e intercambiará una agenda de la visita al establecimiento y se identificará a los participantes. Como parte de la preparación de esta visita de inspección, se acordará un protocolo de benchmarking, de modo que las preguntas sobre qué información se intercambiará y qué documentos estarán disponibles se habrán resuelto antes de la visita. Es muy poco profesional que un equipo solicite información que se deniega.

Normalmente, un equipo de benchmarking que hace una visita de inspección comprende un pequeño número de personas, quizá cuatro, cada una de los cuales juega un papel específico en la reunión. Se designará como representante del equipo a una persona, que deberá pre-

pararse para presentar profesionalmente los gráficos de flujo y la información relativa del proceso. Otro miembro del equipo estará dispuesto a formular las preguntas que se han adelantado al copartícipe. Un tercer miembro actuará como secretario y deberá llevar un ordenador portátil para registrar las respuestas a todas las preguntas.

Un cuarto miembro puede cumplir diversas labores de apoyo. Si se requiere un conocimiento especializado para entender la información presentada, el equipo debe invitar a que acuda a un especialista en este tema. Algunos equipos de proyectos invitan regularmente a un directivo de primer nivel, porque así el directivo tiene la oportunidad de ver en acción a un ejecutante de nivel mundial. Esta apertura produce el efecto de que los directivos superiores piensen bien lo que necesitan conseguir sus organizaciones. Todos los miembros del equipo deberán estar organizados, deberán ensayar y prepararse a fondo para llevar a cabo una visita profesional de inspección.

A su vez, el copartícipe del benchmarking tendrá probablemente un equipo de dos a cuatro miembros con una agenda propia, que seguirá un formato de reunión similar. De este modo, cada equipo puede necesitar medio día para revisar y contestar las preguntas, y el resto del día para visitar las actividades y observarlas de primera mano. El tiempo requerido para ejecutar la agenda de ambos equipos puede no ser suficiente cuando el proceso es complejo. La necesidad de satisfacer ambas agendas proporciona otro argumento a favor de la necesidad de una profunda preparación para asegurar que el intercambio de información se salde con éxito.

Una vez terminada la visita de inspección, el equipo de benchmarking deberá escribir un informe de la misma. Reflejará las respuestas registradas por el secretario, así como las impresiones e informaciones de los otros miembros del equipo. Es esencial que este informe se prepare el mismo día de la reunión, en el salón del hotel, en el aeropuerto o dondequiera que los miembros del equipo puedan comentar las impresiones todavía frescas en su memoria. Este informe y todos los otros informes de la visita se convierten en la base del informe de mejores prácticas (Fig. 12.2). En este último informe se basarán las recomendaciones del equipo a la dirección.

En este punto, algunas personas aducirán que hay tanto trabajo en la realización de un estudio de benchmarking y tanto trabajo normal que desempeñar que debería contratarse a un consultor externo para realizar la tarea. Cuando sea muy grande la presión del tiempo, cuando las fuentes externas tengan más credibilidad o cuando se requieran habilidades especializadas, como el diseño de un cuestionario, puede ser adecuado contratar un consultor externo para realizar el trabajo. Sin embargo, cuando se utiliza una fuente externa, la organización consigue poco conocimiento y quizá poco dominio de los hallazgos. La norma habitual seguida por muchas organizaciones familiares con el benchmarking es 70/30; 70 por 100 de los estudios se hacen internamente; 30 por 100, externamente.

PASO 4: ANALIZAR LA BRECHA EN LOS RESULTADOS

El equipo debe analizar ahora toda la información recogida. La tarea específica consiste en analizar los datos para determinar si los procesos internos de los que se ha hecho benchmarking están a la par, por encima o por debajo de otros. Dicho de otro modo, el equipo necesita identificar las brechas o diferencias existentes entre los resultados del proceso del equipo y los de las organizaciones mejores en su clase y de nivel mundial. Este análisis deberá incluir qué entradas, salidas, procesos o pasos dentro del proceso son superiores, y con qué *medida* cada uno de estos componentes es superior.

«¿Con qué medida?». Es una pregunta importante, porque los datos finales que parecen comparables pueden ser muy diferentes si se calculan de modo distinto y si se usan elementos o hipótesis diferentes en el cálculo. Las medidas cuantitativas son con frecuencia muy poco fiables y los métodos diferentes de derivar datos hacen difíciles las comparaciones significativas.

CONTENIDO
Introducción
Objetivo del proyecto
Estudio del contexto
Problemas citados
Objetivos empresariales de la compañía
Métricas de los resultados críticos
Foco de nuestro estudio de benchmarking
Método de investigación
Qué emular
A quién emular
Alcance del proyecto
Duración del estudio
Equipo del benchmarking
Costes del estudio
Costes de la conversión
Resumen de los hallazgos del benchmarking
Gráficos de flujo comparativos del trabajo
Estudio descriptivo de las mejores prácticas
Análisis de las brechas y los logros en los resultados
Brecha existente en los resultados
Brecha global
Tendencias históricas
Impacto de una formación superior
Brecha en los resultados proyectados
Impacto de la aplicación de las prácticas del benchmark
Ventajas en los resultados proyectados
Apéndice
Cuestionario del estudio de benchmark
Informes de las visitas de inspección
Análisis cuantitativo de costes
Comparación de las mejores prácticas del sector

FIGURA 12.2 Informe de las mejores prácticas (DeToro 1995, Tabla 14.5).

Otra parte importante del análisis de los resultados es el desarrollo de una estadística resumen. Este elemento de los datos es habitualmente una medida de los resultados globales, que resulta útil para hacer comparaciones preliminares entre organizaciones y para proyectar datos, como veremos en el paso 5. Calcular una estadística resumen —una medida rápida de la productividad— puede ser tan sencillo como dividir un resultado de la organización por el número de personas implicadas. En almacenamiento, por ejemplo, dividir el número de pedidos recogidos y empaquetados por el número de personas implicadas es una medida primaria del rendimiento.

Además de analizar la brecha en los resultados entre el proceso del equipo y el de sus copartícipes, el equipo también necesita entender cómo funcionaría la operación proyectada si se adoptaran todas las mejores prácticas. Esto es importante, porque si se aplica la combinación de todas las mejores prácticas de todos los copartícipes del benchmarking, esto puede permitir al equipo de benchmarking superar los resultados de cada uno de los copartícipes estudiados.

Sin embargo, por muchas razones, puede ser imposible adoptar todas las mejores práctica. Coste de transición, discontinuidad, cuestiones culturales y valores en conflicto, son todos motivos que ofrecen las organizaciones habitualmente para hacer un cambio mínimo. Pero como resultado de la comparación con las mejores prácticas, se conoce ahora la gran oportunidad que hay de conseguir unos rendimientos superiores, como son los pasos específicos de trabajo y la metodología para conseguir esta mejora. *Es difícil encontrar una motivación más apremiante para una mejora y un cambio del proceso drásticos.*

El equipo necesita comparar cada uno de los pasos de su proceso y determinar los resultados conseguidos por los copartícipes del benchmarking. Es decir, ¿cuáles son el valor, la ventaja competitiva o la ventaja en coste en cada uno de los pasos clave del proceso objeto del

TABLA 12.1 Análisis de la brecha en los resultados*Grupo: Formación técnica**Proceso: Desarrollo del curriculum**Resumen del análisis de los resultados*

Método actual	Método mejor	Ventaja competitiva	Ganancia de valor en \$	Consideraciones de la conversión
Paso 1 del trabajo: Necesita análisis				
Discutir las deficiencias con los formadores	Pedir al cliente que identifique las deficiencias actuales en los resultados, fijar metas del programa y fijar requisitos del cliente.	Ahorra un día entero en el área observando a los implicados.	350.	Desarrollar nuevo cuestionario de encuesta.
	Realizar análisis de tareas para identificar los deberes de cada función y crear un mapa de tareas.	Mejora la exactitud de los objetivos del estudiante y ahorra medio día en volver a escribir.	175.	Formar al equipo de desarrollo del curriculum.
Observar a los implicados en su trabajo	Observar a los ejecutantes implicados en su trabajo.	La misma.	Ninguna.	2.500\$ costes/año en viajes.
Encuestar a los directivos y a los ejecutantes mejores	Observar a los ejecutantes mejores y promedio en su trabajo y medir las diferencias en resultados para calcular el potencial de mejora.	Fija objetivos de mejora frente a los que evaluar el éxito.	Ahorra un día.	
Crear objetivos para el estudiante	Convertir en objetivos del estudiante.	La misma.	Ninguna.	

Fuente: DeToro 1995, Tabla 14.6.

estudio, si el equipo del proyecto adoptara las mejores prácticas de las organizaciones estudiadas? Se muestra en la Tabla 12.1 un ejemplo de un análisis de las brechas en los resultados para un grupo de formación técnica.

Otra actividad importante en la evaluación de los datos de benchmarking es la comparación visual de los diagramas de flujo empleados por cada una de las empresas que se ha emulado. Esta comparación en paralelo revela importantes oportunidades de mejora. Las observaciones e implicaciones particulares se listan en la Tabla 12.2.

El equipo debe compilar un cuadro de «lo mejor de las mejores prácticas» para el proceso de benchmarking. Este cuadro incluye, para cada paso del proceso de trabajo objeto del estudio, una descripción de la mejor práctica, la ventaja en los resultados asociada a ella y el valor o ganancia posible si se empleara la mejor práctica. Esta información es la base sobre la que se harán las recomendaciones en el paso 6.

TABLA 12.2 Comparaciones de gráficos de flujo

Observaciones	Implicaciones
Menos pasos	Menos personas, coste más bajo.
Secuencias diferentes	Mejor flujo de trabajo, menor duración del ciclo.
Diferentes documentaciones	Cortes breves, errores reducidos.
Diferencias en el diseño	Mejor utilización de los activos, coste más bajo.
Pasos automatizados	Procesos simplificados, errores reducidos.
Pasos subcontratados	Habilidades especiales utilizadas, costes más bajos.

Fuente: DeToro 1995.

PASO 5: NIVELES DE RESULTADOS DEL PROYECTO

En el paso de análisis se define la posición relativa de hoy, pero las prácticas del sector no son estáticas. Tanto el sector como los competidores continúan persiguiendo la mejora. Por tanto, no se debe analizar solamente la brecha existente en el momento de la medida, sino también prever dónde se situarán probablemente en el futuro el benchmark y la brecha (véase un retrato gráfico en Camp 1989, p. 152).

En este punto del proyecto, la dirección tiene derecho a preguntar al equipo lo siguiente:

- ¿Cómo se compara hoy la organización con el mejor del sector?
- ¿Cómo logrará esta organización una ventaja en los resultados?
- ¿Qué significará para las actividades? ¿Para la organización?
- ¿Cuánto costará la conversión?

Para contestar a estas cuestiones, el equipo de benchmarking necesita preguntar lo siguiente:

- ¿Cuáles eran las tendencias históricas en los resultados?
- ¿Cuál es la brecha existente en los resultados?
- ¿Cómo cambiarán los resultados del sector?
- ¿La brecha en los resultados, se ensanchará, se estrechará o permanecerá igual?
- ¿Cuáles son las implicaciones para el negocio objeto del estudio?
- ¿Cómo puede lograr la organización una ventaja significativa en los resultados?

El equipo puede empezar a contestar a estas preguntas eligiendo una estadística resumida y usándola como una medida global para entender los cambios que tienen lugar y los que ocurrirán. Los datos históricos (de la organización y del sector en general) y las mejoras proyectadas se pueden comparar y analizar para determinar:

- Tendencias recientes.
- Tamaño de la brecha en los resultados.
- Por qué existe la brecha en los resultados.
- Si la brecha se está ensanchando o estrechando y por qué.

La actividad siguiente del equipo consiste en decidir qué mejoras es capaz de conseguir el sector en el futuro y dibujar aquellas tendencias del sector junto con las mejoras que el equipo espera asegurarse durante los dos a cinco años próximos. Realmente, el equipo deberá desarrollar dos proyecciones: una mostrando los efectos de la ausencia de cambios en el proceso actual y una segunda mostrando los efectos de la implantación de las mejores prácticas descubiertas a través del benchmarking.

La última actividad del paso 5 es evaluar las implicaciones operativas de los cambios y el impacto financiero o de valor al cerrar la brecha. Por ejemplo, los cambios proyectados pueden tener efectos operativos sobre proveedores, clientes y administrativos, así como sobre los métodos de trabajo. Cada uno de estos impactos necesita ser identificado y las implicaciones de los cambios propuestos necesitan ser compartidas con los grupos afectados. Es necesario asegurarse de que los afectados tengan una amplia oportunidad de asimilar y adaptarse. De forma similar, se necesita calcular los efectos financieros para que se identifique el valor de implantar las mejores prácticas y se transmita a los grupos afectados. Una técnica potente de conquistar las mentes y los corazones de los directivos de primer nivel es traducir los beneficios operativos y financieros de la implantación de las mejores prácticas a la contribución que harán a las metas y objetivos de la organización, y a la contribución que harán al logro de la visión de la organización.

PASO 6: COMUNICAR LOS HALLAZGOS

La recogida y análisis de los datos de las mejores prácticas y la proyección de las operaciones implicadas son importantes y necesarias, pero no son suficientes para alcanzar un resultado mejorado de la organización. El equipo de benchmarking tiene la responsabilidad de conseguir la aprobación de la dirección a sus recomendaciones. Puede haber escepticismo, renuencia o clara resistencia por parte de la dirección. Por eso, la tarea del equipo consiste en comunicar sus hallazgos de forma que obtengan su aceptación. Para lograrlo, el equipo debe asegurarse de que la dirección entiende los hallazgos, piensa que el equipo tiene crédito y acepta sus recomendaciones. Se consigue del modo siguiente.

Decidir quién necesita saberlo. En toda organización existen personas que, formal o informalmente, son las que toman las decisiones, y existen clientes, proveedores, personal y asociados con los que el equipo trabaja. De entre estos grupos, el equipo debe decidir quién (con sus nombres) necesita enterarse de los hallazgos, qué necesita saber y por qué necesita saberlo.

Seleccionar el mejor vehículo de presentación. Las culturas varían, y lo que se acepta en una organización puede no ser viable en otra. En algunos casos se requieren informes escritos con documentación de apoyo detallada. En otras culturas se necesita una presentación oral acompañada de transparencias y precedida de explicaciones previas y documentación. En otras organizaciones, todo lo que se necesita es un resumen ejecutivo de una página y una discusión informal. El equipo debe amoldar la entrega de su informe a su audiencia.

Organizar los hallazgos. El equipo deberá reflejar sus hallazgos en el informe de mejores prácticas (Fig. 12.2). Este documento representa la acumulación de todo el trabajo que ha consumado el equipo y es parte integral del ejercicio de comunicación. El informe también es importante, porque refleja un trabajo que puede ser útil a otros equipos de benchmarking. Finalmente, la disciplina de elaborar un documento como el informe de mejores prácticas ayuda a asegurarse de que los hallazgos del equipo estén preparados por completo.

Los informes de mejores prácticas deberán incluir datos descriptivos y cuantitativos; presentar hechos, no opiniones; resaltar los logros de los resultados, no los métodos de investigación, e incluir una estimación preliminar del coste de la implantación de las recomendaciones.

Presentar las recomendaciones. La presentación de las mejores prácticas se deberá hacer en presencia del equipo de benchmarking completo. Varias partes de la presentación se pueden delegar de modo que se compartan las responsabilidades. Este sistema representa una oportunidad de desarrollo personal y supone una de las mejores formas de reconocimiento.

Las recomendaciones del equipo deberán ser aceptadas siempre. Eso no quiere decir que todas las recomendaciones del equipo de benchmarking deberán ser aceptadas automáticamente sin discusión; sin embargo, deberán formularse y responderse las preguntas y deberán identificarse y resolverse las dudas bastante antes de la presentación final. Si el equipo ha mantenido a su directivo patrocinador al tanto durante todo el estudio de benchmarking y si la dirección ha revisado el trabajo del equipo y ha proporcionado orientación y apoyo, es altamente improbable que se rechacen las recomendaciones.

PASO 7: ESTABLECER LAS METAS FUNCIONALES

Tras la aprobación de las recomendaciones por la dirección, se deben identificar los impactos de los cambios de resultados y comunicarlo a las personas afectadas. Normalmente, la dirección no se ocupa de estos detalles del día a día de las mejoras del proceso; sin embargo, la dirección necesita saber lo que significan estos cambios recomendados para las unidades de trabajo, los departamentos y la organización en conjunto. Una pregunta importante relacionada es: ¿Qué significa para la organización este año la implantación de estas recomendaciones? Para contestar a estas preguntas, el equipo debe completar las tres tareas siguientes:

Revisar las metas operativas. Toda organización y las unidades que la comprenden tienen una orientación clara y definida respecto a los objetivos a corto y largo plazo que deben cumplirse. Los cambios anticipados se reflejan en un conjunto revisado de metas y objetivos. La falta de revisión de la orientación después de haber aceptado las recomendaciones indica que la organización no actúa seriamente ejecutando las acciones recomendadas. Esto es un reflejo menos de la actitud del equipo que de la renuencia de la dirección a mejorar el rendimiento de forma decidida.

Analizar el impacto sobre otros. Obviamente, los cambios no se implantan en el vacío y los cambios significativos pueden repercutir por toda la organización. Entre los grupos normalmente afectados están los clientes, los proveedores, la dirección, el personal y los asociados. Un ejemplo de lo que ocurre al no tomar en consideración el impacto de los cambios sucedió en Xerox Distribution. La operación de recogida se hizo más eficiente como resultado de hacer benchmarking de la operación de L. L. Bean. Sin embargo, Xerox no tomó en consideración el impacto de su mejora de productividad y el departamento de embalaje no estuvo preparado para manejar el aumento de volumen. Un ejemplo de los impactos identificados por un grupo con formación técnica se halla en la lista de la Tabla 12.3.

Los cambios, y los efectos que resultan de ellos, son importantes. Los tipos de cambios que pueden considerarse significativos incluyen los siguientes, aunque no se limitan a ellos:

Cambios	Efectos
Reducción de personal	Reorganización.
Cambios de puesto	Reducción de fondos asignados.
Requisitos del cliente alterados	Relaciones jerárquicas revisadas.
Prioridades alteradas	Cambios de proveedores.
Nuevas descripciones de las tareas	Nuevos requisitos de datos.

Asegurar la aprobación de la dirección. Repitamos una vez más que la dirección debe respaldar, apoyar, aprobar y en cierto grado implantar los cambios derivados del ejercicio de

TABLA 12.3 Impacto del benchmarking sobre otros grupos

Impacto en otros planes operativos de la organización como resultado de la aplicación de las recomendaciones de un equipo de benchmarking en Xerox Distribution

Proveedores:

- Los ingenieros técnicos tendrán que proporcionar manuales de planes operativos y entregar documentación de formación a los diseñadores de currículum.
- El departamento de diseño de gráficos tendrá que crear todo su diseño artístico en los PC.
- El servicio externo de limpieza tendrá que limpiar dos aulas más por día.

Grupos internos de apoyo:

- La cafetería tendrá que prepararse para 50 estudiantes adicionales por semana.
- El departamento de viajes de la empresa debe reservar 25 habitaciones adicionales para acomodar clases con más alumnos.
- El horario del almuerzo tendrá que escalonarse.

Organización del servicio:

- Los técnicos del servicio tendrán que realizar un programa preescolar de estudio por su cuenta antes de asistir a las clases de formación.
- Todos los técnicos tendrán que viajar al centro de formación de la sede central. Se cerrarán los centros regionales de formación.
- Los presupuestos de viaje deberán incrementarse en un 10 por ciento para reflejar las mayores distancias en viajes.
- Se requerirá de los directivos de servicio que certifiquen la preparación de los técnicos para la clase.

Compañía:

- La erosión con origen en la compañía se debe revisar de arriba abajo.
- La proyección de la erosión de la cuota de mercado puede disminuirse.

Fuente: De Toro 1995.

benchmarking. Está claro que esto se aplica tanto cuando los cambios suponen reorientar las metas y los objetivos de la organización como cuando tienen un efecto significativo sobre las personas.

En este punto el equipo ha de estar preparado para implantar sus recomendaciones.

PASO 8: DESARROLLAR EL PLAN DE ACCIÓN

El equipo de benchmarking debe ahora evaluar las prioridades para su implantación, desarrollar un plan de acción, y cuando sea segura la aprobación para la acción, proceder a su implantación. La probabilidad de éxito del equipo queda reforzada si sigue los siguientes pasos.

Fijar las prioridades para la implantación. No todas las prácticas de benchmarking proporcionan los mismos beneficios, y algunas pueden ser más difíciles de implantar que otras. Algunos cambios pueden ser más costosos que otros, e incluso hay algunos que pueden requerir cambios de personal. Algunos tendrán consecuencias significativas para los proveedores en un sentido y para los clientes en otro.

Dadas estas consideraciones, la implantación de las mejores prácticas se hará, lo más probablemente, por etapas. Pero puede no ser tan obvio qué prácticas es preferible implantar primero. Un sistema de resolver este asunto es no elegir la práctica a implantar, sino elegir los criterios por los que se elegirá la mejor práctica. Una vez definidos los criterios, la selección de la práctica a implantar puede ser evidente. En la Tabla 12.4 se muestran los criterios prioritarios.

Tabla 12.4 Criterios de prioridad en la implantación

Criterios	Consideración
Mejora de los resultados	¿Cuánto contribuirá esto a los resultados por unidad de trabajo?
Tiempo de implantación	¿En cuánto tiempo se podrá instalar este proceso y ver los resultados?
Coste de la implantación	¿Qué costará implantarlo?
Formación requerida	¿Quién necesita ser formado sobre qué, dónde, cuándo y durante cuánto tiempo?
Probabilidad de éxito	¿Cuáles son los riesgos? ¿Cuál es la certeza de los resultados?
Controles necesarios	¿Qué inspectores, mediciones y sistemas de control se necesitan?
Cambios en el personal	¿Qué cambios de personal se necesitan?
Impactos	¿Quién se verá afectado por los cambios internamente? ¿Externamente? ¿Hay que ampliar las instalaciones? ¿Tiene la empresa que cambiar de emplazamiento?

Fuente: DeToro 1995.

Los equipos pueden elaborar una hoja de trabajo para estimar los distintos valores de cada criterio. De este modo, las decisiones se pueden basar en la información y el análisis y no en la mera opinión. El ejemplo mostrado en la Tabla 12.5 demuestra cómo decidió un equipo de formación técnica qué mejores prácticas implantar. Este análisis se deberá completar para cada una de las prácticas que se consideren.

Una vez completado, se condensarán los resultados de la información en un resumen que ordenará por rango las prácticas a implantar. Se muestra en la Tabla 12.6.

Tabla 12.5 Criterios de prioridad en la implantación para un equipo de formación técnica

Criterios	Consideraciones +/-
Mejora de los resultados	+ Ahorra varias semanas. + Mejora calificaciones de pruebas. - Ninguna.
Tiempo de implantación	+ Tres semanas. + Sin impacto sobre trabajo en curso. - El primer trimestre demasiado ocupado.
Recursos necesarios	+ No se requiere personal adicional.
Coste de la implantación	+ Estimado en 2.500\$. + No se necesita nuevo equipamiento. - Requiere una asignación de presupuesto. - Requiere nuevo software 4.500\$. - Requiere nueva impresora de láser 10.000\$.
Formación requerida	+ Cinco diseñadores asistirán a dos semanas de formación. - Costes de formación 8.000\$.
Probabilidad de éxito	+ Muy alta, sin implicar nueva tecnología. + Al personal le gusta el nuevo enfoque.
Controles necesarios	+ Control y nueva formación.
Cambios de personal	+ Contratar un especialista en diseño de currículum. + Promocionar un editor a diseñador. - Añadir 45.000\$ a gastos generales.
Impactos	+ Sin impacto directo.

Nota: No se requieren todos estos criterios cada vez. Quizá sólo se necesitan dos o tres para una mejor práctica específica.

Fuente: DeToro 1995.

TABLA 12.6 Implantación y estrategia

Técnicas de trabajo	Prioridad / estrategia
1. Análisis de las necesidades	Implantar inmediatamente.
2. Análisis de las tareas	Implantar dentro de 30 días.
3. Anteproyecto del programa	Implantar inmediatamente.
4. Escribir currículum	Implantar 10 días después de la formación de los diseñadores.
5. Métodos del programa piloto	Esperar hasta la instalación de todas las técnicas.
6. Métodos de evaluación	Esperar hasta la realización del primer programa piloto.

Fuente: DeToro 1995.

Mostrar las revisiones de la brecha en los resultados. El equipo de benchmarking necesita ahora reflexionar sobre las etapas de la implantación y su efecto sobre la brecha en los resultados. La lógica dice que la proyección de la brecha preparada anteriormente debe modificarse para reflejar las fases de implantación. Un gráfico como el de las Figuras 12.3a y 12.3b ilustra al equipo y a la dirección sobre los logros esperados durante el período de implantación.

Desarrollar planes de acción. El equipo necesita completar lo siguiente:

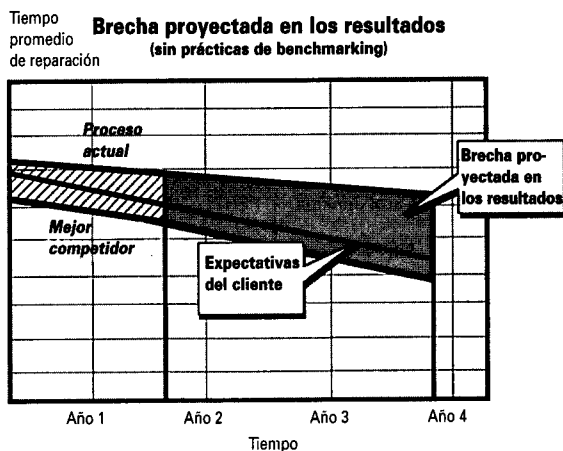
- Describir las tareas específicas que deben completarse y los resultados esperados.
- Ordenar las tareas cronológicamente y diseñar para cada una de ellas el objetivo de una fecha de terminación.
- Evaluar los recursos requeridos para implantar las mejores prácticas. Esto abarca aspectos como presupuesto, personal, equipamiento y materiales.
- Asignar responsabilidad para cada acción a personas específicas, con su nombre. Explicar cómo realizar la tarea.
- Establecer un sistema de control para vigilar el avance y alertar al equipo cuando se requiera una acción correctora. Esto incluye la fijación de un mecanismo de informe para mantener a los propietarios del proceso al tanto de la situación del proyecto en todo momento.

La Figura 12.4 muestra un ejemplo de un plan de acción simplificado.

PASO 9: IMPLANTAR EL PLAN Y CONTROLAR LOS RESULTADOS

Se ha aprobado la implantación del plan y el equipo avanza ahora para crear las mejores prácticas. En este momento resultan adecuadas algunas consideraciones para ayudar al equipo de benchmarking a entender los progresos de sus tareas de implantación. Primero, el equipo deberá hacer una prueba piloto de una mejor práctica antes de empezar con su total implantación. Esta prueba piloto puede ser tan sencilla como una simulación del proceso nuevo, en la que se reparte un documento que represente las distintas etapas para que se entienda el flujo de información y las actividades que se realizarán. En un proceso más complejo, se puede realizar una prueba verdadera en la que los datos o materiales se sometan a los nuevos métodos de trabajo. En último caso, resulta siempre una buena idea llevar la prueba piloto al extremo, para determinar si el proceso nuevo puede soportar la presión de actividades complejas y de alto volumen.

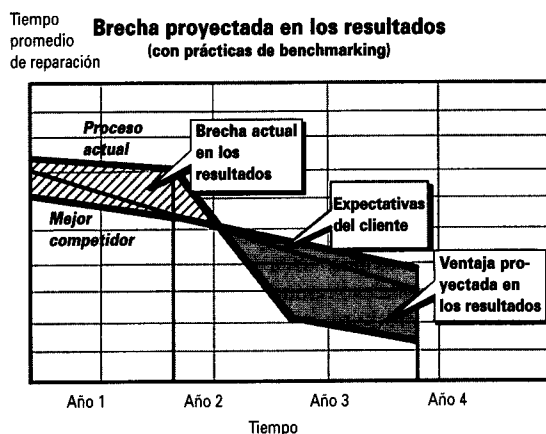
El equipo necesita establecer medidas para calibrar el progreso de la implantación. Estas medidas del proceso, llamadas también «medidas de eficiencia», incluyen coste, tiempo, calidad (sin defectos) y una serie de medidas de la efectividad que determinan la satisfacción del cliente.



Descripción de las tendencias proyectadas

- Nuestras investigaciones revelan que la competencia está invirtiendo en material didáctico asistido por ordenador, que reducirán su tiempo de formación de 3 a 2,5 días, y en dos años mejorará el promedio de tiempo para reparar el equipo en 0,8 horas.
- Durante el mismo periodo, nosotros esperaríamos, salvo cambios estratégicos en nuestros métodos de formación, conseguir 1,2 horas de servicio por llamada.
- Sin cambios estratégicos, nuestra competencia ampliaría su ventaja hasta 0,4 horas (0,8 frente a 1,2) en dos años.

FIGURA 12.3a Impacto proyectado de resultados actual (DeToro 1995, Figura 14.6).



Impacto de las prácticas de benchmarking

- Con la adopción de las mejores prácticas del sector, podríamos en seis meses conseguir un promedio de puntuación de prueba de 0,7 horas, que nos da una ventaja en los resultados de +0,4 sobre nuestro mejor competidor.
- Incluso contando con mejoras de los competidores, todavía mantendríamos una ventaja en los resultados de $\geq 0,1$ durante varios años.

FIGURA 12.3b Impacto proyectado de resultados con cambios (DeToro 1995, Figura 14.7).

Método nuevo	Acciones	Asignado a	Recursos requeridos	Presupuesto requerido	Fecha de terminación
Revisar y analizar las necesidades	1. Escribir nuevo manual de procedimientos	Fred Kennedy	PC	1.500\$	10-6
	2. Fijar puntos de aprobación	Fred Kennedy	Calendario del programa	—	10-8
	3. Crear gráfico de progreso	Carol Jenkins	PERT	75\$	10-30
	4. Formar a diseñadores	Bill Peterson	Servicios para el aula	500\$	11-15
	5. Explicar procedimientos a proveedores	Carol Jenkins	Manual de procedimientos	250\$	12-1
	6. Coordinar formación del personal	Fred Kennedy	Curriculum	400\$	1-4

FIGURA 12.4 Plan de acción (*DeToro 1995, Figura 14.15*).

Hay muchas herramientas de calidad a disposición del equipo para ayudarle durante la fase de la implantación. Las siete herramientas básicas y las siete herramientas de gestión (véase Camp 1994, p.137) se deberán emplear para asegurar que los datos se captan y analizan para reflejar los resultados de las nuevas mejores prácticas.

PASO 10: RECALIBRAR LOS BENCHMARKS

Para asegurar el éxito y la efectividad se deben planificar y recalibrar los benchmarks. No existen reglas estrictas y claras sobre la frecuencia y método de la recalibración.

Se pueden adoptar varios sistemas. Se pueden hacer estudios específicos con un objetivo marcado, que cierran las brechas en la información. Se puede hacer una completa reevaluación de todos los objetivos críticos del benchmark y de los hallazgos de las mejores prácticas. O se puede emprender una investigación nueva y más productiva. Es importante recordar que se debe hacer en algún momento una reevaluación completa que asegure que la información sigue siendo relevante y oportuna.

Un enfoque consiste en volver a calibrar los benchmarks anualmente. Con mucha frecuencia, resulta que no merece la pena, porque las prácticas no cambian tan deprisa. La recalibración después de tres años es una tarea formidable, ya que se verán afectados casi todos los procesos (sólo algunos procesos pueden verse afectados anualmente por la recalibración). Probablemente es más productivo cierto nivel intuitivo de mantenimiento. Cada equipo de benchmarking y unidad de negocio necesita determinar su frecuencia de recalibración, basándose en sus propias necesidades y sector. Obviamente, un cambio externo rápido es una baza a favor de actualizaciones de benchmarking más rápidas. No obstante, una regla útil consiste en examinar la necesidad de recalibración dentro de los tres años del estudio original.

Por ejemplo, la Compañía A examina su proceso de cuentas por cobrar cada tres años. Esto ha provocado sólo ajustes menores en los seis años desde que un proyecto de benchmarking anterior resultó un importante rediseño del proceso. El proceso de servicio al cliente es otra historia. Como la tecnología disponible para apoyar el proceso está cambiando tan rápidamente, el equipo de proceso ha realizado estudios de benchmark casi continuamente durante los últimos cinco años.

La recalibración se efectúa volviendo a practicar el proceso de los diez pasos del benchmarking. Es imperativo que se vuelvan a examinar todos los pasos. No se debe saltar ningún paso, porque asumir que no ha cambiado nada es un enfoque peligroso. La información desde las fuentes internas deberá revelar sin dificultad las deficiencias y las áreas en las que se necesita nueva información.

El valor total de la recalibración está no sólo en refinar los resultados del proceso de benchmarking, sino también en hacer que el proceso sea más eficiente y responda mejor a las necesidades del benchmarking.

FACTORES DE ÉXITO Y CONSIDERACIONES DE LA DIRECCIÓN

Es fundamental para el éxito del proceso que sus propietarios lleven a cabo su propio proyecto de benchmarking. Los que trabajan el proceso son quienes lo conocen mejor. Son casi siempre los mejor calificados para analizarlo. Cuando los propietarios del proceso llevan a cabo su propio benchmarking, desarrollan un compromiso con el proceso y con las mejores prácticas resultantes.

Un benchmarking con éxito no se hace por personas separadas. Existen, sin embargo, personas que actúan, en razón de su competencia, para ayudar a asegurar que se cumple el proceso de benchmarking. Pero el benchmarking lo realizan, con ayudas, los propietarios del proceso o los representantes del proceso.

Hay que tener en cuenta varias consideraciones para encauzar las actividades de benchmarking. Entre ellas está el modo de divulgar el benchmarking. Puede suponer una gran diferencia. Cuando se utiliza la mejora continua, significa que todos deben trabajar conjuntamente para mejorar la manera de hacer las cosas y que los resultados sean más sólidos. El benchmarking es el proceso para encontrar las mejores prácticas que se implantan en los procesos de trabajo y conducen a la mejora continua.

Hay que considerar también cómo hallar los recursos necesarios para realizar el benchmarking. Aunque es cierto que se necesita aumentar algo los recursos para hacer nuevo benchmarking, existe a menudo otra opción. En alguna parte, en casi todas las organizaciones, hay recursos dedicados a la mejora continua. Parte de éstos deberá dedicarse al benchmarking. El benchmarking se tendrá que contemplar como parte de un esfuerzo progresivo de mejora y como parte de la tarea del propietario del proceso. No deberá considerarse como trabajo extra. Existe un número ilimitado de mejores prácticas, cada una de las cuales ofrece un potencial significativo de mejora, de incremento de resultados y de rendimiento superior. Se debe estimular a los operadores del proceso a que las busquen y encuentren.

Para conseguir el máximo del benchmarking, lo que se necesita no es copiar a ciegas a otras instituciones. Esto no daría un rendimiento superior. La adaptación creativa de las mejores prácticas sí lo dará. La fase de implantación del benchmarking deberá ser la fase creativa. El benchmarking significa combinar los talentos creativos de las personas que manejan los procesos, con las mejores prácticas. El benchmarking deberá descubrir las mejores prácticas. Pero su implantación innovadora deberá ser el camino para que la organización se supere y establezca una ventaja competitiva.

Por ejemplo, Xerox estaba muy preocupada con la satisfacción del cliente. Cuando hizo benchmarking de L. L. Bean, le quedó muy claro a Xerox la política de satisfacción del cliente de Bean. Si un cliente estaba descontento con un producto, Bean lo retiraba y le devolvía el dinero. Xerox creyó que esta práctica era mejor. Pero no se quedó en la mera copia de la práctica. Xerox preguntó a sus clientes qué les parecía esta mejor práctica y halló algunos resultados interesantes. Los clientes no deseaban que se les devolviera el dinero; querían que el aparato funcionara. Así pues, Xerox tuvo que adaptar la mejor práctica para trabajar con sus clientes.

El resultado es la garantía de satisfacción total de Xerox, que dice que si el cliente no está satisfecho con un producto de Xerox dentro de un periodo de tiempo determinado después de la compra, Xerox sustituirá el producto, a petición del cliente, hasta que quede satisfecho con él. De este modo, Xerox no copió meramente la mejor práctica de L. L. Bean. Fue más allá para adaptar esta práctica a las necesidades de sus clientes específicos.

Beneficios en el comportamiento. El benchmarking es esencialmente una experiencia didáctica. Ayuda a una organización a centrarse y buscar el consenso sobre qué necesidades satisfacer y cómo conseguirlo, no a debatir sobre qué debería hacerse. El benchmarking puede proporcionar el estímulo para la mejora a personas de todos los niveles, mediante una situación competitiva y enfocada al exterior, que consiga unos resultados de nivel mundial con un aumento de la satisfacción del cliente. Muy pocas personas desean conformarse con un segundo lugar, una vez que saben qué necesidades satisfacer y cómo hacerlo.

Competitividad. El beneficio total del benchmarking es la mejora de la competitividad y el aumento de valor a los ojos de los clientes. El uso efectivo del benchmarking para desarrollar e implantar acciones de mejora puede ayudar a las organizaciones a alcanzar niveles superiores de servicio al cliente. Esto, a su vez, redundará en un aumento de la cuota de mercado y en una mejora de los resultados financieros.

REFERENCIAS

- Biesada, Alexandra (1991). «Benchmarking». *Financial World*, 17 September, pp. 28-54.
- Camp, Robert C. (1989). *Benchmarking: The Search for Industry Best Practices That Lead to Superior Performance*. ASQC Quality Press, Milwaukee.
- Camp, Robert C. (1994). *Business Process Benchmarking: Finding and Implementing Best Practices*. ASQC Quality Press, Milwaukee.
- DeToro, Irving J. (1995). *Business Process Benchmarking Workshop*. The Quality Network Inc., Rochester, NY, August.
- DeToro, Irving J. and Tenner, Arthur R. (1997). *Process Redesign: The Implementation Guide for Managers*. Addison Wesley, Reading, MA.
- Ishikawa, Kaoru (1980). *Guide to Quality Control*. Quality Resources, White Plains, NY.
- Kelsch, John E. (1982). «Benchmarking: Shrewd Way to Keep Your Company Ahead of its Competition». *Boardroom Report*, December, pp. 3-5.
- Port, Otis, and Smith, Geoffrey (1992). «Beg, Borrow, and Benchmark». *Business Week*, 30 November, pp. 74-75.
- Rummler, G. A., and Brache, A. P. (1990). *Improving Performance: How to Manage the White Space on the Organizational Chart*. Jossey-Bass, San Francisco.
- Tucker, Francis G., Zivan, Seymour M., and Camp, Robert C. (1987). «How to Measure Yourself Against the Best». *Harvard Business Review*, January-February, pp. 8-10.
- «World-class Organizations: Xerox» (1990). *Industry Week*, 9 March, pp. 14, 16.

Capítulo 13

DESPLIEGUE ESTRATÉGICO

Joseph A. DeFeo

INTRODUCCIÓN	13.1	Liderazgo de la alta dirección ...	13.13
¿Qué es el despliegue estratégico?	13.2	Desplegar las metas	13.14
Historia	13.3	Medir el progreso con los indicadores clave del rendimiento	13.17
¿Por qué el despliegue estratégico? Sus beneficios	13.5	Revisar el progreso	13.19
LANZAMIENTO DEL DESPLIEGUE ESTRATÉGICO	13.7	Auditorías del negocio	13.22
El proceso del despliegue estratégico	13.7	DESPLIEGUE ESTRATÉGICO O NO: EL ELEMENTO DECISIVO ...	13.24
LOS ELEMENTOS DEL DESPLIEGUE ESTRATÉGICO	13.8	Beneficios de implantar el despliegue estratégico	13.24
Establecer la visión	13.8	Implantación del despliegue estratégico: riesgos y lecciones aprendidas	13.24
Acuerdo sobre una visión	13.9	EMBARCARSE EN EL DESPLIEGUE ESTRATÉGICO DE LA CALIDAD	13.24
Desarrollar las estrategias clave ..	13.10	PUNTOS SOBRESALIENTES	13.25
Desarrollar las metas estratégicas	13.10	REFERENCIAS	13.25
Establecer los valores	13.12		
Comunicar las políticas de la empresa	13.13		

INTRODUCCIÓN

La planificación estratégica es un planteamiento sistemático para definir metas empresariales a largo plazo e identificar los medios de conseguirlas. Una vez que la organización ha establecido sus metas a largo plazo, la planificación estratégica eficaz le permite, año a año, crear un plan anual de empresa que incluye las metas necesarias anuales, los recursos y las acciones que se necesitan para avanzar hacia ese futuro.

Para establecer iniciativas de cambio de cualquier clase en toda la organización (un programa anual de mejora de la calidad, por ejemplo), una organización debe incorporar las iniciativas en el proceso de planificación estratégica y en el plan anual de la empresa. Así se asegurará de que la iniciativa se convierte en parte del plan y no compite por los recursos con las prioridades bien establecidas. De otro modo, la iniciativa de cambio mejor intencionada fracasará.

En los últimos años, la gestión de la calidad total (TQM) se ha convertido en un proceso destacado de cambio y en un candidato natural a la inclusión en el plan estratégico de muchas organizaciones. La integración de la TQM y la planificación estratégica es tan natural que, de hecho, la combinación de TQM y planificación estratégica se ha venido a conocer como un término en sí. Desgraciadamente, diferentes organizaciones han elegido términos diferentes para este proceso. Algunas han usado un término japonés, «hoshin kanri». Otras han traducido parcialmente el término y lo han llamado «planificación hoshin». Y otras han usado una traducción burda de los términos y lo han llamado «despliegue de la política». En una versión anterior del Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige, se llamaba a este proceso «planificación estratégica de la calidad». Más tarde, a este criterio del premio se le cambió el nombre por el de «planificación estratégica». Aunque los criterios de las pautas del Premio definen claramente el carácter de despliegue del concepto, el término planificación estratégica se entiende a menudo erróneamente como la creación del plan estratégico y no como el despliegue cuidadoso de las metas estratégicas, submetas y metas anuales, y la asignación de recursos y acciones para conseguirlas. Intentaremos resaltar esta diferencia y usar el término despliegue estratégico a lo largo de este capítulo. Muchas organizaciones han superado fallos en los programas de cambio y han conseguido resultados de larga duración mediante el despliegue estratégico.

Este capítulo describe el proceso de despliegue estratégico y explica cómo se gestiona dentro de las organizaciones. Desarrolla temas tan importantes como: cómo alinear las metas estratégicas con la visión y la misión de la organización; cómo desplegar estas metas en toda la organización, y cómo derivar beneficios del despliegue estratégico.

Con este propósito, este capítulo:

1. Define el despliegue estratégico de la calidad.
2. Describe los beneficios del despliegue estratégico de la calidad.
3. Describe el planteamiento sistemático del despliegue estratégico de la calidad.
4. Describe algunos de los temas que rodean la introducción del despliegue estratégico de la calidad en una organización.
5. Explica los papeles específicos de la alta dirección en la implantación y el aseguramiento del éxito del despliegue estratégico de la calidad.

¿Qué es el despliegue estratégico? El despliegue estratégico es un planteamiento sistemático para integrar los esfuerzos de mejora enfocados al cliente de toda la organización con el plan estratégico de la organización. Más específicamente, el despliegue estratégico es un proceso sistemático por el que una organización define sus metas a largo plazo con respecto a la calidad, y las integra, sobre una base de igualdad, con los recursos financieros y económicos, el marketing y las metas de investigación y desarrollo, todo dentro de un plan de negocio coherente. El plan se despliega entonces en toda la organización.

Como componente del sistema de gestión de la calidad total, el despliegue estratégico permite a una organización planificar y ejecutar rupturas estratégicas organizativas. A largo plazo, el efecto colectivo pretendido de dichas rupturas es conseguir una ventaja competitiva.

El despliegue estratégico ha evolucionado durante la década de 1990 como parte integral de muchos procesos de cambio en las organizaciones, especialmente la gestión de la calidad total. El despliegue estratégico forma parte del fundamento que sustenta el sistema más amplio de gestión de la calidad total en toda la organización. Las relaciones entre despliegue estratégico de calidad y el sistema más amplio se muestran en la Figura 13.1.

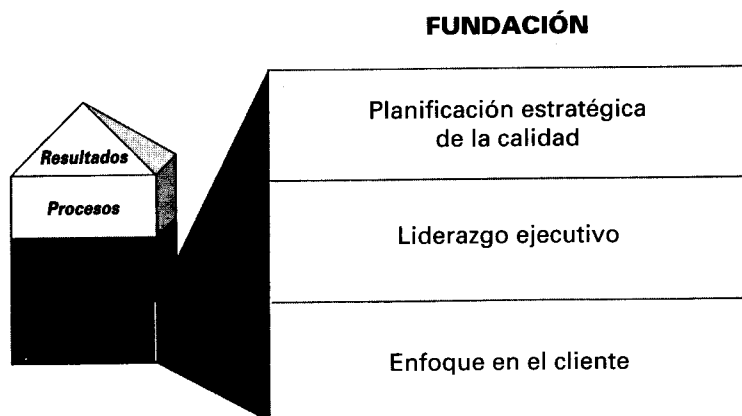


FIGURA 13.1 Relaciones de gestión de la planificación estratégica de la calidad (Juran Institute, Wilton, CT).

El despliegue estratégico es también un elemento clave del Premio Nacional de la Calidad Total Malcolm Baldrige (véase Capítulo 4) y del Premio de la Fundación Europea de Gestión de la Calidad (EFQM), así como de otros premios internacionales y estatales. Los criterios de estos premios destacan que la calidad orientada al cliente y la excelencia del rendimiento operativo son temas estratégicos clave del negocio, que necesitan ser parte integral de la planificación global de la empresa. Una evaluación crítica de los ganadores del Premio Nacional de la Calidad Total Malcolm Baldrige demuestra que aquellas empresas que ganaron el premio aventajaron a las que no lo ganaron (Fig. 13.2). Al cuarto año la calidad rendía, y bien. El «Índice Baldrige» sobrepasó el índice de los 500 valores de Standard & Poor por casi 3 a 1. El índice muestra el crecimiento agregado de las empresas que han ganado el Premio Nacional de la Calidad Total Malcolm Baldrige desde 1988.

Godfrey (1997) ha observado que para ser efectivo el despliegue estratégico deberá usarse como una herramienta, como un medio hacia un fin, no como meta en sí mismo. Deberá ser una tarea que implique a todo el personal de la organización. Debe absorber las actividades existentes, no simplemente añadirse a los platos ya rebosantes. Debe ayudar a la alta dirección a enfrentarse a las dificultades, a fijar prioridades, y no limitarse a empezar nuevas iniciativas, sino eliminar muchas actividades actuales que no añaden valor.

Historia

Planificación estratégica: el pasado. Hasta recientemente, los planes estratégicos consistían normalmente sólo en metas financieras o metas de mercado. El planteamiento puede descri-

	Inversiones 1988-1996	Valor a 12/1/97	Porcentaje de cambio
Todos los premiados	7.496,54\$	33.185,69\$	362
Los 500 de Standard & Poor	7.496,54\$	18.613,28\$	148
Datos: Instituto Nacional de Normas y Tecnología.			

FIGURA 13.2 Resultados del ganador del Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige (Business Week 1998, March 16, p. 60).

birse como «planificación financiera en toda la organización» y forma la base de la mayoría de los planes estratégicos. Este planteamiento consistía en establecer metas financieras, desarrollar planes para cumplir las metas, proporcionar los recursos necesarios, establecer las medidas del rendimiento real, revisar el rendimiento frente a las metas y proporcionar recompensas basadas en los resultados. Daba como resultado el plan de negocio y el presupuesto anuales. Este plan se convertía en el conductor de toda la actividad dentro de la organización. Cuando dicho plan abarcaba un período de cinco años o más, se solía referir a él como un «plan estratégico de negocio». Los resultados de esta tarea permitían a la organización enfocar a todos los empleados en las metas financieras y en los medios de alcanzarlas.

Los principales componentes de este proceso de plan estratégico son:

- *Una jerarquía de metas.* Incluye —pero no se limita a ellas— las metas financieras apoyadas por metas financieras en niveles inferiores, como presupuestos de división y departamento, cuotas de ventas, normas de costes, estimaciones de costes de proyectos, etc.
- *Una metodología formalizada.* Una metodología para establecer las metas (un proceso anual de presupuesto) y para proporcionar los recursos necesarios para alcanzar el plan estratégico y el plan anual del negocio.
- *Una infraestructura.* La infraestructura (normalmente) incluye un comité de finanzas; un controlador a tiempo completo y personal de apoyo, y toda la alta dirección que se reúne regularmente para revisar y ajustar los planes cuando es necesario.
- *Un proceso de control.* El proceso de control incluye mediciones financieras en toda la organización; sistemas de recogida y análisis de datos; informes financieros; revisiones de rendimiento financiero frente a las metas, y ajuste del plan, cuando es necesario.
- *Previsión de recompensas.* Se concede al rendimiento frente a las metas financieras un peso importante dentro del sistema de gestión del rendimiento del personal y de reconocimiento y recompensa de los empleados clave.
- *Participación universal.* Las metas financieras, informes, revisiones, etc., se diseñan de modo jerárquico para ir en paralelo con la jerarquía organizativa de la empresa. Estas metas desplegadas jerárquicamente posibilitan que los directivos de todos los niveles apoyen las metas de la alta dirección.
- *Un lenguaje común.* El proceso de planificación normalmente se enfoca en mediciones importantes y comunes —ingresos y beneficios—, expresadas en una unidad de medida común, una divisa, como el dólar estadounidense. Existen también otras mediciones comunes que son usadas extensamente; los porcentajes como retorno sobre la inversión y retorno sobre ventas son algunos ejemplos. Además, palabras clave, como «presupuesto», «gastos», «beneficio», etc., adquieren un significado estándar, de forma que las comunicaciones se hacen cada vez más precisas. Por tanto, la organización crea un lenguaje que puede entender.
- *Formación.* En organizaciones exitosas es corriente que los empleados de todos los niveles se sometan a formación en varios conceptos, procesos, métodos y herramientas financieros; en otras palabras, aprenden a hablar y a entender el mismo lenguaje. Las empresas que han entrenado así a sus empleados de todas las funciones y de todos los niveles están bien situadas para aventajar a las empresas en las que la formación está limitada al departamento de finanzas.

Planificación estratégica: hoy. El planteamiento utilizado para establecer metas financieras en toda la organización se ha transformado en un plan estratégico más robusto. Para ser efectivo consiguiendo cambios rápidos en un entorno global, muchas organizaciones incorporaron el establecimiento de iniciativas de cambio en toda la organización, como la gestión de la calidad total, dentro del plan estratégico. Los pasos genéricos y las características inherentes a la gestión del plan anual de empresa son igualmente aplicables a la gestión de calidad. Esto hace más fácil incorporar programas de mejora en toda la organización dentro de un plan coherente. En anteriores versiones del Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige se refieren a esto como «plan estratégico de calidad» (SQP). El plan estratégico de calidad deberá incluir:

- *Metas de calidad.* Las principales metas de calidad se incorporan y se apoyan en una jerarquía de metas en los niveles inferiores: submetas, proyectos, etc. Las metas de mejora son metas con el objetivo de crear una ruptura en el rendimiento de un producto, en el proceso de servicio o en el personal, al enfocarse en las necesidades de los clientes, proveedores y accionistas. El plan estratégico de calidad incorpora la voz de los clientes a las metas de calidad y los integra en todo el plan. Esta integración posibilita que las metas sean legítimas y equilibra las metas financieras (que son importantes para los accionistas) con aquellas que son de importancia para los clientes. También elimina la preocupación de que haya dos planes, uno para finanzas y otro para calidad.
- *Una metodología formalizada.* Un proceso sistemático y estructurado para establecer las metas de mejora y proporcionar los recursos:
 - Se crea una nueva infraestructura, que incluye el establecimiento de un equipo de alta dirección o «Consejo Ejecutivo», de una oficina de calidad y de personal de apoyo para revisar todas las metas.
 - Un proceso de revisión y control, que incluye sistemas de recogida y análisis de datos de los clientes, informes de indicadores clave del rendimiento de calidad y revisiones que comparan los resultados con las metas.
- *Previsión de recompensas.* Se concede al rendimiento frente a las metas de mejora un peso importante dentro del sistema de clasificación y reconocimiento del mérito. Se requiere un cambio en la estructura que incluya la recompensa de los comportamientos correctos.
- *Participación universal.* Las metas, informes, revisiones, etc., se diseñan para ganar la participación desde dentro de la jerarquía de la organización. Esta participación implica a todos los empleados de todos los niveles, proporcionando apoyo a las iniciativas de cambio y ayudando a conseguir los resultados deseados.
- *Un lenguaje común.* Términos clave, como calidad, benchmarking y despliegue estratégico de la calidad, adquieren un significado estándar, de forma que las comunicaciones se hacen cada vez más precisas.
- *Formación.* Es corriente que todos los empleados se sometan a formación en varios conceptos, procesos, métodos y herramientas de cambio. Las empresas que han entrenado así a su fuerza de trabajo, de todas las funciones y de todos los niveles y en el momento adecuado, están bien situadas para aventajar a las empresas en las que la formación está limitada al departamento o a los directivos de calidad.

Estos cambios necesarios son numerosos y extensivos. Antes de 1980, los beneficios declarados del establecimiento de las metas de mejora no convencían generalmente a la alta dirección. La mayoría de los motivos están implícitos en esa misma lista de cambios:

- Adaptar la gestión de calidad total o extender la planificación estratégica supone mucho trabajo.
- Añade carga de trabajo tanto a la alta dirección como a los directivos de los niveles inferiores.
- Resulta muy perturbador para el modelo cultural establecido.
- «Lo hemos intentado y ha fallado».

Pero para competir globalmente, las organizaciones han necesitado sacar el máximo de sus activos y recursos. El despliegue estratégico proporciona los medios para conseguir esto.

¿Por qué el despliegue estratégico? Sus beneficios. La primera pregunta que surge a menudo en las etapas iniciales del despliegue estratégico en una organización es: ¿Por qué hacerlo? ¿Puede ayudarnos a convertirnos en un competidor global? Para contestar a estas preguntas se requiere una mirada a lo que otras organizaciones han conseguido con el despliegue estratégico. Ellas informan de que el despliegue estratégico:

1. Centra los recursos de la organización en las actividades que son esenciales para aumentar la satisfacción del cliente, bajar los costes y aumentar el valor para el accionista (véase Figura 13.2).
2. Crea un sistema de planificación e implantación que es perceptivo, disciplinado y flexible.
3. Alienta la cooperación entre departamentos.
4. Proporciona un proceso para ejecutar rupturas año tras año.
5. Confiere poder a directivos y empleados al proporcionarles la autoridad para llevar a cabo las actividades planificadas.
6. Elimina las actividades de equipo innecesarias y costosas que no están en el plan.
7. Elimina la existencia de muchos planes potencialmente conflictivos: el plan financiero, el plan de marketing, el plan tecnológico y el plan de mejora.
8. Centra los recursos en asegurar que los planes financieros son alcanzables.

Distintas organizaciones han intentado implantar sistemas de gestión de la calidad total, así como otros sistemas de cambio de la gestión. Algunas organizaciones han conseguido resultados asombrosos; otras se han decepcionado con sus resultados, consiguiendo a menudo poco en el tema del ahorro en los beneficios o en el del aumento de la satisfacción del cliente. Algunas de estas iniciativas se han clasificado como fallos. Una de las principales causas de estas decepciones radica en la incapacidad de incorporar estos «programas de calidad» en los planes de negocio de la organización. Otros motivos de fallo fueron que:

1. La planificación estratégica se asignó a los departamentos de planificación, no a la propia alta dirección. Estos planificadores carecían de formación en conceptos y métodos y no estaban entre los que tomaban las decisiones en la organización. Esto llevó a que el plan estratégico no incluyera metas de mejora dirigidas a la satisfacción del cliente, mejora de procesos, etc.
2. Los departamentos individuales estuvieron persiguiendo sus propias metas departamentales, y descuidaron integrarlas en las metas globales de la organización.
3. Los nuevos productos o servicios siguieron siendo diseñados con fallos procedentes de anteriores diseños que se trasladaron a los nuevos modelos, año tras año. No se evaluaron o mejoraron los nuevos diseños, y por tanto no se orientaron al cliente.
4. Los proyectos multifuncionales de «reingeniería» sufrieron demoras y pérdidas económicas debido a una participación inadecuada y a falta de advertencias rápidas de la alta dirección, y acabaron antes de que se consiguieran resultados positivos.
5. No se había fijado una responsabilidad clara para reducir la duración de los ciclos o el desperdicio asociados con los procesos de negocio principales. Las responsabilidades claras se limitaron a los procesos locales (intradepartamentales).
6. Se asumió que las metas de mejora se aplicaban sólo a los productos manufacturados y a los procesos de fabricación. Los clientes se irritaron no sólo por recibir productos defectuosos, sino por recibir facturas incorrectas y por entregas retrasadas. Los procesos de empresa que producían las facturas y las entregas no estaban sujetos a una planificación de calidad y mejora modernas, porque en el plan anual no existían metas para hacerlo así.

Las deficiencias de los anteriores procesos de planificación estratégica tuvieron su origen en la falta de un planteamiento sistemático y estructurado que integrase los programas en un solo plan. A medida que más empresas se familiarizaron con el despliegue estratégico de la calidad, muchas adoptaron sus técnicas que tratan la gestión del cambio sobre la misma base que la gestión de las finanzas en toda la organización. El remedio está en lo que llamamos despliegue estratégico.

LANZAMIENTO DEL DESPLIEGUE ESTRATÉGICO

La creación de un plan estratégico que esté enfocado en el cliente requiere que los líderes se conviertan en entrenadores y profesores personalmente implicados, que se elimine el ambiente de reproches y que se tomen decisiones con los mejores datos disponibles. Juran (1988) declaró:

Usted necesita la participación de las personas que van a recibir el impacto, no meramente en la ejecución del plan, sino en la misma planificación. Tiene que ser capaz de ir lentamente, sin sorpresas, usar puntos de prueba para conseguir que se comprenda qué son algunas cosas que están perjudicando y corregirlas.

El proceso del despliegue estratégico. El proceso del despliegue estratégico requiere que una organización incorpore el enfoque en el cliente a la visión, misión, valores, políticas y estrategias de la organización, y a sus metas y proyectos a largo y corto plazo. Los proyectos son actividades del día a día o del mes a mes, que enlazan las actividades de mejora de la calidad, las iniciativas de reingeniería y los equipos de planificación de la calidad a los objetivos de negocio de la organización.

Los elementos necesarios para establecer el despliegue estratégico son generalmente parecidos para todas las organizaciones. Sin embargo, el carácter único de cada organización determinará la secuencia y el ritmo de aplicación y la cantidad de elementos adicionales que hay que proporcionar.

Se usa una extensa jerga para comunicar el proceso del despliegue estratégico. Dependiendo de la organización, se pueden usar distintos términos para describir conceptos similares. Por ejemplo, lo que una organización llama visión, otra organización lo llama misión (véase Figura 13.3).

Las siguientes definiciones están muy extendidas y se usan en este capítulo:

- **Visión.** Un estado futuro deseado para la organización. La imaginación y la inspiración son componentes importantes de una visión. Normalmente, se puede considerar una visión como la meta última de la organización, una que puede tardar 5 o incluso 10 años en alcanzarse.
- **Misión.** El propósito o razón de existir de la organización, es decir, qué hacemos y a quién servimos.
- **Estrategias.** Medios para alcanzar la visión. Las estrategias son pocas y definen los factores clave del éxito, como precio, valor, tecnología, cuota de mercado y cultura, que la organización debe perseguir. A veces se alude a las estrategias como «objetivos clave» o «metas a largo plazo».
- **Metas.** Lo que la organización debe conseguir en un período de 1 a 3 años; el objetivo o fin al que se dirige el trabajo. Se dice que las metas son «a largo plazo» (2 a 3 años) y «a corto plazo» (1 a 2 años). La consecución de las metas señala la ejecución de una estrategia con éxito.
- **Valores.** Lo que la organización postula y cree.

Definiciones seleccionadas

Misión:	En qué negocio estamos.
Visión:	Estado futuro deseado de la organización.
Valores:	Principios a observar para alcanzar la visión, o Principios a cumplir para alcanzar la visión.
Política:	Compromiso con el cliente.

FIGURA 13.3 Visión/misión de la organización (Juran Institute, Wilton, CT).

- *Políticas.* Una guía para la acción de la dirección. Una organización puede tener políticas en cierto número de áreas: calidad, medio ambiente, seguridad, recursos humanos, etcétera. Estas políticas guían la toma de decisiones diaria.
- *Proyecto.* Una actividad cuya duración es de 3 a 9 meses, que se ocupa una meta desplegada y cuyo término exitoso contribuye a asegurar que se han conseguido las metas estratégicas. Un proyecto normalmente debe implicar la asignación de personas seleccionadas a un equipo al que se le confiere responsabilidad y autoridad para conseguir la meta específica.
- *Plan de despliegue.* Para convertir una visión en acción, la visión debe descomponerse y traducirse a partes cada vez más pequeñas y más específicas —estrategias clave, metas estratégicas, etc.— hasta el nivel de proyectos e incluso de acciones departamentales. Al plan detallado para su descomposición y distribución por toda la organización se le llama el «plan de despliegue». Incluye la asignación de papeles y responsabilidades y la identificación de los recursos necesarios para implantarlo y alcanzar las metas del proyecto (Fig. 13.4).
- *Indicadores clave del rendimiento.* Mediciones que son visibles en toda la organización para evaluar el grado en que se está consiguiendo el plan estratégico.

LOS ELEMENTOS DEL DESPLIEGUE ESTRATÉGICO

Establecer la visión. El despliegue estratégico empieza con una visión que está enfocada en el cliente:

En las empresas sabemos que están haciendo con éxito una transición hacia una organización más colaboradora, la clave del éxito está en desarrollar y vivir con una visión estratégica común. Cuando usted esté de acuerdo en una dirección global, podrá ser flexible sobre los medios para alcanzarla... (Tregoe y Tobia 1990).

Las visiones realmente potentes se enuncian con sencillez. Los Diez Mandamientos, la Declaración de Independencia, un discurso de Winston Churchill en la Segunda Guerra Mundial; todos son mensajes tan sencillos y directos que casi se les puede tocar. Nuestras estrategias corporativas deberán ser igualmente apremiantes (Roberts 1987).

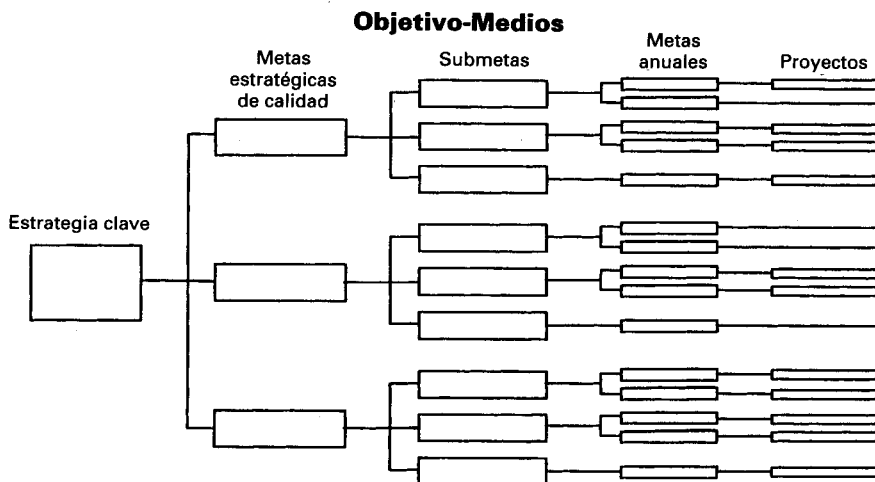


FIGURA 13.4 Desplegando la visión (*Juran Institute, Wilton, CT*).

Una visión deberá definir los beneficios que un cliente, un empleado, un accionista, o la sociedad en general, puede esperar de la organización:

Seremos líderes en la provisión de asistencia sanitaria de calidad, asequible y que exceda las expectativas de servicio y valor de nuestros clientes (Kaiser-Permanente).

Ser la empresa líder de la pila de consumo en el mundo (Duracell International).

Diseñar, producir y comercializar los mejores automóviles del mundo (Cadillac Motor Car Division).

Ser los mejores productores de viviendas prefabricadas y los más fáciles de tratar (Schult Homes).

Ser el proveedor número uno de aparatos ortopédicos médicos del mundo (Howmedica).

Cada una de las anteriores visiones ofrece un punto de vista distinto de la dirección y carácter de la organización. Cada una de ellas transmite una imagen general a los clientes y empleados de adónde se dirige la organización. A la organización la visión le proporciona, con frecuencia por primera vez en su historia, una imagen clara de adónde se dirige y por qué va hacia allí.

Las buenas declaraciones de visión deberán ser apremiantes y compartidas por toda la organización. A menudo es una buena idea hacer que la visión suponga una tensión para la organización, pero con posibilidad de lograrse en un plazo de 3 a 5 años y declarar un logro mensurable (v.g., ser el mejor). Al crear la visión, las organizaciones deberán tener en cuenta a sus clientes, a los mercados en que quieren competir, al entorno en el que opera la organización y al estado actual de la cultura de la organización.

Las declaraciones de visión, en sí mismas, son poco más que palabras. La publicación de dicha declaración no informa a los miembros de una organización de qué deberán hacer de modo diferente de como lo han hecho en el pasado. El proceso del despliegue estratégico y el plan estratégico se convierten en la base para hacer realidad la visión. Las palabras de la visión son sólo un recordatorio de lo que persigue la organización. La visión debe ser ejecutada mediante hechos y acción.

Algunas trampas al formar la visión son:

1. Enfocar la visión exclusivamente en los accionistas como clientes.
2. Pensar que una vez que el plan estratégico esté redactado se llevará a cabo sin más trabajo.
3. Fallar en explicar la visión como un beneficio para los clientes, empleados, proveedores y otros grupos con intereses.
4. Crear una visión que o es demasiado fácil o demasiado difícil de alcanzar.
5. Fallar en considerar los efectos que tendrán en un futuro de 3 a 5 años los rápidos cambios que están ocurriendo en la economía global.
6. Fallar en implicar a los empleados clave de todos los niveles al crear la visión.
7. Fallar en hacer benchmarking de los competidores o en considerar todas las posibles fuentes de información sobre necesidades futuras, capacidades internas y tendencias externas.

Acuerdo sobre una misión. La mayoría de las organizaciones tiene también una declaración de misión. Una declaración de misión se designa para contestar a la pregunta «¿En qué negocio, o negocios, estamos?». Con frecuencia se confunde una misión con una visión e incluso se publican como una sola. Una declaración de misión deberá aclarar el propósito de la organización o la razón de su existencia. Eso es todo.

Veamos algunos ejemplos:

El Hotel Ritz-Carlton es un lugar en el que la atención genuina a nuestros huéspedes y su comodidad es nuestra misión suprema (Hotel Ritz-Carlton).

Existimos para crear, hacer y comercializar productos y servicios útiles que satisfagan las necesidades de nuestros clientes en todo el mundo (Texas Instruments).

Nuestra misión es ser líder en la satisfacción de las necesidades de atención sanitaria presentes y futuras de las personas de nuestras comunidades, a través de servicios de alta calidad, programas de formación e investigación que compartan metas y valores comunes (Sentara Health System).

En el ejemplo de Sentara, las referencias al liderazgo y al futuro pueden inducir al lector a confundir esta declaración de misión (en qué negocio estamos) con una declaración de visión (qué nos proponemos llegar a ser). Sólo la propia organización puede decidir si estas palabras corresponden a su declaración de misión. Precisamente debatiendo tales puntos es como una organización logra el consenso entre su visión y su misión.

Juntas, la visión y la misión proporcionan una dirección común y acordada a la organización entera. Esta dirección se puede usar como base para la toma de decisiones diaria.

Desarrollar las estrategias clave. El primer paso en la conversión de la visión en un plan alcanzable es descomponer la visión en un pequeño número (normalmente cuatro o cinco) de estrategias clave. Las estrategias clave representan las elecciones más fundamentales que la organización hará sobre cómo caminar hacia la consecución de la visión. Cada estrategia debe contribuir de un modo significativo a la visión global. Por ejemplo:

Apoyando el liderazgo mediante plataformas de calidad: orientación al cliente, implicación de los empleados, benchmarking, uso de herramientas de calidad, planificación de la calidad y enfoque en el cliente (Xerox).

Tres estrategias cruciales implantadas para transformar Cadillac: un cambio cultural en el que el trabajo de equipo y la implicación de los empleados son considerados como una ventaja competitiva; un enfoque en el cliente con la satisfacción del cliente como plan maestro, y un acercamiento más disciplinado a la planificación que enfoca a todos los empleados a los objetivos de calidad (Cadillac Motor Car Division).

La responsabilidad de ejecutar estas estrategias clave se distribuye (o despliega) entre los ejecutivos clave de la organización, primer paso en una sucesión de subdivisiones y despliegues por los que la visión se convierte en acción.

Para determinar cuáles deberán ser las estrategias clave se necesita evaluar cinco áreas de la organización y obtener los datos necesarios sobre:

1. Fidelidad del cliente, satisfacción del cliente.
2. Costes relacionados con la baja calidad.
3. Cultura de la organización (satisfacción).
4. Proceso interno del negocio (incluidos proveedores).
5. Benchmarking competitivo.

Cada una de estas evaluaciones puede formar la base de una tabla de puntuaciones de un negocio equilibrado (véase la tabla de puntuaciones más adelante en este capítulo). La fijación de las estrategias clave requiere datos específicos sobre la posición de la calidad y el entorno. Estos datos deben analizarse para descubrir los puntos fuertes y los puntos débiles, las oportunidades y las amenazas en lo que se relaciona con los clientes, la calidad y los costes. Una vez completo, se pueden crear las estrategias clave o modificarlas para que reflejen las metas a largo plazo mensurables y observables.

Desarrollar las metas estratégicas

El carácter de las metas estratégicas. A continuación, la organización fija las metas estratégicas mensurables que deben alcanzarse para que la estrategia en general sea un éxito. Estas metas cuantitativas guiarán los esfuerzos de la organización hacia la consecución de cada estrategia. Tal como se usa aquí, una meta es un objetivo al que se apunta. Una meta debe ser específica. Debe ser cuantificable (mensurable) y ha de cumplirse en un período específico de tiempo. Al principio, una organización puede no saber cuán específica deberá ser la meta. Con el tiempo, los sistemas de medida mejorarán y la fijación de la meta se hará más específica y más mensurable.

A pesar del carácter único de las organizaciones y sectores específicos, ciertos temas relacionados con las metas son aplicables generalmente. Hay siete áreas que se requieren como mínimo para asegurar que se han establecido las metas adecuadas. Se trata de:

- *Rendimiento del producto.* Las metas en esta área se relacionan con las características del producto que determinan la respuesta a las necesidades de los clientes, v.g., la rapidez en el servicio, el consumo de carburantes, el tiempo medio entre fallos y la cortesía. Estas características del producto influyen sobre la posibilidad de venta del producto e impactan sobre los beneficios cuando se cumplen.
- *Rendimiento competitivo.* Éste ha sido siempre una meta en las economías basadas de mercado, pero raras veces ha sido parte del plan de negocio. La tendencia a hacer del rendimiento competitivo una meta a largo plazo del negocio es reciente, pero irreversible. Difiere de otras metas en que fija el objetivo en relación con la competencia, lo que en una economía global es un objetivo en rápido movimiento. Por ejemplo, todos nuestros productos serán considerados como «los mejores en su clase» al año de su introducción, al compararlos con productos de los cinco principales competidores.
- *Mejora de la calidad.* Las metas en esta área pueden apuntar a las deficiencias del producto o a los fallos del proceso o a la reducción del desperdicio debido a la baja calidad en el sistema. Las metas de mejora se despliegan mediante una estructura formal de proyectos de mejora de la calidad, con asignación de las responsabilidades asociadas. Colectivamente, estos proyectos se enfocan a la reducción de deficiencias en la organización, llevando, por tanto, a un rendimiento mejorado.
- *Coste de la baja calidad.* Las metas relacionadas con la baja calidad incluyen normalmente una meta de reducción de los costes debidos a la baja calidad o al desperdicio en los procesos. Estos costes no se conocen con precisión, aunque se estima que son muy altos. Sin embargo, es factible, mediante estimaciones, introducir esta meta en el plan del negocio y desplegarlo con éxito a los niveles inferiores. Una meta típica coste-de-la-mala-calidad es reducir el coste de la baja calidad al 50 por ciento cada año durante 3 años.
- *Rendimiento de los procesos del negocio.* Las metas en esta área han entrado sólo recientemente en el plan estratégico del negocio. Las metas se relacionan con el rendimiento de los principales procesos, que son por naturaleza multifuncionales —v.g., el desarrollo de un nuevo producto, la gestión de la cadena de proveedores y la tecnología de la información, y los subprocesos, como recepción de cuentas y compras. Para tales macroprocesos, un problema especial consiste en decidir quién deberá tener la responsabilidad de cumplir con la meta. Debatisimos esto más adelante, bajo ¿Despliegue a quién?
- *Satisfacción del cliente.* La fijación de metas específicas de satisfacción del cliente ayuda a mantener a la organización enfocada en el cliente. El despliegue de estas metas requiere, claramente, un gran número de datos fiables sobre el nivel actual de satisfacción/insatisfacción y sobre qué factores contribuirán a aumentar la satisfacción y eliminar la insatisfacción. Si se conocen las necesidades más importantes de los clientes, se pueden alterar las estrategias de la organización para cumplir con esas necesidades más eficazmente.
- *Fidelidad y retención del cliente.* Más allá de la medida directa de la satisfacción del cliente, resulta todavía más útil comprender el concepto de fidelidad del cliente. La fidelidad del cliente es una medida del comportamiento de compra del cliente cara a cara de un proveedor determinado. De un cliente que necesita un producto ofrecido por el proveedor A y que compra solamente a este proveedor, se dice que despliega una fidelidad con respecto de A del 100 por ciento. Un estudio de la fidelidad abre la organización a un mejor entendimiento de la capacidad de venta del producto desde el punto de vista del cliente y le proporciona el incentivo para determinar cómo satisfacer mejor las necesidades del cliente. La organización puede hacer benchmarking para descubrir el rendimiento de la competencia y luego fijar las metas para mejorar este rendimiento (véase Figura 13.5).

Las metas seleccionadas para el plan anual del negocio se eligen de una lista de preselección hecha por todos los niveles jerárquicos. Sólo unas pocas de las preseleccionadas pasarán el proceso de filtro y acabarán como parte del plan de negocio de toda la organización. Otras

Rendimiento del producto (enfoque en el cliente). Esto se relaciona con las características del rendimiento que determinan la respuesta a las necesidades del cliente, como la rapidez en el servicio, el consumo de carburantes, el tiempo medio entre fallos y la cortesía. (El producto abarca bienes y servicios).

Rendimiento competitivo. Igualar o mejorar el rendimiento competitivo ha sido siempre una meta. Lo nuevo es colocarlo dentro del plan del negocio.

Mejora de la calidad. Es una meta nueva. Está ordenada por el hecho de que la tasa de mejora de la calidad decide quién será el líder en calidad del futuro.

Reducción del coste de la baja calidad. La meta aquí se relaciona con ser competitivo en cuanto a costes. Las medidas del coste de la baja calidad deben basarse en estimaciones.

Rendimiento de los macroprocesos. Esto se relaciona con el rendimiento de los principales procesos multifuncionales, como facturación, compras y lanzamiento de productos nuevos.

FIGURA 13.5 Metas de calidad en el plan de negocio (*Juran Institute, Wilton, CT*).

preseleccionadas pueden entrar, en cambio, los planes de negocio a niveles inferiores de la organización. Se rechazarán muchas preseleccionadas porque no logran atraer la necesaria prioridad y por tanto no obtendrán los recursos de la organización.

La alta dirección deberá ser una fuente importante de preselección de metas estratégicas, ya que recibe datos importantes de fuentes tales como los miembros del comité ejecutivo, los contactos con los clientes, las revisiones periódicas del rendimiento del negocio, los contactos con la alta dirección de otras organizaciones, los accionistas y las quejas de los empleados.

Las metas que afectan a la capacidad de venta del producto y a su generación de beneficios deberán basarse principalmente en alcanzar o sobrepasar la calidad del mercado. Algunas de estas metas tienen relación con proyectos que tienen una duración larga, v.g., el desarrollo de un nuevo producto que supone una duración de varios años, la automatización de un proceso importante del negocio, un proyecto de larga elaboración que no se encargará en varios años. En tales casos, se deberá fijar la meta de modo que alcance a la competencia que se estima que predominará cuando estos productos estén completos, saltando así por encima de la competencia.

En los sectores que son monopolios naturales (v.g., ciertos servicios), las organizaciones pueden a menudo hacer comparaciones mediante el uso de bancos de datos del sector. En algunas organizaciones existe también una competencia interna: los resultados de las sucursales regionales se comparan entre sí.

Otros departamentos internos pueden ser también monopolios internos. No obstante, la mayoría de los monopolios internos tiene competidores potenciales: proveedores externos que ofrecen los mismos servicios. El rendimiento del proveedor interno puede compararse con las propuestas ofrecidas por un proveedor externo.

Una tercera y ampliamente usada base para fijar las metas ha sido el rendimiento histórico. Para algunos productos y procesos, la base histórica es una ayuda para la necesaria estabilidad. Para otros casos, especialmente aquellos que implican altos costes crónicos de baja calidad, la base histórica ha hecho un montón de daño al ayudar a perpetuar un rendimiento crónicamente despilfarrador. Durante los procesos de fijación de metas, la alta dirección deberá estar alerta sobre dicho mal uso de los datos históricos. Las metas para un coste crónicamente alto de baja calidad deberán basarse en rupturas planeadas usando los procesos de mejora de la calidad descritos en el Capítulo 5.

Establecer los valores. Algunas organizaciones crean declaraciones de valores para definirse mejor a sí mismas. Valores es aquello que una organización postula y en lo que cree. Una lista de valores debe apoyarse en acciones y hechos desde la gestión, a menos de crear cinismo en la organización. La formación y la comunicación de valores a todos los empleados se

convierte en un requisito previo para la participación en el proceso de planificación. Deben cambiarse las políticas de la organización para apoyar los valores de la organización. Algunos ejemplos de valores publicados son:

Respeto constante por las personas, integridad inexorable (Motorola).

Vivir los valores que hemos establecido, una cultura que apoye el enfoque en el cliente, la moral positiva, la cesión de autoridad y la satisfacción por la tarea. Los valores que nos guían son: contento del cliente, compromiso, trabajo en equipo, mejora continua, confianza e integridad, y respeto mutuo (AT&T).

Las declaraciones de valores están ganando popularidad en muchas organizaciones. Proporciona un recordatorio de lo que es importante al llevar a cabo el plan estratégico.

Comunicar las políticas de la empresa. Se usa aquí «política» como guía de la acción directiva. La publicación de las declaraciones de política es el resultado de largas deliberaciones por la gestión, seguidas de la aprobación al más alto nivel. El equipo ejecutivo superior o el comité de calidad juega un papel destacado en este proceso.

Las declaraciones de política son una necesidad durante un período de cambio importante y las organizaciones han actuado en consecuencia. Desde los años 1980 hemos visto un incremento sin precedentes de la actividad de la publicación de las «políticas de calidad». Aunque los detalles difieren, las políticas publicadas tienen mucho en común entre unas empresas y otras. Por ejemplo, la mayoría de las políticas publicadas de calidad declara la intención de cumplir con las necesidades de los clientes. La redacción a menudo incluye la identificación de las necesidades específicas que deben cumplirse, v.g., «Los productos de la empresa deberán proporcionar satisfacción al cliente».

La mayoría de las políticas publicadas incluye palabras relativas a la calidad, v.g., «Los productos de nuestra empresa deberán igualar o mejorar los de la competencia».

Una tercera área frecuente de las políticas publicadas de calidad se relaciona con la mejora de la calidad, declarando, por ejemplo, la intención de realizar mejoras anualmente.

Algunas declaraciones de política de calidad incluyen referencias específicas a los clientes internos o indican que el esfuerzo de mejora deberá extenderse a todas las fases del negocio. Por ejemplo:

Reilly Industries se dedica a satisfacer o mejorar las demandas de todos nuestros clientes, tanto internos como externos, con nuestros productos y servicios. Conseguir la satisfacción del cliente mediante la mejora continua de la calidad de nuestros productos, procesos y servicios requiere el compromiso total de todos nuestros empleados. Para apoyar este compromiso, nos aseguraremos de que estén disponibles el entorno, formación y herramientas necesarios.

La política de calidad de Chrysler Corporation es:

Ser el mejor. Esta política requiere que cada persona y cada unidad operativa entienda completamente las demandas de sus clientes y entregue productos y servicios que satisfagan estas demandas a un nivel libre de defectos (Chrysler Corporation).

La imposición de las políticas es un problema nuevo debido a la relativa novedad de las políticas de calidad documentadas. En algunas organizaciones se tiene prevista una revisión independiente de adhesión a las políticas. La ISO 9000, la norma internacional de aseguramiento de la calidad, requiere que la política de calidad sea una declaración de intenciones de satisfacción de las necesidades de los clientes. Es mandatario un proceso de auditoría para asegurar que se realiza la política.

Liderazgo de la alta dirección. Un paso fundamental en el establecimiento de cualquier plan estratégico es la participación de la alta dirección actuando como un consejo ejecutivo. Generalmente sus miembros son ejecutivos clave. La gestión a alto nivel debe formar un equi-

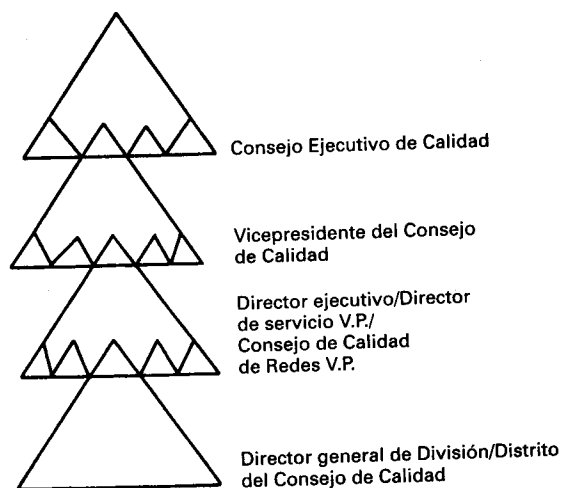


FIGURA 13.6 Consejos vinculados (*Juran Institute, Wilton, CT*).

po para determinar y acordar la dirección estratégica de la organización. Se forma el consejo para supervisar y coordinar todas las actividades estratégicas destinadas a conseguir el plan estratégico. El consejo es responsable de la ejecución del plan estratégico del negocio y de controlar los indicadores clave del rendimiento. Al más alto nivel de la organización, el consejo ejecutivo se deberá reunir mensual o trimestralmente.

El consejo ejecutivo es también responsable de asegurar que las otras unidades del negocio tienen un consejo similar en los niveles subordinados de la organización. En estos casos, los consejos están vinculados, es decir, miembros de los consejos de alto nivel sirven como presidentes de los consejos de nivel inferior (véase Figura 13.6).

Si no existe ya un consejo o algo similar, la organización tendrá que crearlo. En una organización global, los procesos son demasiado complejos para ser dirigidos funcionalmente. Un consejo asegura que un equipo multifuncional que está trabajando conjuntamente maximice la eficacia y efectividad del proceso. Aunque esto pueda parecer fácil, en la práctica no lo es. Los miembros superiores del equipo de dirección pueden no querer renunciar a los monopolios de que han disfrutado en el pasado. Por ejemplo, el director de ventas y marketing está acostumbrado a definir las necesidades de los clientes; el director de ingeniería está acostumbrado a tener la responsabilidad única de crear productos, y el director de fabricación ha gozado de entera libertad para fabricar productos. De momento, estos directivos no renunciarán fácilmente a sus monopolios para convertirse en jugadores de un equipo.

Desplegar las metas. El despliegue de metas a largo y a corto plazo es la conversión de las metas en planes operativos y proyectos. Tal como se usa aquí, despliegue significa subdividir las metas y asignar submetas a niveles inferiores. Esta conversión requiere una atención esmerada a detalles como las acciones necesarias para satisfacer estas metas, quién debe emprender estas acciones, los recursos necesarios, y calendarios y jalones planeados. Para tener éxito en el despliegue se requiere el establecimiento de una infraestructura que gestione el plan. Se despliegan las metas a los equipos funcionales, las funciones y las personas (véase Figura 13.7).

Subdividir las metas. Una vez que se han acordado las metas estratégicas, se deben subdividir y comunicar a los niveles inferiores. El proceso de despliegue incluye también la división de las metas más amplias en elementos manejables (metas o proyecto a corto plazo). Por ejemplo:

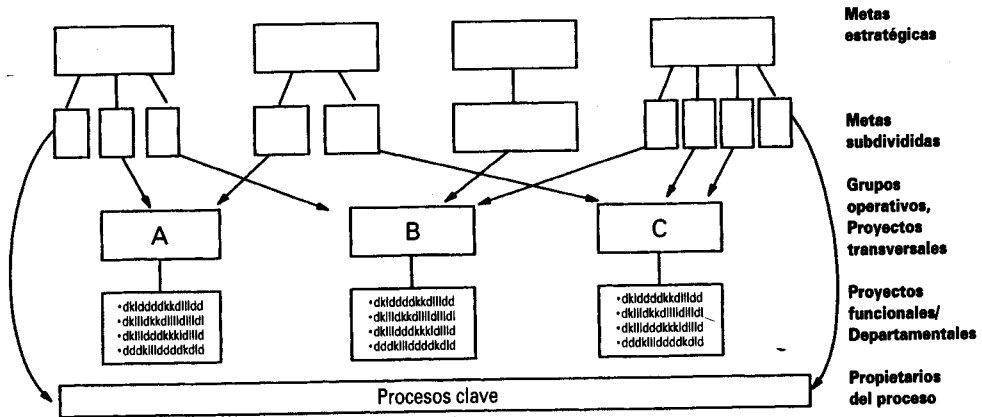


FIGURA 13.7 Despliegue de las metas estratégicas (Juran Institute Wilton, CT).

1. La meta de una compañía aérea de conseguir un 95 por ciento de llegar a tiempo requiere proyectos específicos a corto plazo (8 a 12 meses) para tratar con asuntos como:
 - La política de retrasar las salidas para acomodar los vuelos de conexión retrasados.
 - La organización de toma de decisiones en las puertas de salida.
 - La disponibilidad de equipo que limpie el aparato.
 - La necesidad de revisiones en los procedimientos departamentales.
 - El estado del comportamiento y concienciación de los empleados.
2. La meta de un hospital de mejorar el estado de salud de las comunidades a las que sirve puede requerir proyectos para:
 - Reducir la incidencia de trastornos y enfermedades que se pueden prevenir.
 - Mejorar el acceso del paciente a los cuidados.
 - Mejorar la gestión de las condiciones crónicas.
 - Desarrollar nuevos servicios y programas en respuesta a necesidades de la comunidad.

Este despliegue logra varios propósitos esenciales:

- La subdivisión continúa hasta que identifica las actuaciones específicas a realizar.
- La asignación continúa hasta que asigna la responsabilidad específica por realizar las actuaciones específicas.

Aquellos a quien se ha asignado la responsabilidad responden determinando los recursos necesarios y comunicándolo a los más altos niveles. Muchas veces el consejo debe definir los proyectos específicos, junto con los reglamentos del equipo y los miembros del equipo, para asegurar que se cumplen las metas (véase Figura 13.8). (Para más información sobre el proceso de mejora, véase el Capítulo 5, «El proceso de mejora de la calidad».)

Despliegue, ¿a quién? El proceso del despliegue empieza con la identificación de las necesidades de la organización y la alta dirección. Estas necesidades determinan qué actuaciones se requieren. El proceso del despliegue lleva a un conjunto óptimo de metas mediante la toma en consideración de los recursos requeridos. Los proyectos específicos que se van a ejecutar apuntan a las metas subdivididas. Por ejemplo, en los primeros años de la década de los ochenta, la meta recién diseñada para el Ford Taurus/Sable de ser «el mejor de su clase» se dividió en más de 400 submetas específicas, cada una relacionada con una característica específica del producto. El esfuerzo total de planificación fue enorme y requirió más de 1.500 equipos de proyecto.

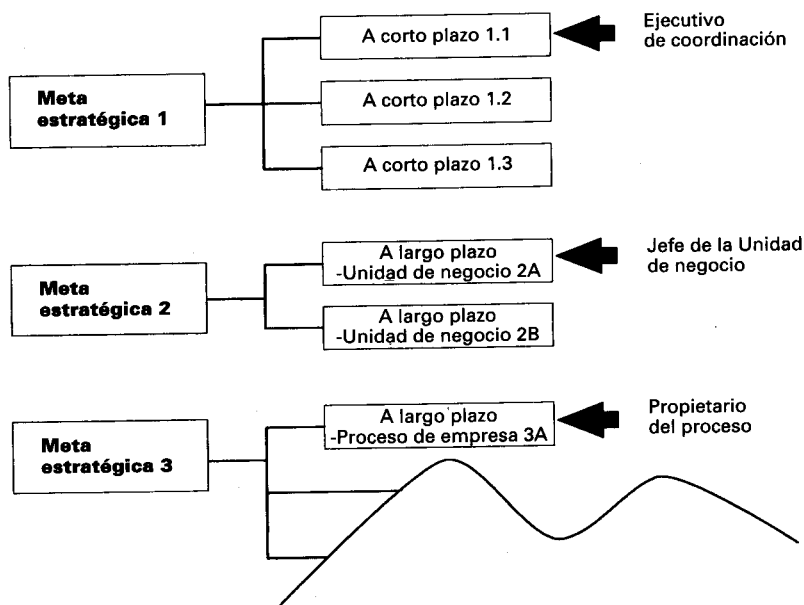


FIGURA 13.8 Submetas (Juran Institute, Wilton, CT).

Hasta cierto grado, el despliegue puede seguir la línea jerárquica, como de empresa a división y de división a función. Sin embargo, este sencillo arreglo falla cuando las metas se relacionan con procesos transversales del negocio y con problemas que afectan a los clientes.

Las principales actividades de las organizaciones son desempeñadas por la utilización de redes de procesos de negocio interconectadas. Cada proceso de negocio es un sistema multifuncional consistente en series de operaciones secuenciales. Dado que es multifuncional, el proceso no tiene un solo «propietario», por lo que no es obvia la respuesta a la pregunta Despliegue, ¿a quién? El despliegue se hace, por tanto, a los equipos multifuncionales. A la conclusión del proyecto del equipo se identifica un propietario. Entonces el propietario (que puede ser más de una persona) controla y mantiene el proceso del negocio (véase el Capítulo 6, «Gestión de los procesos»).

Comunicar el plan: «Atrapar la bola». Una vez que se han establecido, las metas se comunican a las unidades adecuadas de la organización. En efecto, el liderazgo ejecutivo pregunta a su alta dirección «¿Qué necesita para apoyar esta meta?». El siguiente nivel de ejecutivos discute la meta y formula a sus subordinados una pregunta similar, y así consecutivamente. Se resumen las respuestas y se pasan a los ejecutivos superiores. Este proceso se puede repetir varias veces hasta que haya un acuerdo general sobre el plan final.

Este proceso de comunicación de doble vía se llama «atrapar la bola», término acuñado por los japoneses. El «atrapar la bola» incluye lo siguiente:

1. Comunicación clara de lo que la alta dirección propone como áreas clave de planteamiento del plan estratégico para el próximo año de negocio.
2. Identificación y designación de otras áreas para atención de la organización efectuadas por los directivos de varios niveles.
3. Decisiones sobre lo que los departamentos y funciones deberán hacer sobre las áreas identificadas en el plan.

Esta comunicación de doble vía requiere que se forme a los receptores sobre cómo responder. La formación más útil es la experiencia previa en mejora de la calidad. La información procedente de organizaciones que usan atrapar la bola sugiere que supere el proceso de fijación de meta unilateral por la alta dirección. Por ejemplo, Fannie Mae, una empresa de servicios financieros, ha tenido mucho éxito en la introducción de su plan estratégico de calidad. Durante un período de 6 a 9 meses, Fannie Mae desarrolló un plan estratégico de calidad, con su misión, visión, estrategias clave y metas estratégicas. Usaron atrapar la bola como ejercicio de construcción de equipo y como una oportunidad para que los directivos superiores expresaran claramente qué dirección y metas deseaban para Fannie Mae. Una vez que los directivos superiores esbozaron la misión, visión y estrategias clave originales, pidieron a los directores y ejecutivos de nivel medio que hicieran comentarios durante sesiones de grupo de trabajo altamente interactivas. También desarrollaron borradores de metas estratégicas durante estas sesiones. Los casi 100 directores y ejecutivos crearon un caudal de ideas. A continuación, los directivos superiores refinaron estas metas estratégicas e incorporaron muchos de los comentarios sobre misión, visión y estrategias clave al plan siguiente. Luego implicaron a más de 600 directores y supervisores en más sesiones de trabajo interactivas para obtener más comentarios e ideas para desplegar las metas en submetas y proyectos específicos. Al final, los directivos superiores se presentaron con la versión final de las claves estratégicas y las metas para los 5 años siguientes. Esta visión se presentó entonces a cada una de las personas implicadas para que dieran su acuerdo y lo firmaran.

Union Electric Company (UE) formó equipos líder en cada departamento para desplegar eficazmente los objetivos hasta el nivel más bajo de la organización. (En UE este nivel es el nivel departamental). Esto permitió que de estos niveles inferiores se involucrara en el proceso de planificación del negocio más gente que nunca antes (Weigel 1990).

Una herramienta útil para el despliegue. El diagrama en árbol es una herramienta gráfica que ayuda en el proceso de despliegue (véase Figura 13.4). Despliega las relaciones jerárquicas de la visión, estrategias clave, metas estratégicas, metas a largo plazo, metas a corto plazo y proyectos, e indica dónde está cada uno asignado dentro de la organización. Un diagrama en árbol es útil para visualizar las relaciones entre metas y objetivos o equipos y metas. También proporciona un medio visual de determinar si todas las estrategias están apoyadas.

Medir el progreso con los indicadores clave del rendimiento

¿Por qué es necesaria la medición? Hay varias razones por las que es necesaria la medición del rendimiento y por qué deberá hacerse un planteamiento organizado a ella:

1. Las medidas del rendimiento indican el grado de cumplimiento de los objetivos y, por tanto, cuantifican el progreso hacia la consecución de las metas.
2. Las medidas del rendimiento son necesarias para controlar el proceso de mejora continua, que es capital para los cambios requeridos para ser competitivo.
3. Las medidas del rendimiento individual, del equipo y de la unidad del negocio se requieren para las revisiones periódicas del rendimiento a cargo de la dirección.

Una vez fijadas las metas y descompuestas en submetas, se necesita establecer medidas clave (indicadores del rendimiento). Un sistema de medición que controle claramente el rendimiento frente a los planes tiene las siguientes propiedades:

1. Indicadores que ligan estrechamente las metas estratégicas con la visión y la misión de la organización.
2. Indicadores que incluyen los intereses de los clientes; es decir, las medidas se enfocan a las necesidades y requisitos de los clientes internos y externos.
3. Un pequeño número de medidas clave de los procesos clave pueden obtenerse fácilmente en el momento necesario para la toma ejecutiva de decisiones.
4. Identificación del desperdicio crónico o del coste de la baja calidad.

Por ejemplo, MetPath, Inc., estableció medidas de sus procesos al comienzo de la implantación de su plan de negocio y fue capaz de controlar y cuantificar lo siguiente:

1. Una reducción décupla de los procesos de errores responsables de que el espécimen de un paciente se perdiera o se rompiera antes de hacerse el test.
2. Ahorros de costes significativos debidos a la disminución de errores en las pruebas de pericia.
3. Una reducción óctupla en la duración del ciclo, el tiempo que se tarda en entregar un servicio específico de asistencia sanitaria.

Las mejores medidas de la implantación del proceso de planificación estratégica son sencillas, cuantitativas y gráficas. En la Figura 13.9 se muestra una hoja gráfica básica que describe las medidas clave y la forma en que se implantarán. Es sencillamente un método para controlar las medidas.

Cuando se fijan y despliegan las metas, se deben analizar los medios de conseguirlas en cada nivel para asegurarse de que satisfacen el objetivo que soportan. Luego, el desembolso de recursos propuesto debe compararse con el resultado propuesto y con la relación beneficios/costes evaluada. Ejemplos de estas medidas son:

- Resultados financieros:
 - Ganancias.
 - Inversión.
 - Retorno de la inversión.
- Recursos humanos:
 - Formados.
 - Activos en equipos de proyectos.
- Número de proyectos:
 - Emprendidos.
 - En proceso.
 - Completados.
 - Abortados.
- Desarrollo de nuevo producto:
 - Número de porcentaje de lanzamientos de productos exitosos.
 - Retorno de la inversión del esfuerzo del desarrollo de nuevo producto.

Metas anuales de calidad	Medidas específicas	Frecuencia	Formato	Fuente de datos	Nombre

FIGURA 13.9 Medición de las metas de calidad (*Juran Institute, Wilton, CT*).

- Coste de desarrollar un producto frente al coste del producto al que sustituye.
- Porcentaje de beneficio atribuible a los nuevos productos.
- Porcentaje de ganancia de cuota de mercado atribuible a los productos lanzados durante los últimos 2 años.
- Porcentaje de lanzamientos a tiempo de producto.
- Coste de la baja calidad asociada al desarrollo de nuevo producto.
- Número de cambios de ingeniería en los primeros 12 meses de su introducción.
- Gestión de la cadena de suministro:
 - Tiempo de producción; índices de ejecución.
 - Duración del ciclo del inventario.
 - Porcentaje de entrega a tiempo.
 - Beneficio de aprobación a la primera.
 - Coste de la baja calidad.

El siguiente es un ejemplo de las medidas utilizadas por un banco para controlar la calidad del pagador:

- Velocidad:
 1. Número de clientes en la cola.
 2. Cantidad de tiempo en la cola.
- Puntualidad:
 1. Tiempo por transacción.
 2. Duración del ciclo de las transacciones sin espera o por correo.
- Precisión:
 1. Diferencias del pagador.
 2. Cantidad cargada/cantidad manejada.

Una vez instalado el sistema de medición, debe ser revisado periódicamente para asegurarse de que cumple con las metas.

Revisar el progreso. Un proceso de revisión serio y eficiente aumentará la probabilidad de alcanzar las metas. Al planificar acciones, una organización deberá vigilar las brechas entre la medición del estado real y el objetivo al que se apunta. El proceso de revisión vigila las brechas entre lo que se ha conseguido y el objetivo (véase Figura 13.10).

Las mediciones frecuentes del progreso del despliegue estratégico desplegado en forma de gráfico ayuda a identificar las brechas que necesitan atención. El éxito en cerrar dichas brechas depende de un bucle de realimentación serio que aclare la responsabilidad y autoridad de actuar sobre estas diferencias. Además de la revisión de los resultados, se necesitan revisiones del progreso para los proyectos en marcha para identificar los problemas potenciales antes de

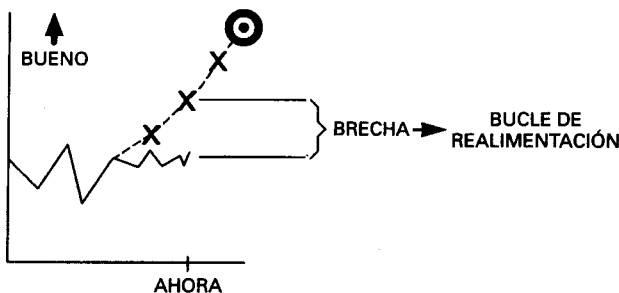


FIGURA 13.10 Revisión (Juran Institute, Wilton, CT).

que sea demasiado tarde para emprender una acción eficaz. Cada proyecto deberá tener puntos de revisión específicos y planificados, parecidos a los de la Figura 13.11.

Las organizaciones incluyen actualmente indicadores clave del rendimientos sobre lo siguiente:

Rendimiento del producto. Las características de un producto pueden ser muy numerosas. Para la gran mayoría de las características de un producto, existen cálculos del rendimiento y sensores tecnológicos que proporcionan una evaluación objetiva del producto.

Calidad competitiva. Estos cálculos se relacionan con aquellas cualidades que influyen sobre la capacidad de venta, v.g., rapidez en el servicio, sensibilidad, cortesía del servicio preventa y posventa, y precisión en la ejecución del pedido. Para los automóviles, las cualidades incluyen máxima velocidad, aceleración, distancia de frenado y seguridad. Para algunas características de producto, los datos necesarios deben obtenerse de los clientes, mediante negociación, persuasión o adquisición. Para otras características de producto, es factible conseguir los datos a través de tests de laboratorio. Y en otros casos, es necesario realizar una investigación del mercado.

Luego deben estudiarse las tendencias, de forma que puedan fijarse las metas para los nuevos productos para que correspondan al estado de competencia anticipada en el momento del lanzamiento.

Algunas organizaciones funcionan como monopolios naturales, v.g., los servicios públicos regionales. En algunos de dichos casos, la asociación del sector reúne y publica los datos de los resultados. En el caso de monopolios internos (v.g., la preparación del pago de la nómina, el transporte), es a veces factible conseguir información competitiva de las organizaciones que ofrecen a la venta servicios similares.

Rendimiento de la mejora de la calidad. Esta evaluación es importante para organizaciones que se lanzan a la mejora de la calidad sobre una base de proyecto a proyecto. Debido a la falta de puntos comunes entre los proyectos, la evaluación colectiva se limita al resumen de características, como:

- *Número de proyectos.* Emprendidos, en proceso, completados, abortados.
- *Resultados financieros.* Cantidad ganada, cantidades invertidas, retorno de la inversión.
- *Personas implicadas como miembros del equipo del proyecto.* Adviértase que una medida clave es la proporción del equipo de dirección de la organización que está realmente impli-

Proyectos	Líderes del proyecto	Mediciones en la línea de base	Objetivos	Plan inicial	Puntos de revisión				Líder de la revisión
					Recursos	Análisis	Plan	Resultados	

FIGURA 13.11 Plan de revisión del progreso (Juran Institute, Wilton, CT).

cado en proyectos de mejora. Lo ideal sería una proporción de más del 90 por ciento. En la gran mayoría de las organizaciones la proporción real es de menos del 10 por ciento.

Coste de la baja calidad. Definimos como «coste de la baja calidad» aquellos costes que desaparecerían si nuestros productos y procesos fueran perfectos y no generaran desperdicio. Estos costes son enormes. Desde los años ochenta, alrededor de un tercio del trabajo en la economía de Estados Unidos consistió en volver a hacer el trabajo anterior, porque los productos y procesos no eran perfectos.

Los costes no se conocen con precisión. En la mayoría de las organizaciones el sistema contable proporciona sólo una pequeña parte de la información necesaria para cuantificar este coste de la baja calidad. Lleva un montón de tiempo y esfuerzo extender el sistema contable para que proporcione una cobertura completa. La mayoría de las organizaciones ha llegado a la conclusión de que ese esfuerzo no cubre los costes.

Lo que se puede hacer es cerrar esta brecha con estimaciones que proporcionen los directivos superiores con información aproximada sobre el coste total de la baja calidad y sobre cuáles son las principales áreas de concentración. Estas áreas de concentración se convierten así en objetivo de los proyectos de mejora de la calidad. En consecuencia, los proyectos completados proporcionan cifras bastante precisas sobre los costes de la calidad antes y después de las mejoras.

Deficiencias del producto y del proceso. Incluso aunque el sistema contable no proporcione el coste de la baja calidad, se puede disponer de mucha evaluación mediante las medidas de las deficiencias del producto y del proceso, bien sea en unidades naturales de medida o en su equivalente en dinero; por ejemplo, el coste de la baja calidad por dólares de ventas, dólares del coste de las ventas, horas de trabajo o unidades enviadas. La mayor parte de las medidas llevan por sí mismas a sumas a niveles progresivamente superiores. Esta característica permite fijar metas en unidades idénticas de medida a múltiples niveles: empresa, división, departamento.

Rendimiento de los procesos del negocio. A pesar de la preeminencia e importancia de los procesos del negocio, sólo recientemente se ha controlado su rendimiento. Un factor que contribuye es su carácter multifuncional. No existe un propietario obvio, y por tanto una responsabilidad única y clara de su rendimiento. La responsabilidad está clara sólo en los microprocesos subordinados. El sistema de controles de la alta dirección debe incluir el control de los macroprocesos. Esto requiere establecer metas según la duración de los ciclos, las deficiencias, etc., y medios de evaluar el rendimiento frente a dichas metas.

La tabla de puntuación. Para permitir que la alta dirección «conozca la puntuación» relativa a la consecución del despliegue estratégico de la calidad es necesario diseñar un instrumento de información (bloque informativo) o tabla de puntuación. En efecto, el plan estratégico dicta la elección de temas e identifica las medidas necesarias para tabla de puntuación de la alta dirección.

La tabla de puntuación debe constar de varios componentes convencionales:

- Indicadores clave del rendimiento (a los más altos niveles de la organización).
- Informes cuantitativos sobre rendimiento, basados en datos.
- Informes narrativos en temas como amenazas, oportunidades, sucesos pertinentes.
- Auditorías realizadas (véase Auditorías del negocio, más adelante en este capítulo).

Estos componentes convencionales se complementan cuando sea necesario, para ajustarse al hecho de que cada organización es diferente. El resultado final deberá ser un instrumento de información que ayude a los directivos superiores a cumplir las metas financieras.

El consejo tiene la responsabilidad última de diseñar una tabla de puntuación así. En las grandes empresas, el diseño de dicho instrumento de información requiere informaciones procedentes tanto de las oficinas corporativas como de las oficinas de la división. A nivel de división, las informaciones deberán proceder de fuentes multifuncionales.

El instrumento de información deberá ser diseñado especialmente para que pueda ser leído de un vistazo y permita concentrarse fácilmente en aquellos temas que reclaman atención y acción. Los informes en forma de tabla deberán presentar los tres puntos esenciales: metas, resultados reales y variaciones. Los informes en forma de gráfico deberán mostrar, por lo menos, las tendencias de los resultados frente a las metas. Se deberá elegir el formato sólo después de aprender cuáles son las preferencias de los clientes, es decir, de los directivos superiores.

Los informes de gestión se publican normalmente cada mes o cada trimestre. Se establece el calendario para coincidir con las reuniones programadas del consejo u otros organismos de revisión claves. El editor de la tabla de puntuación es habitualmente el director de calidad, que también suele ser el secretario del consejo.

En Texas Instruments, Inc., la tabla de puntuación es un instrumento de información (el «Libro azul de la calidad»), diseñado a propósito en paralelo con el sistema de informes financieros de la compañía, incluso en el color de la tapa (azul). El informe está organizado en:

1. Indicadores guía, v.g., calidad de los componentes comprados.
2. Indicadores concurrentes, v.g., resultados de test del producto, condiciones del proceso y servicio a los clientes.
3. Indicadores retardados, v.g., información procedente de los clientes y retornos.
4. Datos sobre coste de la baja calidad.

El informe se emite mensualmente y es la base de la valoración anual del rendimiento de las contribuciones de los directivos a la calidad (Onnias 1985).

Se deberá revisar la tabla de puntuación rigurosamente y de manera regular. El rigor añade legitimidad y categoría a los informes. La regularidad de las revisiones le añade visibilidad. El hecho de que los directivos superiores participen personalmente en las revisiones indica al reto de la organización que las revisiones son de gran importancia.

En los últimos años, muchas organizaciones han combinado sus mediciones de las áreas de finanzas, de clientes, de operaciones y de recursos humanos con los «paneles de instrumentos» o las «tablas de puntuación del negocio» [véanse Kaplan y Norton (1992) o Godfrey (1998) para más detalles].

Auditorías del negocio. La auditoría es una herramienta esencial para los directivos superiores. Por «auditoría» entendemos una revisión del rendimiento independiente. «Independiente» significa que los auditores no tienen responsabilidad directa en la idoneidad del rendimiento que se va a auditar.

El propósito de la auditoría es proporcionar información independiente y no sesgada a los directores de las operaciones y a otros que necesiten saberlo. Para ciertos aspectos del rendimiento, entre las personas que necesitan saberlo están los directivos superiores.

Para asegurar la calidad, la alta dirección debe confirmar que:

1. Los sistemas están instalados y funcionan adecuadamente.
2. Se han conseguido los resultados deseados.

Duracell International, Inc., realizó lo que llamaron una «auditoría de calidad mundial» para revisar el progreso que habían hecho para constatar que la visión era la mejor. Según C. R. Kidder, anterior presidente de Duracell y CEO, la idea consistía en someter a prueba los productos de Duracell que habían sido comprados anónimamente en sucursales minoristas de todo el mundo, frente a productos competidores adquiridos del mismo modo. Comprar los productos Duracell al por menor, en vez de juntar simplemente ejemplares de las instalaciones de

producción de Duracell, aseguraba que el producto probado era representativo del producto comprado por los consumidores y aseguraba la posibilidad de comparación con los productos competidores. Se sometieron a prueba los productos y se compartieron los resultados con ejecutivos de Duracell, esperando que al hacerlo así se elevaría la visibilidad de la categoría competitiva del producto y se crearía presión para las mejoras necesarias para cerrar cualquier brecha competitiva que se revelara en la prueba. Se organizó la información sobre las pruebas para comparar el producto Duracell con el producto competidor en dos dimensiones: calidad (fugas, etiquetado, tamaño, etc.) y rendimiento (número de horas de servicio). En 1985, Duracell tenía el producto más duradero y de mejor calidad del mundo.

Estas auditorías se pueden basar en criterios desarrollados externamente, en objetivos específicos internos, o en una combinación de ambos. Tres series de criterios externos bien conocidos para auditar los resultados de una empresa son los del Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige (PNCMB), los del Premio Europeo de Calidad (PEC) y el Premio Deming de Japón. Todos ellos proporcionan criterios similares para evaluar la excelencia empresarial en toda la organización.

Tradicionalmente, las auditorías de calidad se han usado para proporcionar el aseguramiento de que los productos están conformes con los procedimientos. En los niveles de la alta dirección, el tema de las auditorías de calidad se expande para proporcionar respuestas a preguntas como estas:

- ¿Son nuestras políticas y metas apropiadas a la misión de nuestra empresa?
- ¿Proporciona nuestra calidad la satisfacción del cliente con el producto?
- ¿Es nuestra calidad competitiva con el objetivo en movimiento del mercado?
- ¿Estamos haciendo progresos en la reducción del coste de la baja calidad?
- ¿Es adecuada la colaboración entre nuestros departamentos funcionales para asegurar el óptimo rendimiento de la empresa?
- ¿Estamos cumpliendo con nuestras responsabilidades con la sociedad?

Tales preguntas no se responden con auditorías tecnológicas convencionales. Más aún, los auditores que ejecutan las auditorías tecnológicas rara vez tienen la experiencia de gestión y la formación necesarias para realizar auditorías de calidad orientadas al negocio. En consecuencia, las organizaciones que quieren llevar a cabo auditorías de calidad orientadas al negocio habitualmente las realizan empleando como auditores a directivos superiores o a consultores externos.

Juran (1998) ha declarado:

Una de las cosas que los directivos superiores deberán hacer es mantener una auditoría sobre cómo se está ejecutando el proceso de gestionar para conseguir el plan. Ahora bien, cuando usted se lanza a una auditoría, tiene que hacer tres cosas. Una es identificar cuáles son las preguntas para las que necesitamos respuestas. Esto no es delegable, los directivos superiores tienen que participar en la identificación de estas preguntas. Luego, usted tiene que reunir la información que es necesaria para dar respuesta a esas preguntas. Esto se puede delegar y supone el mayor volumen del trabajo, recoger y analizar los datos. Y luego están las decisiones que hay que tomar a la luz de esas respuestas. Esto no es delegable. Es algo en que deben participar los directivos superiores.

Las auditorías ejecutadas por ejecutivos de los máximos niveles de la organización en las que participa personalmente el presidente se llaman normalmente «La auditoría del presidente» (Kondo 1988). Dichas auditorías pueden tener un impacto grande en toda la organización. El tema objeto es de carácter tan fundamental que las auditorías alcanzan a toda función importante. La participación personal de los directivos superiores simplifica el problema de comunicación a los niveles superiores y aumenta la probabilidad de que la acción se realizará (véase el Capítulo 42.1, bajo Educación y formación en control de la calidad en toda la empresa). El mero hecho de que los directivos superiores participen personalmente envía un mensaje a la organización entera sobre la prioridad dada a la calidad y sobre la clase de liderazgo aportado

por los directivos superiores: liderar, no animar a los jugadores (Shimoyamada 1987). (Para más información sobre las auditorías de calidad, véase el Capítulo 14, «Gestión de la calidad total»).

DESPLIEGUE ESTRATÉGICO O NO: EL ELEMENTO DECISIVO

Beneficios de implantar el despliegue estratégico. La decisión de si la alta dirección debe adoptar el despliegue estratégico es única para cada organización. Lo que es decisivo es la importancia de integrar en el plan estratégico iniciativas de cambio importantes o programas de calidad. Los potenciales beneficios del despliegue estratégico son claros:

1. Las metas se hacen más claras: el proceso del plan fuerza la clarificación de cualquier imprecisión.
2. El proceso de planificación hace alcanzables las metas.
3. El proceso de control ayuda a asegurar que se consiguen las metas.
4. El desperdicio crónico se reduce mediante el proceso de mejora de la calidad.
5. La creación de nuevos desperdicios se reduce mediante la revisión del proceso de planificación del negocio.

Implantación del despliegue estratégico: riesgos y lecciones aprendidas. También se aprenden algunas lecciones importantes sobre los riesgos en la implantación del despliegue estratégico:

1. Perseguir demasiados objetivos, a largo plazo y a corto plazo, al mismo tiempo diluirá los resultados y nublará el planteamiento de la organización.
2. Una planificación y trabajo burocrático excesivos apartarán las actividades necesarias y desmotivarán a los directivos.
3. Intentar planificar estratégicamente sin datos adecuados sobre clientes, competidores y empleados internos puede crear un plan inalcanzable o un plan con objetivos tan fáciles de alcanzar que las mejoras financieras no son lo bastante significativas.
4. Si el liderazgo ejecutivo delega demasiada responsabilidad, habrá una pérdida real y percibida de liderazgo y dirección.
5. Si una organización eleva la calidad y el enfoque en los clientes a su máxima prioridad, crea la impresión de que está reduciendo la importancia de las finanzas, que anteriormente ocupaban esa prioridad. Este rebajamiento percibido es particularmente perturbador (inquietante, molesto) para aquellos que han estado anteriormente asociados a las metas financieras que antes ocupaban la máxima prioridad.

EMBARCARSE EN EL DESPLIEGUE ESTRATÉGICO DE LA CALIDAD

Probablemente, la mayor perturbación se crea con la imposición de un planteamiento estructurado a aquellos que prefieren no tenerlo. La resistencia al planteamiento estructurado es evidente desde el comienzo mismo.

El primero y más importante requisito previo para embarcarse en un esfuerzo de mejora de la calidad, efectivo y a largo plazo, en la empresa entera es la creación de un entorno que dirija a los muchos cambios que son necesarios para el éxito. Hemos buscado enérgicamente eliminar barreras que ha llevado años establecer. El proceso de cambio lleva tiempo, sin embargo, y el cambio se producirá sólo como un proceso evolutivo (Delaplane 1987).

(Véase Figura 13.12).

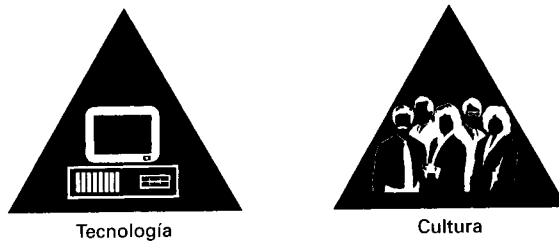


FIGURA 13.12 Cambios culturales (Juran Institute, Wilton, CT).

PUNTOS SOBRESALIENTES

El despliegue estratégico es un planteamiento sistemático de la integración del enfoque en el cliente y de los programas de cambio en toda la empresa (como la mejora de la calidad) con los planes estratégicos en la organización entera. El proceso del despliegue estratégico proporciona el planteamiento y permite a la organización alinear las metas de mejora y las acciones con su visión, misión y claves estratégicas. El despliegue estratégico proporciona la base para que la alta dirección haga elecciones estratégicas seguras y de prioridad a la mejora de la organización y a otras actividades de cambio. Las actividades no alineadas con las metas estratégicas de la organización deberán terminarse o eliminarse.

REFERENCIAS

- Delaplane, Gary W. (1987). «Integrating Quality Into Strategic Planning». *IMPRO 1987 Conference Proceedings*, Juran Institute, Inc., Wilton, CT, pp. 21-29.
- Godfrey, A. Blanton (1997). «A Short History of Managing Quality in Health Care», In Chip Caldwell, ed., *The Handbook For Managing Change in Health Care*. ASQ Quality Press, Milwaukee, WI.
- Godfrey, A. Blanton (1998). «Hidden Costs to Society», *Quality Digest*, vol. 18, no. 6.
- Juran, J. M. (1988). *Juran on Planning for Quality*, Free Press, New York.
- Kaplan, Robert S. and Norton, David P. (1992). «The Balanced Scorecard—Measures That Drive Performance». *Harvard Business Review*, January-February, vol. 70, no. 1.
- Kondo, Yoshio (1988). «Quality In Japan». In J. M. Juran, ed., *Juran's Quality Control Handbook*, 4th ed., McGraw-Hill, New York. (Kondo provides a detailed discussion of quality audits by Japanese top managements, including the president's audit. See Section 35F, «Quality in Japan», under Internal QC Audit by Top Management).
- Onnias, Arturo (1985). «The Quality Blue Book». *IMPRO 1985 Conference Proceedings*, Juran Institute, Inc., Wilton, CT, pp. 127-131.
- Roberts, Michael (1987). *The Strategic CEO*. New York, p. 334.
- Shimoyamada, Kaoru (1987). «The President's Audit: QC Audits at Komatsu». *Quality Progress*, January, pp. 44-49. (Special Audit Issue).
- Tregoe, Benjamin and Tobia, Peter (1990). «Strategy and the New American Organization», *Industry Week*. August 6.
- Weigel, Peter J. (1990). «Applying Policy Deployment Below the Corporate Level», *IMPRO 1990 Conference Proceedings*, Juran Institute, Inc., Wilton, CT.

Capítulo 14

GESTIÓN DE LA CALIDAD TOTAL

A. Blanton Godfrey

INTRODUCCIÓN GENERAL	14.2	La estrategia de desarrollo del Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige	14.21
INTRODUCCIÓN A LA CALIDAD TOTAL	14.2	Los valores capitales del Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige	14.22
Los resultados de la calidad total	14.4	Los criterios del Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige .	14.25
Los tres conceptos fundamentales	14.7	El énfasis en los resultados del Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige	14.26
Las tres fuerzas potentes	14.9	Administración del Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige	14.28
Los tres procesos críticos para la gestión de la calidad	14.13		
La infraestructura de la gestión de la calidad total	14.15	EL PREMIO EUROPEO DE CALIDAD	14.30
LA EVOLUCIÓN DE LA CALIDAD TOTAL	14.16	EL PREMIO DEMING DE APLICACIÓN	14.32
Calidad del producto	14.16	COMPARACIÓN DE LOS PREMIOS NACIONALES E INTERNACIONALES DE CALIDAD CON LAS NORMAS INTERNACIONALES	14.34
Calidad de los procesos del producto	14.17	REINGENIERÍA, SEIS SIGMA Y OTRAS EXTENSIONES DE LA GESTIÓN DE LA CALIDAD TOTAL	14.36
Calidad del servicio	14.18	REFERENCIAS	14.37
Proceso de la calidad del servicio	14.19		
Planificación empresarial	14.19		
EL IMPACTO DE LOS PREMIOS NACIONALES E INTERNACIONALES DE CALIDAD SOBRE LA GESTIÓN DE LA CALIDAD TOTAL	14.20		
La creación del Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige ..	14.21		

INTRODUCCIÓN GENERAL

En los últimos 10 o 20 años, unas pocas empresas han transformado radicalmente el funcionamiento de su negocio. Muchos de los conceptos y métodos que han usado son ahora conocidos colectivamente como «calidad total» o «gestión de la calidad total». Se han usado también otros muchos términos. Entre ellos están «transformación del negocio, excelencia en los resultados, excelencia en el negocio y seis sigma». Los éxitos de estas empresas han cambiado la visión que ellas y otras empresas tienen hoy de la calidad y de la gestión del negocio. Están volviendo a pensar en cómo se organizan, cómo se gestionan, e incluso en qué negocios deberán estar.

INTRODUCCIÓN A LA CALIDAD TOTAL

En las últimas dos décadas, muchas organizaciones en todo el mundo han estado bajo fuertes presiones. Algunas han sido golpeadas por la competencia internacional, otras por nuevas compañías emprendedoras que redefinieron los negocios y otras sufrieron un serio reto a causa de nuevas tecnologías que crearon alternativas formidables a sus productos y servicios. Algunas empresas líderes han cambiado rápidamente. Mientras algunas empresas nuevas se han convertido ahora en estrellas, otras están todavía envueltas en batallas diarias por la supervivencia y otras muchas han desaparecido.

Muchas empresas han descubierto que todo el conjunto de su reestructuración radical, reingeniería, reducciones y numerosos programas de calidad puede haberles ayudado a sobrevivir, pero siguen sin tener una ventaja competitiva clara. Su futuro estará determinado por tres áreas clave: alineamiento, enlace y réplica. Combinado con los conceptos fundamentales de gestión de la calidad (mejora continua, enfoque al cliente y valor de cada miembro de la organización), su trabajo en estas tres áreas clave está transformando el modo en que gestionan la organización entera.

Durante estos años ha habido un énfasis global creciente en la gestión de la calidad. En mercados competitivos globales, la *calidad* se ha convertido en el factor individual más importante del éxito. La gestión de la calidad se ha convertido en el tema competitivo de muchas organizaciones. Juran ha llegado a decir que «Así como el siglo xx fue el siglo de la productividad, el siglo xxi será el siglo de la calidad».

Reimann (1992a), entonces director de los programas de calidad del Instituto Nacional de Normas y Tecnología del departamento de Comercio de Estados Unidos, declaró claramente en su testimonio ante el Congreso de EE.UU.: «Hay ahora una percepción mucho más clara de que la calidad es crucial para la competitividad de las empresas y para la competitividad nacional».

En Estados Unidos, el presidente y el secretario de Comercio han dado su apoyo y atención personales a la calidad, incluyendo así la calidad en la agenda nacional. Sus esfuerzos han ayudado al público estadounidense a comprender que la calidad es un componente principal de la competitividad nacional. En otros países, como Argentina, Brasil, Francia, Grecia, Malasia, México y Singapur, también ha habido liderazgo desde los primeros niveles del gobierno y las empresas, creando programas nacionales de concienciación y formación, y premios.

En octubre de 1991, una revista de negocios líder internacional, *Business Week*, dedicó un número monográfico al tema de calidad. El editor en jefe, Stephen Shepard, llamó a este monográfico «el proyecto individual más ambicioso» de los 62 años de historia de *Business Week*. Shepard comentó además que la calidad «puede ser el mayor tema competitivo de finales del siglo xx y de principios del xxi».

La edición se agotó en pocos días. La demanda fue tan alta en Estados Unidos y en todo el mundo que *Business Week* tuvo que hacer otras dos tiradas más de miles de ejemplares. A final

de año, los editores de revistas estadounidenses proclamaron a este número «Revista del Año», el honor máximo para las revistas en Estados Unidos.

Durante 1991, el General Accounting Office de Estados Unidos (GAO) llevó a cabo un estudio de los ganadores del Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige y de las empresas a las que había hecho visitas de inspección. El GAO estudió cuidadosamente la relación entre la actividad de gestión de la calidad y su éxito y rentabilidad. Este informe, el Informe GAO 91-190, se convirtió en su informe más vendido de todos los tiempos. A principios de 1995, el Instituto Nacional de Normas y Tecnología del departamento de Comercio de Estados Unidos publicó un nuevo informe contrastando el éxito en la bolsa de las empresas ganadoras del Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige (empresas con divisiones ganadoras y empresas a las que había hecho visitas de inspección) con el promedio de las empresas. Los resultados eran convincentes. El Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige de Estados Unidos no proporciona información sobre los resultados financieros de una organización particular, pero por cuarto año consecutivo, un estudio especial de comparación en la bolsa había mostrado diferencias significativas (Port 1998). Los receptores del Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige en su conjunto han mejorado el Standard & Poor 500 por casi un margen de 2,5 a 1 (véase Figura 14.1). Los receptores consiguieron una tasa de crecimiento del 362 por ciento frente a una tasa de crecimiento del 148 por ciento del promedio de las empresas (Port 1998, p. 113).

En Europa, la creación en 1988 de la Fundación Europea de Gestión de la Calidad ha tenido ya un impacto significativo sobre la comprensión de la gestión de la calidad como tema de liderazgo y como herramienta competitiva. La introducción en 1992 del Premio Europeo de Calidad ha tenido un impacto importante para elevar la concienciación de los altos ejecutivos y la comprensión de los conceptos y métodos de la gestión de la calidad. El premio más antiguo es, por supuesto, el Premio Deming de Aplicación, que empezó en 1951 la Unión de Científicos e Ingenieros Japoneses (JUSE). Este premio estimuló la adopción del control de calidad en prácticamente todos los sectores de la industria japonesa. Con el tiempo, los criterios del premio evolucionaron hacia el concepto de control de la calidad en toda la empresa (CWQC) y control de calidad total (TQC) (Kondo, Kume y Shimizu 1995, p. 4).

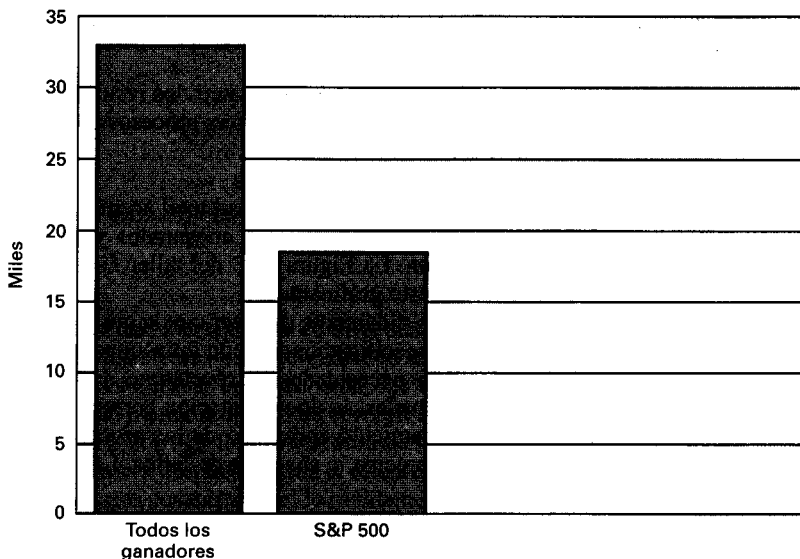


FIGURA 14.1 Crecimiento conjunto de las inversiones de los ganadores del MBNQA por valor de 7.496,54 \$ frente al de S&P 500 (Port 1998, p.113).

Debemos mencionar aquí que usaremos el término genérico de «gestión de la calidad total» para significar la vasta colección de filosofías, conceptos, métodos y herramientas usadas actualmente en todo el mundo para gestionar la calidad. Se usan con frecuencia otros términos. Gestión de la calidad total (TQM) es probablemente el término más usado en Estados Unidos, mientras que control de la calidad total (TQC) era hasta hace poco el más usado en Japón, aunque esto puede estar cambiando. «El término TQC (control de la calidad total) ha empezado a ser sustituido en Japón por el término TQM (gestión de la calidad total)» (Kondo 1995, p. vi). El mismo Kondo usa el término equivalente «Gestión de la calidad en toda la empresa» en su reciente libro (Kondo 1995). Otro término que se encuentra a veces es el de «mejora continua de la calidad» (CQI). En 1997, JUSE anunció el cambio formal del término TQC (control de la calidad total) al de TQM (gestión de la calidad total) (The TQM Committee 1997a, p.1). Este cambio de nombre se hizo tanto para adoptar un término más aceptado internacionalmente como para proporcionar una oportunidad de revisar el origen del control de la calidad y volver a construir el concepto para enfrentarse a los nuevos retos del entorno en la gestión del negocio. El Comité TQM de JUSE explicó este cambio en cuatro publicaciones (The TQM Committee 1997a, 1997b, 1997c y 1997d). En el diagrama de la Figura 14.2 se da un resumen de su pensamiento.

Según el punto de vista de JUSE, TQM es un enfoque de gestión que lucha, en cualquier entorno empresarial, por lo siguiente:

- Establecer, bajo un liderazgo fuerte de la alta directiva, una visión y una estrategia claras a medio y a largo plazo.
- Utilizar con propiedad los conceptos, valores y métodos científicos de TQM.
- Considerar los recursos humanos y la información como infraestructuras vitales de la organización.
- Mediante un sistema de gestión apropiado, aplicar eficazmente un sistema de aseguramiento de la calidad y otros sistemas de gestión transversales, como costes, entregas, entorno y seguridad.
- Asegurar unas relaciones sanas con los clientes, empleados, sociedad, proveedores y grupos de interés, con el apoyo de los poderes fundamentales de la organización, como tecnología básica, velocidad y vitalidad.
- Realizar continuamente los objetivos corporativos, consistentes en conseguir la misión de la organización, creando una organización con una presencia respetable y asegurando beneficios continuamente.

En toda discusión de calidad total es útil empezar por lo básico: los resultados esperados, los tres conceptos fundamentales, las tres fuerzas potentes, los tres procesos críticos y los elementos clave de la infraestructura de la calidad total.

Los resultados de la calidad total. Las metas de la calidad total aceptadas casi universalmente son: costes más bajos, ingresos más altos, clientes encantados y empleados con poder. Estas metas necesitan poca explicación. La Figura 14.3 del taller *Leadership for the Quality Century* del Juran Institute muestra esto gráficamente.

En los últimos años nos hemos apartado rápidamente de creer que la gestión de la calidad significa simplemente conformidad con las especificaciones y con los requisitos. Calidad significa también satisfacer e incluso superar las necesidades y expectativas de los clientes. La calidad incluye tener las características adecuadas, la documentación correcta y las facturas libres de errores. Además incluye el funcionamiento apropiado de los procesos de negocio: entrega a tiempo, apoyo técnico amistoso y preciso, y ausencia de fallos. La calidad implica reducir todos los costes de la mala calidad.

Costes más bajos. Calidad más alta puede significar bajar los costes mediante la reducción de errores, la reducción de la repetición de trabajo y la reducción del trabajo que no añade valor. En los últimos 15 o 20 años, las empresas de todo el mundo han demostrado repetida-

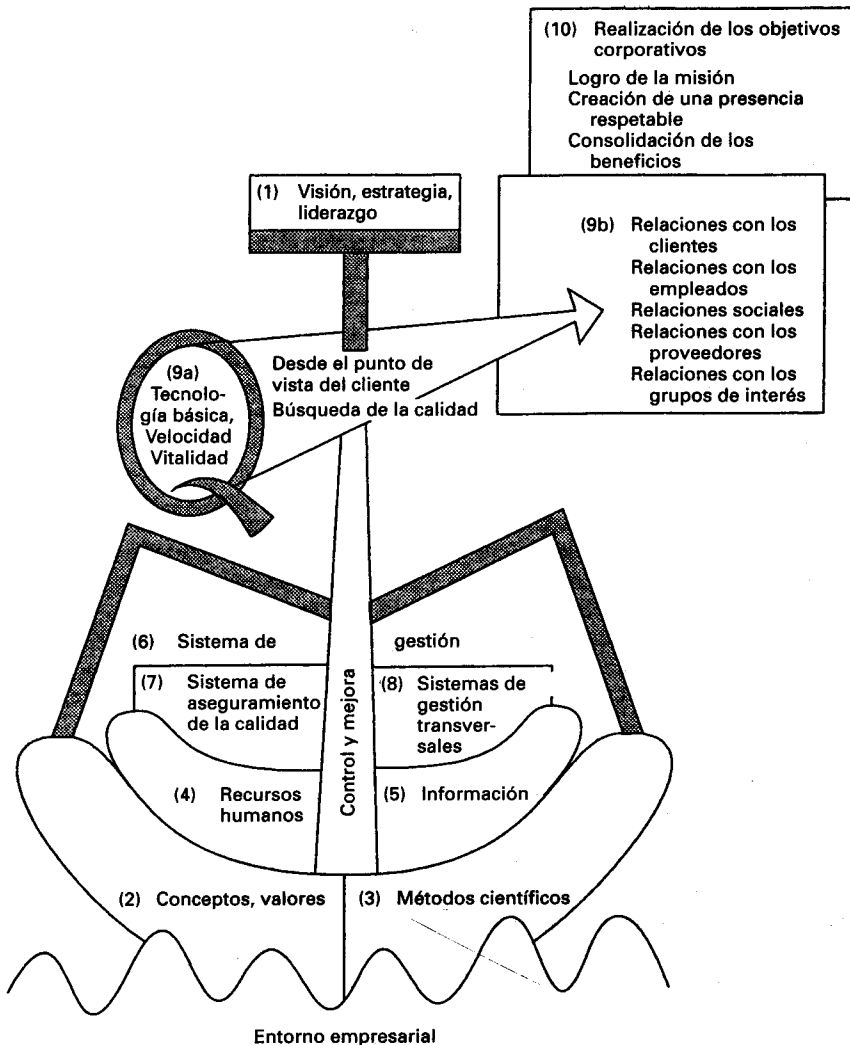


FIGURA 14.2 El dibujo global de TQM (*The TQM Committee 1997a, p. 4*).

mente que calidad más alta significa con frecuencia costes más bajos. Los costes asociados con la prevención de los errores durante el diseño son frecuentemente mucho menores que los de corregir los errores durante la producción; los costes de prevenir los errores durante la producción son mucho menores que los de corregir los errores después de la inspección final, y los costes de detectar y corregir los errores durante la inspección final son mucho menores que los de arreglar los errores después de que el cliente haya recibido los bienes o servicios. Nuestra comprensión de estos costes ha crecido rápidamente en la última década (Godfrey 1998, p. 18). Sörqvist (1998, pp. 36-39) concreta estos costes en cinco categorías básicas: costes tradicionales de la mala calidad, costes ocultos de la mala calidad, ingresos perdidos, costes de los clientes y costes socioeconómicos. Véase el Capítulo 8 para un tratamiento más detallado de la calidad y los costes. Véase el Capítulo 7 para el tratamiento de la calidad y los ingresos.



FIGURA 14.3 Resultados de la gestión de la calidad total (*Leadership for the Quality Century*, 1997, Juran Institute, Inc., Wilton, CT).

Ingresos más altos. Calidad más alta puede significar clientes más satisfechos, cuota de mercado mayor, mejor retención de los clientes, clientes más fieles e incluso precios extra. Los clientes cada vez esperan y piden más bienes y servicios de alta calidad. Mediante la superación de los niveles de calidad ofrecidos por los competidores del mercado, las organizaciones pueden añadir nuevos clientes, retener a los clientes antiguos y penetrar en mercados nuevos. A menudo, los clientes informados están dispuestos a pagar un precio extra por un mayor nivel de calidad que proporciona características nuevas y útiles o que reduce los costes totales del ciclo de vida.

Clientes encantados. Clientes «encantados» son clientes que compran una y otra vez, clientes que le hacen propaganda de sus productos y servicios, clientes que le preguntan primero a usted cuando van a comprar algo para ver si usted también ofrece estos productos o servicios. Los clientes fieles aumentarán frecuentemente sus compras hasta el punto de seleccionarlo como único proveedor de ciertos productos y servicios (Reichheld 1996).

Los estudios de mercado han mostrado recientemente el impacto espectacular de dichos clientes encantados. En un estudio, si los clientes clasificaban su satisfacción en 5 (en una escala de 1 a 5), era cuatro veces menos probable que se fueran en los próximos 12 meses y cinco veces más probable que adquirieran servicios adicionales que aquellos que clasificaban su satisfacción en 4. De hecho, los que clasificaban su satisfacción 2, 3 y 4 eran notablemente similares, básicamente neutrales.

Empleados con poder. Durante muchos años, las organizaciones consideraron el dar responsabilidad a los empleados como un medio de conseguir costes más bajos, ingresos más altos y clientes encantados. Actualmente la mayoría de las organizaciones líderes advierten que la creación de dichos empleados es también una meta importante de la gestión de la calidad total. Estas organizaciones no sólo intentan resolver los problemas de hoy, sino que también quieren crear una organización que pueda resolver o incluso evitar los problemas de mañana.

El concepto de dar responsabilidad a los empleados abarca muchas ideas nuevas. Los empleados con responsabilidad tienen autocontrol. Tienen los medios de medir la calidad de sus propios procesos de trabajo, de interpretar las mediciones y de comparar estas medidas con las metas y emprender acciones cuando el proceso no esté en la línea debida.

Pero el concepto de dar responsabilidad a los empleados va más allá del autocontrol. Los empleados saben también cómo cambiar el proceso y mejorar el funcionamiento, mejorando tanto la efectividad como la eficacia del proceso.

También comprenden cómo planificar para la calidad. Entienden quiénes son los clientes; qué necesitan, desean y esperan los clientes; cómo diseñar nuevos productos y servicios para satisfacer esas necesidades; cómo desarrollar los procesos de trabajo necesarios; cómo desarrollar y usar las medidas de la calidad necesarias, y cómo mejorar continuamente estos procesos. Los principios básicos de dar responsabilidad a los empleados se tratan en el Capítulo 15.

Los tres conceptos fundamentales. En los últimos años, muchas organizaciones líderes de todo el mundo han empezado a revisar los conceptos fundamentales de la gestión de la calidad: el enfoque al cliente, la mejora continua y el valor de cada persona.

Enfoque al cliente. Que el enfoque al cliente es un concepto fundamental de la gestión de la calidad quizá parezca obvio. Al fin y al cabo, las organizaciones existen para proporcionar productos y servicios a los clientes. ¿No están todas las organizaciones enfocadas al cliente?

Para la mayoría de las organizaciones, la respuesta a esta pregunta es un sonoro *no*. Durante el progreso evolutivo de casi todos los sectores, la primera fase es un enfoque en la calidad del producto nuevo en los términos más básicos. La meta es hacer que el producto funcione. Los primeros automóviles, aviones y teléfonos son un ejemplo espléndido. Al principio no había clientes, sólo inventores de ojos brillantes intentando hacer algo que nadie había visto antes. Más adelante seguiremos en este capítulo la evolución básica de la calidad en las organizaciones y sectores típicos.

Los clientes proporcionan pocas entradas en esta etapa. La mayoría ni siquiera está seguro de que desea estos productos o servicios. Entiende poco qué son, por qué tiene que comprarlos o qué hacen, y mucho menos tiene idea de cómo hacerlos mejor. Desgraciadamente, muchas organizaciones no progresan más allá de esta etapa. Las empresas y organizaciones basadas en la tecnología y las que proporcionan asistencia sanitaria son dos ejemplos muy patentes.

Una de las tendencias más recientes en las empresas es la creación de productos personalizados para mercados masivos. Bicicletas, vaqueros, zapatos, alfombras y otros numerosos artículos se adaptan al gusto particular. Servicios financieros, servicios de hotel, comidas e incluso asistencia sanitaria se están diseñando y entregando para que satisfagan las necesidades del cliente individual (Peppers y Rogers 1993).

El mayor reto al que se enfrentan las empresas es relacionar las medidas del grado de cumplimiento de las necesidades de los clientes con el comportamiento real de los clientes. Saber que tiene una tasa de satisfacción del cliente de 4,3 no significa nada. Lo que de verdad importa es si una tasa de satisfacción del 4,3 está creando negocio o lo está perdiendo.

Cada día hay más empresas que descubren que conservar los clientes (reduciendo la rotación) es mucho más provechoso que adquirir otros nuevos. Un estudio de Xerox halló que las ventas a los clientes actuales proporcionaban unos beneficios de más de un 20 por ciento superiores a las ventas a los clientes nuevos. El otro factor crítico es qué tanto por ciento del negocio del cliente tiene usted. Convertirse en el proveedor dominante puede tener resultados de empresa asombrosos.

Reichheld (1996) documenta muchos de los ejemplos de cómo han ido las empresas, más allá de la satisfacción del cliente y la retención del cliente, hasta la fidelidad del cliente. Crear la fidelidad del cliente se ha convertido en la piedra de toque de la planificación estratégica y de la gestión del proceso de las empresas.

Mejora continua. Juran (1964) documentó el punto de vista estructurado que muchas empresas usan para alcanzar mejoras espectaculares. En años recientes, el cambio rápido se ha convertido en un modo de vida. Muchas empresas emplean ahora este y similares puntos de vista para crear mejoras a cientos e incluso a miles.

Pero no siempre ha ocurrido así. Durante miles de años, las sociedades y los gobiernos se han organizado para evitar el cambio. En algunas sociedades, hacer algo de forma diferente era

punible con la muerte. En su novela *El egipcio*, Waltari (1949) describe cómo se enseñaba a un médico del antiguo Egipto a realizar 128 procedimientos diferentes. Sólo se podían realizar éstos y sólo había una forma de realizar cada uno de ellos. Incluso a los artistas se les enseñaba cuidadosamente una sola forma de dibujar un pájaro, un cocodrilo o una persona.

En la Europa medieval, los distintos gremios establecieron unas pautas rigurosas para elaborar cada objeto. Atreverse a experimentar sobre la forma de cómo hacer las cosas o sobre los materiales usados era motivo de expulsión del gremio. En la lengua bizantina, la palabra para cambio era la misma que para peligro. El cambio en las sociedades, en las prácticas de producción, en los ejércitos, en los gobiernos, vino despacio. Muchas sociedades padecieron gobernantes medio lelos antes que arriesgarse a cambiar la forma de gobierno.

Las organizaciones y las empresas son reflejo de la sociedad. Las empresas fueron gobernadas por densos manuales de política e instrucciones ejecutivas empresariales en series de varios volúmenes. Se promocionaba a los que «no movían el barco». Se crearon fuertes jerarquías para controlar todas las operaciones y el trabajo individual. Se usó la gestión científica, el llamado Sistema Taylor, que definía cuidadosamente cada paso del proceso de trabajo y el papel de cada persona. La descripción de la tarea definía claramente lo que uno hacía y lo que no hacía.

Las cosas empezaron a cambiar rápidamente en los años siguientes a la Segunda Guerra Mundial. Los japoneses estaban tan rezagados en muchas áreas de la producción comercial que tuvieron que mejorar rápidamente para sobrevivir. Los métodos de mejora continua que perfeccionaron funcionaron bien. Enfrentadas a una severa competencia, muchas empresas estadounidenses empezaron a copiar estas ideas, algunas con gran éxito.

Abunda la documentación con ejemplos de mejoras asombrosas. Estas mejoras se están haciendo en fábricas, hospitales, compañías de telecomunicaciones, organismos gubernamentales a todos los niveles, en todos los tipos de empresas de servicios y en escuelas. Los nombres de los medios utilizados para alcanzar estos resultados se han hecho muy familiares a todos nosotros: equipos multifuncionales, círculos de control de calidad, reingeniería, equipos de acción de calidad, sistemas de sugerencia de ideas creativas, equipos de mejora de procesos, calidad en el trabajo diario, y muchos otros.

Valor de cada persona asociada. El valor de cada persona asociada en una organización es otra idea que suena sencilla en apariencia. Durante años, las empresas han manifestado públicamente y claramente que la fuerza de sus organizaciones estaba en las personas que trabajaban en ellas. Pero muchas de éstas eran simplemente declaraciones huecas. Las empresas todavía siguen ciegamente el taylorismo. Algunos escasos planificadores, directivos o ingenieros están planificando todos los pasos de cada proceso, describiendo con palabras ponderadas las tareas e imponiendo el seguimiento sin reflexión de las instrucciones.

Incluso la revisión de la historia más superficial demuestra qué radical es la idea de tener a cada persona pensando, creando ideas, retando a la autoridad y haciendo cambios en el sistema. Ejércitos enteros marchaban uno al lado del otro con lanzas inclinadas con el mismo ángulo exacto. Los arqueros disparaban con precisión cuando se les ordenaba. Los mosqueteros marchaban en filas, descargaban andanadas en el momento precisado, recargaban y disparaban de nuevo. Pero sólo siguiendo las órdenes de un comandante.

Las personas eran formadas en largos programas de aprendizaje por maestros exigentes. Filas de oficinistas transcribían exactamente lo que estaba escrito. Las primeras fábricas tenían filas y filas de trabajadores haciendo cada uno de ellos su tarea exactamente de la misma manera.

El número promedio de ideas implantadas por empleado al año en Estados Unidos todavía es sólo del 0,16. Es decir, una idea implantada por cada seis empleados al año. En organizaciones que valoran realmente las ideas y las contribuciones personales de cada empleado el número es muchísimo más alto. En Estados Unidos, Toyota está ya alcanzando ocho ideas implantadas por empleado en su planta de fábrica de Georgetown. En conjunto, Toyota recibe

4.000.000 de ideas de sus 80.000 empleados. Dado que el 95 por ciento se implantaron, esto es más de 46 ideas implantadas por empleado al año (Yasuda 1991).

Algunas empresas de Estados Unidos han conseguido resultados similares. Globe Metallurgical y Milliken han sacado un promedio de más de una idea implantada por empleado a la semana. Milliken es ahora uno de los líderes del país con 68 ideas implantadas por asociado al año. ¡Un empleado en un hotel Marriot contribuyó con 63 mejoras en un mes! (Fromm y Schlesinger 1993, p. 8).

Pero la contribución de ideas no es más que una medida de las contribuciones individuales. Otras contribuciones pueden ser más importantes. Entre ellas está la participación en los equipos de mejora de la calidad y de planificación de la calidad, en los equipos de reingeniería de los procesos de empresa, el trabajo con el control estadístico de la calidad y el autocontrol de los propios procesos de trabajo, y el trabajo como miembros de equipos de alto rendimiento o autodirigidos.

Eastman Chemical iba ya por su sexto año en el viaje de la calidad en 1985 cuando empezó a advertir la fuerte conexión entre cultura, valores y excelencia de la calidad. Su objetivo era identificar, comprender y realzar los elementos personales de su política de calidad. Ahora usa su proceso de gestión de la calidad desarrollado internamente como vehículo para integrar a todos los empleados en los esfuerzos de mejora. Usa equipos entrelazados de empleados en todos los niveles para definir cómo se enlaza cada proceso de trabajo con el siguiente y con las necesidades y expectativas de los clientes.

Eastman Chemical ha definido también formalmente «empowerment» como la creación de una cultura «en la que las personas tienen el conocimiento, habilidades, autoridad y deseo de decidir, actuar y asumir la responsabilidad de los resultados de sus acciones y de su contribución al éxito de la empresa». Implanta esta definición clara y práctica de «empowerment» mediante la formación justo a tiempo en la que los empleados van a clase con proyectos de mejora ya seleccionados. Los impulsores de calidad (facilitadores) les proporcionan apoyo cuando vuelven al trabajo.

Las tres fuerzas potentes. Existen tres motores principales de la excelencia en rendimiento: alineación, enlace y réplica. Para conseguir resultados espectaculares, la organización debe centrar sus esfuerzos en los temas más importantes: debe tener la estrategia correcta y las metas, recursos y actividades de la organización alineados con la estrategia. La organización debe comprender también el carácter transversal de su trabajo, los enlaces dentro de la organización. Llamada a veces «pensamiento sistémico» o «pensar en los procesos», esta comprensión del modo como se hace el trabajo es crucial. Los asociados de la organización deben ser también capaces de hacer rápidamente réplicas de los éxitos. Una simple mejora puede valer unos miles de dólares. Pero 100 réplicas pueden ser una gran contribución al éxito de la organización.

Alineamiento. Un reciente estudio de la Association of Management Consulting Firms de Estados Unidos halló que los ejecutivos, los consultores y los profesores de escuelas de negocios están todos de acuerdo en que la estrategia empresarial es ahora el asunto de gestión más importante y seguirá siéndolo por lo menos en los próximos 5 años (Byrne 1996, p. 46). En los últimos años ha habido una nueva comprensión de la importancia de la estrategia. Esta estrategia debe incluir:

1. Una visión clara de hacia dónde va la empresa; ésta debe ser enunciada y comunicada claramente a todos los miembros de la organización en el lenguaje que entiendan.
2. Definiciones claras del pequeño número de objetivos clave que deben alcanzarse si la empresa ha de realizar su visión.
3. La traducción de estos objetivos clave a toda la organización, de forma que cada persona sepa cómo la realización de su tarea ayuda a la empresa a conseguir los objetivos. Este alineamiento de todos los asociados con las prioridades máximas de la empresa es absolutamente crucial (Sugiura 1992).

Uno de los mayores cambios en el proceso de planificación estratégica ha sido la inclusión de muchos estratos de la fuerza de trabajo, de los clientes, proveedores e incluso competidores en el proceso de planificación. Estos cambios están creando un completo conjunto nuevo de palabras sonoras: coevolución, ecosistemas empresariales, diseño estratégico, diseño del negocio, competencias medulares, teoría de juegos, oportunidades del espacio en blanco. Las diferencias clave incluyen la creación de redes de trabajo de nuevas relaciones con los clientes, los proveedores y los rivales para ganar ventajas competitivas nuevas, mercados nuevos y oportunidades nuevas.

El segundo gran cambio ha sido la inclusión de un cierto número de empleados de todas las edades, niveles, tareas y funciones en el proceso de planificación. Hace algunos años, Electronic Data Systems Corporation (EDS) lanzó una iniciativa estratégica importante que implicó a 2.500 de sus 55.000 empleados. Un grupo central de 150 trabajó a tiempo completo durante un año coordinando los datos del grupo mayor. Nokia Group de Finlandia involucró recientemente a 250 empleados en una revisión estratégica. El jefe del desarrollo de la estrategia de Nokia, Chris Jackson, informa de que la implicación de más personas no sólo hace más viable su capacidad de implantar la estrategia, sino que además gana un alto grado de compromiso en el proceso (Byrne 1996, p. 52).

Para ser efectiva, la planificación estratégica debe usarse como herramienta, un medio para un fin, y no como meta en sí misma. Debe tratar de implicar a las personas de toda la organización. Debe captar las actividades existentes, no añadir simplemente más actividades a los platos ya desbordantes. Finalmente, debe ayudar a los directivos de alto nivel a enfrentarse a las decisiones difíciles, a fijar prioridades y a eliminar muchas actividades en curso, no simplemente a iniciar otras nuevas.

El tercer cambio ha sido el enfoque extremo, casi una obsesión, en los clientes. La nueva planificación estratégica empieza con los clientes. Hewlett-Packard reúne a los clientes con los proveedores y con los directivos generales de muchas unidades de negocio diferentes para trabajar juntos en las estrategias. Por ejemplo, reunió a los jefes de las divisiones que hacían sistemas para los equipos integrados de diagnóstico para Ford con aquellos que hacían estaciones de trabajo para las fábricas de coches y con aquellos que desarrollaban componentes electrónicos para coches. Muchas de las ideas para nuevas oportunidades salieron directamente de los clientes.

Demasiadas empresas se han parado en la creación del plan estratégico. Sus planes están bellamente desarrollados y envasados, pero no han llegado a nada. En cierto modo, estas empresas dan por sentado que envasar y distribuir los planes a un número selecto de directivos basta para hacer que las cosas ocurran. Nada puede ser menos cierto. Para conseguir resultados de verdad, estos planes deben desplegarse cuidadosamente en la organización entera. Cada asociado debe estar alineado claramente con los objetivos clave de la empresa, cada asociado debe entender las metas estratégicas y cómo contribuye a ellas. Cada meta estratégica debe descomponerse en submetas, y éstas deben subdividirse en metas anuales. La organización debe definir entonces claramente los proyectos específicos de trabajo que respaldan las metas anuales. Deben asignar prioridades claras, establecer medidas específicas y proporcionar los recursos para conseguir los resultados deseados para cada proyecto. Se trata el despliegue estratégico con más detalle en el Capítulo 13.

Enlace (Gestión de procesos o pensamiento sistémico). En los últimos años, las empresas en todo el mundo han adoptado el concepto de reingeniería con un fervor indescriptible. Empresas como IBM, Ford, AT&T y NCR fueron sus pioneras a principios de los años ochenta, y el libro de gran éxito de ventas de Michael Hammer *Reengineering the Corporation* lo popularizó; la reingeniería se ha convertido en una herramienta corriente para las empresas en todo el mundo (Hammer y Champy 1993). La definición de reingeniería de Hammer como «el rediseño radical de los procesos de empresa para una mejora espectacular» cautivó y excitó la imaginación de los directivos en todo el mundo. Más recientemente, Hammer ha decla-

rado que «la palabra clave en la definición de reingeniería es 'proceso': un completo conjunto de actividades de principio a final que juntas crean valor para el cliente» (Hammer 1996, p. xii).

De la misma manera que las empresas han descubierto la importancia de enlazar sus actividades a través de todas las funciones y departamentos de la compañía, también han descubierto qué crucial resulta pensar en cuántas actividades están realmente en serie. A menos que enlacemos nuestros esfuerzos a través de todas las partes de la empresa, fallaremos en la consecución de los resultados que necesitamos tan desesperadamente.

Con este enfoque crítico en el enlace (o gestión de procesos) convergen los mundos de la calidad total y de la reingeniería. Un dogma fundamental de la gestión de la calidad desde Shewhart en la década de 1920 (si no antes) ha sido la importancia de controlar los procesos. Más tarde, Deming desarrolló las ideas del control estadístico de procesos de Shewhart con el ahora famoso ciclo PDCA (planificar, hacer, revisar, actuar), y Juran fue el pionero de los conceptos de mejora de procesos con su texto *Managerial Breakthrough* (Juran 1964). A medida que las empresas líderes se movían hacia rápidas actividades de mejora en los años ochenta, se hizo patente la necesidad de la gestión de los procesos. En las plantas fabriles, el carácter de trabajo en serie era obvio. Si una parte de una línea de ensamblado fallaba o creaba un cuello de botella, toda la línea se veía afectada. Lo que no era tan obvio era cómo muchos procesos administrativos eran también sistemas en serie. Si se daba un error en el paso de admisión del pedido, podía no haber medio de completar correctamente y a tiempo la entrega del producto o del servicio.

Los pasos para gestionar los enlaces críticos y hacer mejoras continuas y espectaculares de los procesos clave están ahora bien definidos. El primer paso es identificar los procesos clave de la organización. Existen numerosos métodos para hacerlo, pero lo esencial de todos ellos es reducir la lista hasta los pocos muy importantes y asegurarse de que todo el mundo los conoce. El paso siguiente es crear las medidas necesarias. Muchas empresas tienen largas listas de medidas para casi cada tarea de la organización. Muchas de estas medidas se centran en las actividades de los departamentos y muchas están relacionadas con el presupuesto. Pero estas mismas empresas tienen pocas medidas para los procesos críticos que condicionan el éxito del negocio. No pueden decir cuándo se tarda desde la recepción de un pedido de un cliente hasta que el cliente recibe los bienes o servicios, y mucho menos pueden decir el tiempo que pasa hasta que ellos reciben el pago. No conocen el coste real de procesar el pedido, entregar el producto o proporcionar el servicio ulterior.

El paso final en la gestión de los enlaces críticos es tomarse realmente en serio la gestión de estos enlaces. Sin cambios importantes en la estructura de la organización, sin asignar propietarios del proceso, sin realineamiento de autoridades y responsabilidades, apenas ocurre nada.

Aunque la gestión de la calidad ha consistido durante muchos años en el control de procesos, mejora y planificación, no hemos desarrollado todavía toda la comprensión, herramientas y medidas necesarias para gestionar de este nuevo modo crítico. Es un reto importante para el futuro.

La palabra más importante en la definición del proceso es «cliente». Como muchos de nosotros hemos descubierto en la última década, una empresa es una colección de procesos, y el cliente sólo ve a la empresa según el resultado de dichos procesos. Al cliente no le importa cómo está organizada la empresa, quién responde ante quién, cuáles son los diversos títulos o incluso dónde están localizados los diferentes departamentos. Incluso, al cliente no le importa qué elementos de los bienes o servicios son producidos por las empresas, por los proveedores de la empresa o por los competidores de la empresa. Los clientes solicitan productos, desean que se les entreguen exactamente cuando se les prometió, quieren que el servicio solicitado esté a su disposición cuando lo necesiten y desean que las facturas sean exactamente como se acordaron.

Si un proceso no está proporcionando valor al cliente, el proceso está produciendo desperdicio. Hay muchos subprocesos en una empresa que existen principalmente para posibilitar que

la empresa produzca valor al cliente. La mayoría de los procesos clave tocan directamente al cliente, y estos procesos deben añadir valor al cliente.

La segunda clave para gestionar los procesos es determinar exactamente qué valor se añade en cada paso del proceso. Cuando vemos una orden de compra de un libro por 30\$ con seis firmas que ha llevado 6 semanas procesar, sabemos que existe un método mejor. ¿Qué valor añadido tiene este proceso? Las organizaciones en todo el mundo se han quedado asombradas al saber cuántos pasos, cuántas transferencias inútiles y cuánto tiempo y esfuerzo perdidos tienen sus procesos clave.

Simplemente centrarse en las reducciones de la duración de los ciclos puede ilustrar sobre lo mal gestionados que están muchos de nuestros procesos clave. La Royal Leicester Infirmary del Reino Unido redujo un procedimiento de prueba neurológica de 40 días a un día y eliminó un 40 por ciento de los costes administrativos al rediseñar el proceso con un trabajo conjunto de 14 departamentos. Motorola redujo de 6 semanas a menos de 100 minutos la duración requerida del proceso para recibir el pedido de un buscapersonas, producir el buscapersonas y enviarlo.

La tercera área crítica de gestionar los enlaces críticos es advertir que casi todos los procesos clave atraviesan varias áreas diferentes de la empresa. Para gestionar estos procesos con éxito se requiere un enfoque basado en el equipo que implique a los empleados con habilidades nuevas, comprensión nueva de la estrategia, metas y competidores de la empresa, y nuevas herramientas para ejecutar sus tareas en rápida expansión.

El reto del futuro está en continuar identificando estas habilidades, herramientas y comprensión y en saber cuáles son parte del conocimiento central esencial de la empresa (que debe enseñarse a todos los empleados) y cuáles son las habilidades y herramientas nuevas que se necesitan. Las empresas que hace unos pocos años pensaron que podían ejecutar apresuradamente un «programa de formación en calidad» y ya bastaba, están descubriendo ahora que la formación se ha convertido en una actividad a tiempo completo.

Muchas de estas ideas de gestión de los procesos, equipo de trabajo y habilidades en la solución de problemas están encontrando un lugar en las escuelas de negocios y de ingeniería, pero las empresas necesitan instruir rápidamente a todos sus empleados en los procesos clave, las medidas usadas y la manera en que la empresa afronta y cambia continuamente el funcionamiento de los procesos. El tema de gestión de los procesos se trató en el Capítulo 6.

Réplica. Probablemente, el modo más potente y menos comprendido de acelerar drásticamente los resultados de los esfuerzos de calidad y de mejora de la productividad es la tercera fuerza potente, la réplica. Un ejemplo de una empresa de servicios líder internacional deja esto claro. El Comité Ejecutivo estaba comprensiblemente orgulloso de algunos de sus logros. En un emplazamiento se había solucionado un auténtico problema crónico: el ahorro era de más de 350.000\$ al año. En otro emplazamiento se había reducido un problema crónico diferente en un 75 por ciento. El incremento en las ganancias se contaba también en cientos de miles de dólares.

No le resultaba difícil a CEO hacer sus cálculos. Si cada uno de los más de 250 emplazamientos podía duplicar estos resultados, la empresa superaría sus ambiciosas metas financieras del año siguiente. Pero sabía lo difícil que iba a resultar conseguir que cada uno de los emplazamientos comprendiera lo que se había hecho en esos dos emplazamientos, modificar el enfoque para ajustar sus situaciones, aplicar una metodología de solucionar problemas similares y conseguir resultados similares.

Cuando nos enfrentamos a una réplica, aprendemos de primera mano lo que es la resistencia al cambio, el temido síndrome de no inventado aquí, la creencia enconada de que cada emplazamiento es diferente, e incluso la renuencia de muchas empresas a «sofocar la innovación y la creatividad» al ordenar a las unidades y sucursales que actúen. Los problemas siguen sin solucionarse, se inventan y prueban nuevas soluciones, se dejan pasar oportunidades y las empresas se embrollan con bajos porcentajes de cambio y decepción por los resultados. Las empresas con éxito emprenden acciones; hacen que las cosas ocurran. Utilizan medios pasivos

para estimular que hagan las réplicas, usan medios activos para forzarlo y convierten la réplica en una obligación, no una opción.

Los sistemas pasivos incluyen: la participación, la recompensa y el reconocimiento, los artículos de periódico y las presentaciones por los equipos. Los resultados de los proyectos de mejora de la calidad se difunden ampliamente por toda la organización. En estos sistemas se da por sentado que quienes tienen problemas u oportunidades similares oirán hablar del proyecto, obtendrán la información que necesitan y actuarán.

Los sistemas activos de participación fuerzan el tema. En las reuniones anuales de la red de facilitadores de Honda (a la que asisten más de 3.000 personas de todo el mundo) se espera de los participantes que compartan un proyecto completo y bien documentado y que estudien en profundidad otros cuatro que podrían usarse en su centro. A la vuelta a sus centros, se espera de ellos que implanten estos cuatro proyectos. La estructura de apoyo está preparada para ayudarlos y se esperan resultados.

Los tres procesos críticos para la gestión de la calidad. Estos tres procesos de gestión no son nuevos. Son los mismos procesos de gestión que hemos usado durante años para gestionar las finanzas. Este rasgo común ayuda a los directivos. Su larga experiencia en gestionar las finanzas les resulta útil cuando entran en el mundo de la gestión de la calidad. Estos tres procesos están estrechamente interconectados.

Planificación de la calidad. El lugar lógico para empezar es la planificación de la calidad. La planificación de la calidad consiste en una secuencia universal de sucesos, un mapa de planificación de la calidad. Primero identificamos los clientes y sus necesidades. Entonces diseñamos los productos (bienes y servicios) que responden a dichas necesidades. También diseñamos los procesos que pueden producir estos bienes y servicios. Finalmente, entregamos el plan a las fuerzas operativas. Ellas tienen entonces la responsabilidad de dirigir las operaciones. Ejecutan el proceso, producen los bienes y servicios, y satisfacen a los clientes. El proceso de planificación de la calidad está resumido en la Figura 14.4.

El proceso de planificación de la calidad se trató en el Capítulo 3. En secciones posteriores proporcionamos un tratamiento en profundidad de algunas de las herramientas más técnicas usadas en planificación de la calidad (o como algunos las llaman, calidad mediante el diseño). Estas herramientas incluyen el diseño de experimentos (Capítulo 47), la predicción de la fiabilidad y la estimación de la fiabilidad (Capítulo 48).

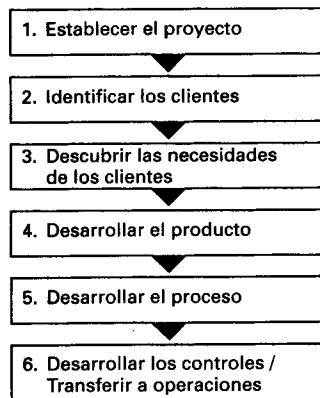


FIGURA 14.4 El proceso de la planificación de calidad (*Leadership for the Quality Century*, 1997, Juran Institute, Inc., Wilton, CT).

Pero por muy bien que apliquemos nuestros métodos y herramientas de planificación de la calidad, la mayoría de los procesos no son perfectos. Llevan asociados algún desperdicio crónico: demoras, errores, repetición del trabajo, trabajo sin valor añadido, restos. Este desperdicio está incorporado en el plan; sigue y sigue. Primero tenemos que proporcionar los sistemas de control necesarios para mantener la calidad al nivel planificado. Y luego debemos buscar las oportunidades de introducir mejoras drásticas en los niveles de calidad conseguidos. La Figura 14.5 deja claro estas relaciones.

En esta figura hemos dibujado el coste de la mala calidad en la escala vertical, de forma que lo que sube es malo. Son los costes asociados a la imperfección. A pesar de nuestros esfuerzos en planificación, los costes en este ejemplo son alrededor del 20 por ciento. Estos costes pueden derivar de defectos o pueden ser incluso más difíciles de ver. Ejemplos de costes difíciles de ver son el inventario de trabajo en curso, el trabajo sin valor añadido, la capacidad infrautilizada y las demoras y trasposos innecesarios.

Nuestra primera tarea consiste en confeccionar el sistema de control de calidad para asegurar que nuestro rendimiento de calidad es por lo menos tan bueno como se planificó. En el diagrama de la Figura 14.5 vemos un pico esporádico, una desviación importante de nuestro nivel de rendimiento planificado. En este ejemplo, el sistema de control de calidad parece estar funcionando bien. Como ese punto en un pico indica que el problema se detectó rápidamente, su causa se encontró rápidamente y esta causa se eliminó rápidamente. Pasó poco tiempo hasta que los resultados de calidad volvieron a sus niveles planificados.

En muchos casos de la vida real nuestros sistemas de control de calidad no funcionan tan bien. Pueden pasar varios días o incluso semanas sin que se detecte que hay un problema. Luego podemos pasar varios días o semanas más investigando las posibles causas del problema y más días o semanas poniendo remedio. El nuevo nivel de los costes de la mala calidad persiste durante este tiempo, causando mucho daño a la organización.

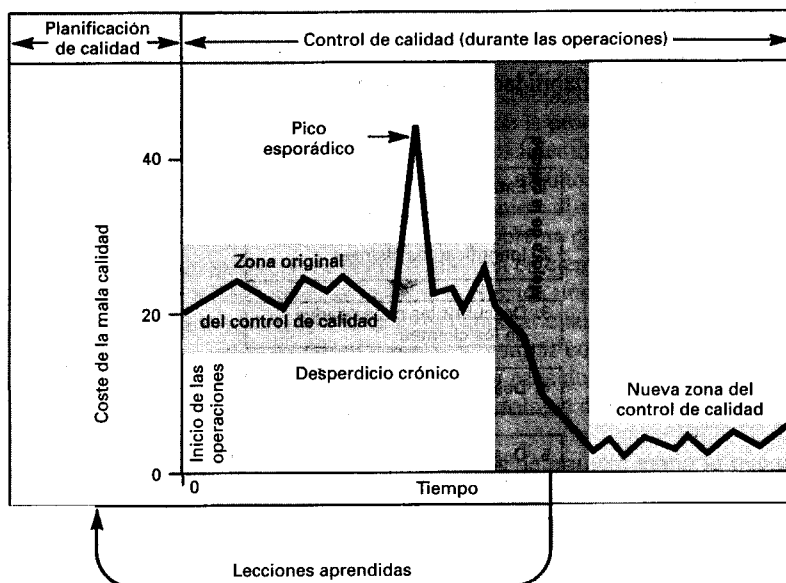


FIGURA 14.5 La trilogía de Juran (Juran Institute, Inc., Wilton, CT).

Control de calidad. Lo que las fuerzas operativas pueden hacer es minimizar este desperdicio. Lo realizan mediante el control de calidad. El control de calidad descansa en cinco puntos básicos: una definición clara de calidad; un objetivo, una meta clara; un sensor, un medio de medir el rendimiento real; un medio de interpretar la medida y compararla con el objetivo, y un medio de emprender acciones para ajustar el proceso si es necesario. El control de calidad se trató en el Capítulo 4. El control estadístico del proceso se tratará en profundidad en el Capítulo 45.

Mejora de la calidad. Pero todas estas actividades sólo sirven para mantener la calidad en su nivel planificado. Debemos emprender acciones específicas y deliberadas si deseamos cambiar este nivel. Como Deming señaló hace tiempo, «Apagar el fuego en un hotel no hace que el hotel sea mejor». Como declara en *Out of the Crisis* (Deming 1982, p. 51), «Apagar el fuego no es mejorar el proceso. Ni lo es el descubrimiento y eliminación de la causa especial detectada por un punto fuera de control» (nuestro pico esporádico de la Figura 14.5). «Esto sólo hace retroceder el proceso al punto en que debería haber estado desde un principio (un punto de vista adelantado por el Dr. Joseph Juran hace años)».

Juran (1964) describe el proceso de mejora de la calidad usado por personas y organizaciones para realizar cambios «drásticos» en los niveles de rendimiento. El proceso de mejora de la calidad está dirigido a niveles de resultados estables. El proceso de mejora de la calidad cuestiona si esto es lo mejor que se puede conseguir. Juran describe el proceso de mejora de la calidad en el Capítulo 5.

La infraestructura de la gestión de la calidad total. La Figura 14.6 muestra los principales elementos de la infraestructura de la calidad total. Estos elementos incluyen el sistema de calidad, la coparticipación cliente-proveedor, la implicación total de la organización, la medida e información, y la educación y formación.

Sistema de calidad. La infraestructura de la calidad total consiste en varias piezas clave. La primera, y una de las más importantes, es el sistema de calidad. Definido mejor por la norma ISO 9004-1, el sistema de calidad es un bloque de construcción crítico para la gestión de la calidad total. Las normas ISO del Sistema de Calidad se describieron en el Capítulo 11.

Un buen sistema de calidad contiene también las relaciones cliente proveedor. De nuevo, las normas de la serie ISO 9000 proporcionan un buen punto de partida para relaciones contractuales al añadir una estructura sólida de gestión de la calidad. Pero muchas empresas van más allá de las relaciones contractuales. Muchas relaciones cliente proveedor en las empresas

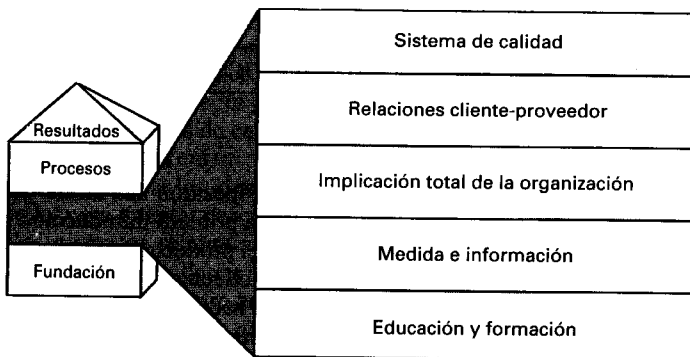


FIGURA 14.6 La infraestructura de la calidad total (*Leadership for the Quality Century*, 1997, Juran Institute, Inc., Wilton CT).

líderes de EE.UU. están evolucionando rápidamente para parecerse a las pioneras Toyota y otras empresas japonesas líderes de automoción.

Para conseguir la mejora de calidad a un ritmo revolucionario, debemos tener también una implicación total de la organización. En palabras de un grupo de estudios interdisciplinario reunido en la Universidad de Columbia en 1988 para estudiar la competitividad global (Starr 1988):

...hemos reunido algunos principios básicos de lo que hace competitiva a una empresa, el primero de los cuales es la calidad.

Los negocios con éxito ya no ven a sus empleados como coste de producción, sino como recurso para la producción. Aunque nunca se eliminará la incertidumbre en el trabajo, debe reconocerse que un compromiso a largo plazo de y con los trabajadores es, cuando menos, tan importante como la maquinaria o la tecnología. La implicación de los empleados en los esfuerzos para mejorar la productividad y la calidad es vital, y ellos deben poder participar también en los beneficios.

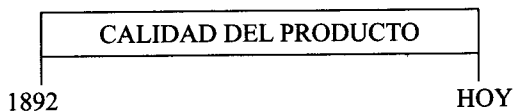
Un elemento clave de la infraestructura es la medida e información. Donald Peterson, antiguo presidente de Ford Motor Company, subraya lo importante que es tener la información correcta. Cuando Ford hizo benchmarking de Mazda quedaron muy impresionados por lo bien que Mazda gestionaba esta parte del negocio. Peterson (1992) declara:

Quizá lo más importante, Mazda ha podido identificar los tipos de información y registros que eran realmente útiles. No se preocuparon por el resto de los datos. (En Ford) estamos cargados de montañas de datos inútiles y ahogados por demasiados niveles de control sobre ellos.

La última, y quizá más importante, parte de la infraestructura es la educación y formación. Las organizaciones deben preparar a los equipos en la manera de trabajar como equipos y en cómo diagnosticar los problemas y proporcionar las soluciones. Esta clase de formación deberá estar dirigida al cambio de comportamiento. La formación deberá ser justo a tiempo. La mejor formación se consigue con la práctica. La formación sobre cómo mejorar la calidad deberá hacerse durante proyectos de mejora reales. La formación deberá diseñarse para ayudar a los equipos a completar sus proyectos rápidamente y con éxito. De la formación se trata en el Capítulo 16.

LA EVOLUCIÓN DE LA CALIDAD TOTAL

En muchos países, sectores y empresas ha parecido que la TQM evolucionaba a través de varios pasos o fases diferentes. Estas fases incluían un enfoque en la calidad del producto, en la calidad de los procesos del producto, la calidad del servicio, la calidad de los procesos de servicio, la planificación empresarial, la planificación estratégica de la calidad y la planificación estratégica integrada de la calidad.



Calidad del producto. Todas las organizaciones empezaron sus tareas de gestión de la calidad con un enfoque en la calidad del producto. En la primera introducción de un producto, esto es necesariamente una definición de la calidad del producto desde el punto de vista del productor. Dado que el producto es desconocido por los clientes, éstos tienen pocos datos que aportar respecto a la definición de calidad. Se les puede hacer una encuesta sobre sus necesidades y deseos, pero en el caso de un producto verdaderamente nuevo, sus aportaciones son ambiguas y en cierto modo vagas.

En un estudio reciente sobre la evolución de la calidad en las telecomunicaciones, éste era claramente el caso (Endres y Godfrey 1994). El teléfono era un producto verdaderamente

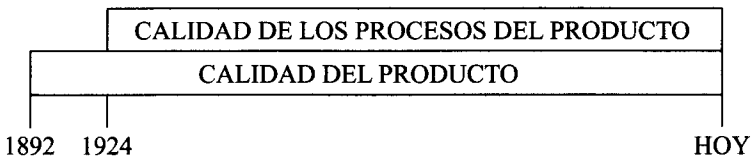
nuevo. Los clientes potenciales estaban asombrados de que aquello funcionara y no tenían ni idea de cómo funcionaba. Las fuerzas promotoras de la definición de calidad eran los ingenieros que intentaban que funcionara lo bastante bien como para que fuera un producto vendible. Ya en 1892, Bell System estaba desarrollando procedimientos de inspección para asegurar que las especificaciones y requisitos desarrollados por los ingenieros (la definición de calidad de la empresa) se cumplieran por el personal de producción.

Este caso fue también el de otros sectores como el de la asistencia sanitaria. Durante muchos años, las definiciones de calidad en la medicina moderna se centraban en los resultados. Éstos eran definidos por los especialistas médicos, los doctores. Procedimientos elaborados de aseguramiento de la calidad, usualmente basados en la inspección, fueron desarrollados para revisar los resultados y asignar responsabilidades por los resultados menos que perfectos. En el Capítulo 29, sobre calidad en la automoción, se aprecia una evolución similar.

También en otros sectores (servicios o fabricación) parece darse el mismo caso. Las primeras compañías aéreas concentraron todos sus esfuerzos en la calidad del producto: proporcionar transporte rápido desde el punto A hasta el punto B. Esta definición básica de calidad del producto —seguro, rápido, viaje aéreo razonablemente puntual— ocupó todos sus esfuerzos durante años.

Deberemos notar también que este enfoque en la calidad del producto ha continuado hasta hoy. Las empresas de telecomunicaciones extendieron sus esfuerzos más allá de la calidad inicial hasta la fiabilidad en operación, luego a la capacidad, facilidad de uso, mantenibilidad, y otras definiciones de calidad del producto. Algunos de los métodos usados para gestionar estas definiciones ampliadas de calidad del producto se han hecho muy sofisticados.

En la asistencia sanitaria, gran parte del trabajo reciente sobre resultados clínicos entraría en esta categoría. Los investigadores han extendido las definiciones tradicionales de resultados para incluir el funcionamiento del paciente, la ausencia de dolor y su capacidad de trabajar. Esto lleva la definición tradicional de calidad de los resultados más allá de las paredes del hospital (Godfrey 1997).



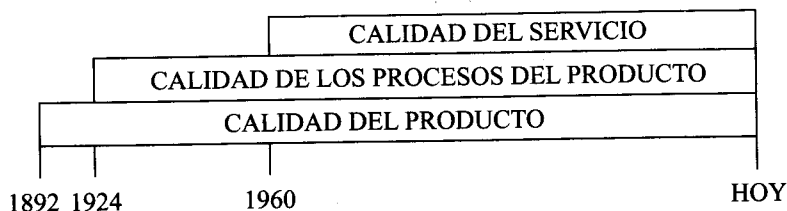
Calidad de los procesos del producto. La próxima fase de la evolución de la calidad en las telecomunicaciones empezó en 1924 con la creación del gráfico de control. Durante algún tiempo se venía haciendo evidente que controlar la calidad del producto mediante la inspección final era muy caro. En los equipos de instalación de la empresa American Telephone & Telegraph, en rápido crecimiento, el grito unánime se había convertido en «Hacerlo bien a la primera». Encontrar los errores de cableado en máquinas de conmutación complejas después de haber montado la máquina era un proceso que consumía tiempo y dinero. Resultaba mucho más económico asegurar que los elementos funcionaban y controlar cuidadosamente el montaje que retroceder para intentar descubrir los problemas.

Abundan los ejemplos tempranos. Existen pruebas de que durante la Primera Guerra Mundial los británicos desarrollaron procedimientos de control bastante sofisticados para asegurar el tensado de los cables entre las alas de los cazas biplanos.

Pero fue la creación del gráfico de control lo que dejó claro qué fácilmente se podía transferir el control de proceso a las fuerzas operativas. Esto reduciría tener que confiar en la inspección final y dejaría en libertad a muchas personas para el trabajo de producción. De esta forma se podía a la vez mejorar el control de calidad del producto y reducir los costes.

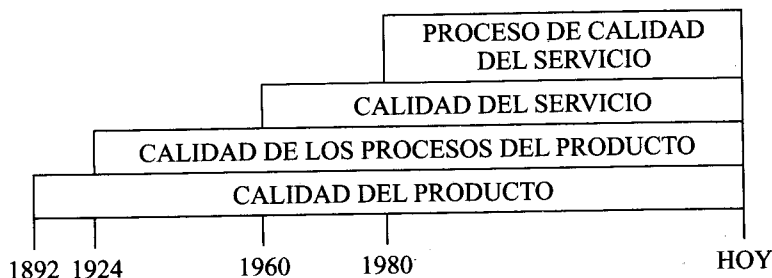
Esta etapa de la calidad del proceso del producto —enfoque en los procesos que producen los productos— se ha continuado también hasta la actualidad. Se han añadido al arsenal muchos métodos sofisticados: control del proceso de ingeniería, diseño de experimentos, evolución de operaciones, diseño sólido y, más recientemente, simplificación y reingeniería del proceso.

Existen muchos ejemplos en asistencia sanitaria: asistencia enfocada en el paciente, mapas de asistencia, orientaciones clínicas, protocolos. Cualquier método que intente mejorar los resultados de nuestro trabajo mejorando los procesos con los que hemos creado estos resultados está en la fase de proceso del producto. En otros sectores, la mayor parte de éstos se han centrado en el apartado de los costes de producir el producto.



Calidad del servicio. La siguiente fase en algunos sectores empezó en los primeros años sesenta. Sospechamos que en ciertos sectores había empezado mucho antes, para otros no ocurrió hasta los ochenta o incluso los noventa. Era la expansión de la definición tradicional de calidad del producto para incluir los servicios que rodean el producto. Para las telecomunicaciones, esta expansión incluye los servicios de reparación y mantenimiento, admisión de pedidos, facturación y teléfonos modulares que el cliente puede instalar y mantener él mismo con facilidad. En asistencia sanitaria han surgido muchas ideas nuevas. Entre ellas están la asistencia enfocada en el paciente y muchos otros medios de proporcionar servicios más allá de los clínicos básicos. Surgieron muchas ideas nuevas relativas a las admisiones, tiempos de espera, cuidados en la cama, gestión interna, lavandería, decoración y disposición de la habitación, teléfonos, televisores, comidas (más allá de la nutrición básica), aparcamiento y otros servicios que rodean al producto básico del resultado correcto. Estas situaciones son llamadas algunas veces características o parte vendible de la calidad.

Para muchas empresas de fabricación, los años sesenta y setenta fueron los despertadores de este aspecto de la calidad. El cliente ya no estaba interesado simplemente en la calidad del coche. El servicio proporcionado, los distribuidores, la disponibilidad de los componentes, la asistencia en carretera, la experiencia en las ventas, la financiación, el *leasing* y muchos otros aspectos de las relaciones proveedor/cliente se convirtieron en parte del campo de batalla de la calidad competitiva. A finales de los ochenta, vimos todo esto acelerarse con la introducción de los coches de lujo japoneses (Acura, Infiniti y Lexus), con su distribución especial, nuevas relaciones de servicio y nuevos niveles de apoyo. General Motors ha aplicado estos conceptos al coche básico en su Saturn Division.

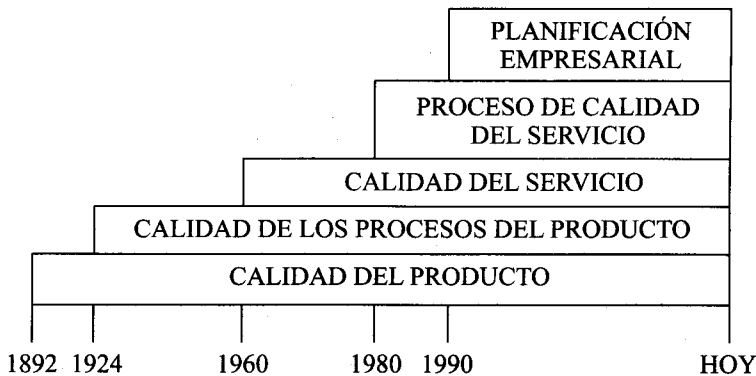


Proceso de la calidad del servicio. En los años ochenta ocurrió un nuevo enfoque en la calidad. Siguiendo el ejemplo de IBM, las empresas empezaron a enfocarse en los costes de proporcionar la calidad de estos servicios —o gestión o mejora de la calidad del proceso de negocio—. Muchas de las mismas técnicas (la mayor parte más bien herramientas de ingeniería industrial estándar) usadas en la calidad del proceso del producto se aplicaron por primera vez a los procesos horizontales que atraviesan las organizaciones y que, en su mayor parte, no habían sido gestionados en absoluto.

Surgieron también algunas ideas nuevas. Los conceptos de propietario del proceso y de equipo del proceso extendieron el poder del comité de calidad mediante el examen e identificación continuos de las oportunidades de intervención de los equipos en los procesos críticos del negocio. De varias maneras, estos equipos de proceso actuaron como comités específicos, desplegando el control, la mejora y los equipos de planificación para los macroprocesos o para microprocesos dentro de los macroprocesos.

De nuevo el enfoque principal estaba en los costes. Estas tareas de reingeniería o de calidad de los procesos de empresa estaban dirigidas a la reducción de la duración de los ciclos, a la reducción del número de pasos o transferencias y a la mejora global de la eficiencia. Muchas de estas intervenciones en los procesos de empresa mejoraron también la calidad de los resultados.

Empezamos a ver que surge un ciclo. El proceso evolutivo de la gestión de la calidad total parece alternar entre el enfoque en la calidad y el enfoque en los costes para alcanzar esa calidad.



Planificación empresarial. En los últimos años hemos observado que muchas empresas empiezan a integrar la gestión de la calidad en sus ciclos de planificación empresarial. Esta integración de las metas de calidad con las metas financieras ha supuesto un empujón importante para las empresas líderes. Recientemente, esta integración se citaba como una de las tareas principales actualmente en ejecución por los que respondieron a la encuesta sobre la TQM de la Mesa redonda de empresas.

La fijación de metas de calidad; la subdivisión de metas en submetas, metas anuales y proyectos, y el despliegue en toda la organización (*hoshin kanri*, planificación hoshin, despliegue de políticas o planificación estratégica de la calidad), se han convertido para muchas empresas en uno de los principales avances en la gestión de la calidad total. Algunas están yendo realmente más allá del ciclo anual de planificación empresarial para incorporar estos métodos en sus planes a 5 años o incluso en planes a más largo plazo.

Esto lleva naturalmente a la pregunta: ¿Cuáles son los pasos siguientes en la evolución de la calidad? El paso inmediato en la pirámide es bastante obvio: planificación estratégica de la calidad. Algunas empresas están empezando a ir aún más allá: han implantado la planificación estra-

técnica integrada, en la que han implicado a clientes y proveedores en una planificación estratégica conjunta. Los detalles de la planificación estratégica de la calidad y los del despliegue estratégico se dan en el Capítulo 13.

EL IMPACTO DE LOS PREMIOS NACIONALES E INTERNACIONALES DE CALIDAD SOBRE LA GESTIÓN DE LA CALIDAD TOTAL

Una de las tendencias más útiles de la pasada década han sido las actividades de autoevaluación de muchas empresas de todo el mundo. Las empresas están usando en todo el mundo los criterios del Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige, el Premio Europeo de Calidad, el Premio Deming de Aplicación, y otros varios premios nacionales de calidad para evaluar el rendimiento real frente a un razonable conjunto de pautas para la calidad total.

Estas evaluaciones pueden proporcionar a los ejecutivos de primer nivel una base clara para establecer niveles reales de rendimiento de la calidad. Cuando estos directivos están bien dispuestos a dedicar parte de su tiempo a entender los criterios, comprender lo que sus propias calificaciones de evaluación significan y comprender lo que es necesario para mejorar estas calificaciones, pueden desarrollar planes significativos y realistas de acción para mejorar sus organizaciones.

Un paso muy importante en este proceso es comprender primero el nivel de rendimiento de la propia organización y compararlo con el nivel de rendimiento de otra organización.

Uno de los beneficios más llamativos de estos premios nacionales e internacionales de calidad ha sido el asombroso incremento del contacto de la alta ejecutiva con los verdaderos líderes de la calidad total. Por primera vez en la historia de Estados Unidos, los ejecutivos de primer nivel están escuchando lo que otras empresas han conseguido en calidad, cómo han obtenido estos resultados y cuál ha sido el papel del liderazgo de la ejecutiva en estos logros.

Este benchmarking es, tanto a nivel personal como a nivel de organización, una de las más importantes tendencias en la gestión moderna de la calidad. Cuando el *Boardroom Reports* le preguntó si había una sola cosa que fuese lo más importante que una empresa podía hacer para cambiar la cultura de la empresa y conseguir resultados apreciables, el entonces presidente de Ford Motor Company, Donald Peterson, contestó: «Seguro que la hay. Cada empresa debe encontrar qué otras empresas en el mundo son mejores en ese sector. Luego, cada empresa debe comparar sus operaciones con las empresas extranjeras y nacionales más eficientes y con más beneficios..., aquellas que, como Xerox, tienen resultados increíbles».

Peterson siguió explicando que en Ford «empezamos por comparar nuestros procesos de fabricación, diseño, marketing, gestión financiera y calidad con las mejores operaciones japonesas».

Peterson declaró:

Las comparaciones deberán basarse en la rapidez, inversión de capital, esfuerzo desperdiciado, número de empleados y cualquier patrón con el que la empresa pueda medir sus operaciones y las de otros.

El paso siguiente es hacer saber a los departamentos clave que otra empresa está haciendo mejor toda su tarea o parte de ella. Esto resulta más fácil si el comité ejecutivo dice que considera el benchmarking como una oportunidad, no como una crítica. Los buenos directivos se sienten estimulados por un reto así.

Después hay que enviar grupos de directivos a visitar las empresas con operaciones superiores.

Ford incluyó representantes sindicales en los equipos de visitantes. Luego reunió equipos de personas clave de los departamentos afectados para discutir las ideas que habían visto. Entonces decidieron qué ideas podían implantar y cómo. El benchmarking se trató en el Capítulo 12.

La creación del Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige. Durante los años ochenta había un interés creciente en Estados Unidos por promover lo que ahora se llama calidad total. Muchos líderes de Estados Unidos creían que un premio nacional de calidad, similar al Premio Deming de Aplicación de la Unión Japonesa de Científicos e Ingenieros, ayudaría a estimular los esfuerzos de calidad de las empresas estadounidenses.

Cierto número de personas y organizaciones propusieron tal premio, lo que llevó a una serie de audiencias con el Subcomité de Ciencia, Investigación y Tecnología de la Cámara de Representantes. Por fin, el 6 de enero de 1987, se aprobó la Ley 1987 de Mejora Nacional de la Calidad Malcolm Baldrige. La ley fue firmada por el presidente Ronald Reagan el 20 de agosto de 1987 y se convirtió en la Ley Pública 100-107. Esta ley habilitaba el establecimiento del Programa del Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige. El objetivo de este programa de premio (Resolución de la Cámara 812, Congreso de EE.UU.) era ayudar a mejorar la calidad y productividad mediante:

(A) la ayuda para estimular a las empresas estadounidenses a mejorar la calidad y productividad por el orgullo del reconocimiento, a la vez que obtienen una ventaja competitiva con el aumento de beneficios;

(B) el reconocimiento de los logros de las empresas que mejoran la calidad de sus productos y servicios y proporcionan un ejemplo para otras;

(C) el establecimiento de pautas y criterios que pueden ser usados por organizaciones de negocios, gubernamentales, industriales y otras, en la evaluación de sus propios esfuerzos de mejora de la calidad, y

(D) la provisión de orientaciones específicas para otras organizaciones estadounidenses que deseen aprender cómo gestionar en pro de alta calidad, poniendo a su disposición información detallada de cómo las organizaciones ganadoras fueron capaces de cambiar sus culturas y alcanzar la eminencia.

La ley estableció que se podían conceder hasta dos premios a las empresas en cada una de las tres categorías:

- Pequeñas empresas.
- Grandes empresas o sus subsidiarias.
- Empresas que proporcionan principalmente servicios.

La ley también fijó que las empresas deben optar al premio mediante la presentación de una solicitud, por escrito. Y la empresa debe permitir una «evaluación rigurosa del modo en que la empresa y otras operaciones han contribuido a la mejora de la calidad de bienes y servicios».

En 1998 se realizaron exámenes piloto de organizaciones de asistencia sanitaria y educativas. Recientemente, el Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige se ha extendido para incluir organizaciones educativas y de asistencia sanitaria.

La ley también requería del director de la Oficina Nacional de Normas (ahora Instituto Nacional de Normas y Tecnología) que

se apoyara en una evaluación intensiva a cargo de un cuerpo competente de evaluadores que revisaran las pruebas presentadas por la organización y, mediante una visita de inspección, verificaran la exactitud de las mejoras de calidad aducidas. El examen debe abarcar todos los aspectos de la gestión actual de la organización en sus metas futuras. El premio se dará sólo a las organizaciones que hayan obtenido mejoras destacadas en la calidad de sus productos o servicios (o ambos) y que demuestren una gestión de la calidad efectiva mediante la formación e implicación de las personas de todos los niveles en la mejora de la calidad.

Además del establecimiento del Comité de Evaluadores, la ley también requería el establecimiento de un comité de supervisores, consistente en un mínimo de cinco personas que hubieran demostrado preeminencia en el campo de la gestión de la calidad.

La estrategia de desarrollo del Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige. Al crear el Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige, el primer paso fue desarrollar los criterios que se usarían para evaluar a las organizaciones que lo solicitaran. El director de la

Oficina Nacional de Normas seleccionó al Dr. Curt Reimann como director del Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige. El Dr. Reimann empezó inmediatamente a solicitar a personas y organizaciones de todo Estados Unidos y del mundo que le hicieran sugerencias y contribuyeran a crear los criterios y el proceso por el que se evaluarían dichos criterios. El Dr. Reimann y sus ayudantes recogieron gran cantidad de información de otros premios, como el Premio Deming de JUSE y el premio de calidad de la NASA, como información de apoyo. Luego seleccionaron un pequeño equipo de voluntarios para ayudar a crear el primer borrador de los criterios. Estos criterios esbozados fueron entonces revisados en sesiones intensivas de grupos especializados a cargo de expertos seleccionados en organizaciones de todo Estados Unidos (Reimann 1992b).

Una de las acciones más importantes emprendidas por el director, su equipo y los voluntarios fue crear una estrategia de diseño clara para el programa del premio. Los elementos de la estrategia eran:

- Crear un sistema nacional de valores de calidad.
- Proporcionar una base para el diagnóstico y transferencia de la información.
- Crear un vehículo de cooperación entre las organizaciones.
- Proporcionar un sistema de premio dinámico que evolucionara mediante consenso y fuera mejorado continuamente.

La estrategia de diseño se ha seguido cuidadosamente. Los criterios del premio han cambiado y mejorado cada año. Este capítulo no intenta reflejar la evolución de los criterios, sino más bien describir los criterios vigentes en 1998. Estos criterios se presentan en detalle en un folleto que se puede conseguir gratuitamente en el Instituto Nacional de Normas y Tecnología (Departamento de Comercio de EE.UU. 1998).

Los criterios del Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige son la base para conceder los premios y dar documentación a los solicitantes. Los criterios tienen también otros tres objetivos importantes:

- Ayudar a elevar las expectativas y normas de rendimiento.
- Facilitar la comunicación y la coparticipación entre y dentro de organizaciones de todos los tipos, basándose en una comprensión común de los requisitos clave de la calidad y del rendimiento operativo.
- Servir de herramienta de trabajo para la planificación, formación, evaluación y otros usos.

Los valores capitales del Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige. Existen once valores y conceptos capitales en los criterios del premio. Estos valores y conceptos capitales son los que siguen:

Calidad impulsada por el cliente. El énfasis está aquí puesto en los atributos del producto y servicio que aportan valor al cliente y llevan a la satisfacción y preferencia del cliente. El concepto va más allá del simple cumplimiento de los requisitos básicos del cliente, incluyendo aquellos que realzan los atributos del producto y servicio y los diferencian de las ofertas de la competencia. La calidad impulsada por el cliente se describe, pues, como un concepto estratégico dirigido hacia la retención del cliente y la ganancia de cuota de mercado.

Este enfoque en el cliente ha sido subrayado por el Presidente de Estados Unidos (George Bush, 1993 *Award Criteria*, Instituto Nacional de Normas y Tecnología, Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige):

En los negocios, sólo hay una definición de calidad: la definición del cliente. En la fiera competencia del mercado internacional, calidad significa supervivencia.

El énfasis en la gestión de calidad y en el cliente ha calado en las administraciones y los partidos políticos de Estados Unidos, como muestra esta declaración del Presidente

(William J. Clinton, 1998 *Award Criteria*, Instituto Nacional de Normas y Tecnología, Premio Nacional de Calidad Malcom Baldrige).

La calidad es una de las claves del continuo éxito competitivo de los negocios estadounidenses. El Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige, que destaca la satisfacción del cliente, la responsabilidad de la fuerza de trabajo y el aumento de la productividad, se ha constituido en el símbolo del compromiso estadounidense con la excelencia.

Liderazgo. Un aspecto clave del enfoque del PNCMB está en el liderazgo de la ejecutiva. Los líderes deben crear un enfoque al cliente, valores de calidad claros y visibles y altas expectativas. Este concepto resalta la implicación personal requerida de los líderes. Esta implicación se extiende a las áreas de responsabilidad pública y ciudadanía corporativa, así como a las áreas de desarrollo de toda la fuerza de trabajo. Este concepto también pone énfasis en actividades como planificación, comunicaciones, revisión del rendimiento de calidad de las empresas, reconocimiento y el servir como modelo a imitar.

Formación y mejora continuas. Este concepto incluye actividades de mejora, tanto de incremento como «súbita», en cada operación, función y proceso de trabajo de la empresa. Subraya que las mejoras pueden hacerse mediante el reforzamiento del valor para los consumidores; la reducción de los errores, defectos y desperdicio; mejorando la capacidad de respuesta y el rendimiento de los ciclos; mejorando la productividad y eficacia en el uso de todos los recursos, y mejorando el rendimiento de la empresa y su posición de liderazgo al cumplir con sus responsabilidades públicas y de ciudadanía corporativa.

El añadido de la formación a los valores capitales en las ediciones recientes de los criterios se relaciona con la adaptación al cambio que conduce a metas y/o enfoques nuevos. La formación y la mejora necesitan calar en el modo en que opera la organización.

Valoración de los empleados. Este concepto resalta el hecho de que el éxito de una empresa depende crecientemente del conocimiento, habilidades y motivación de su fuerza de trabajo. El éxito de los empleados depende crecientemente de tener la oportunidad de aprender y practicar nuevas habilidades. Las empresas necesitan invertir en el desarrollo de su fuerza de trabajo, mediante educación, formación y oportunidades de crecimiento continuado. Existe en Estados Unidos una conciencia creciente de que el rendimiento global de las organizaciones depende cada vez más de la calidad e implicación de su fuerza de trabajo. Los factores que influyen sobre la seguridad, salud, bienestar y moral de los empleados necesitan formar parte de los objetivos de mejora continua de la empresa.

Respuesta rápida. También se resalta el valor de acortar la duración de los ciclos. Una respuesta más rápida y flexible a los clientes se está convirtiendo cada año en un requisito más crítico de la gestión empresarial. Las mejoras en esta área requieren a menudo un rediseño de los procesos de trabajo, eliminando pasos de trabajo innecesarios y haciendo un uso mejor de la tecnología. Las medidas del rendimiento del tiempo deberán estar entre los indicadores de la calidad usados por las organizaciones líderes. Se deberán integrar objetivos relativos al tiempo de respuesta, a la calidad y a la productividad.

Calidad del diseño y prevención. En todos los criterios se destaca la importancia de los sistemas de calidad basados en la prevención. La calidad del diseño es un impulsor importante de la calidad «hacia abajo». Este concepto incluye procesos y productos robustos. Incluye también los tiempos desde el concepto al cliente, la duración completa del diseño, desarrollo y producción, y la entrega al cliente de los nuevos productos y servicios.

El concepto de mejora continua y acciones correctoras que implica intervención «hacia arriba» también se trata aquí. Este concepto destaca que los cambios deberán hacerse en las primeras etapas en que sea posible para conseguir ahorros mayores. Este valor reconoce también

que los factores de éxito más importantes en la competición incluyen la duración del ciclo desde el diseño a la introducción en el mercado. Para satisfacer las demandas de mercados nacionales e internacionales con rápidos cambios, las empresas necesitan realizar «ingeniería concurrente» en actividades que van desde la investigación básica a la comercialización.

Perspectiva a largo plazo. Este concepto destaca la necesidad de contemplar el futuro de la organización con una perspectiva a largo plazo y tomar en consideración a los grupos de interés: clientes, empleados, accionistas y comunidad. La planificación debe tener en cuenta las nuevas tecnologías, las necesidades cambiantes de los clientes y la mezcla cambiante de clientes, los nuevos requisitos de las regulaciones, las expectativas de la comunidad y la sociedad y las estrategias de los competidores. También se pone el énfasis en el desarrollo a largo plazo de empleados y proveedores, y en el cumplimiento de las responsabilidades públicas y en servir como modelo de ciudadanía corporativa a imitar.

Gestión por hechos. Este concepto destaca la necesidad de tomar decisiones basadas en datos, información y análisis fiables. Estos datos necesitan reflejar con exactitud las necesidades, deseos, expectativas y percepciones de los clientes; dar descripciones exactas del rendimiento de los bienes y servicios vendidos; reflejar claramente la situación del mercado; retratar con exactitud las ofertas, niveles de rendimiento y niveles de satisfacción de los bienes y servicios de los competidores; proporcionar hallazgos claros de los temas que interesan a los empleados, y retratar con exactitud los costes y asuntos financieros. Se destaca el papel del análisis. También aquí se pone el énfasis en el papel del benchmarking para comparar el rendimiento de calidad de la organización con el rendimiento de las organizaciones competidoras o mejores en su clase.

Se destaca también la necesidad de indicadores de rendimiento de la organización. Estos indicadores son características mensurables de bienes, servicios, procesos y operaciones de la compañía. Se utilizan para evaluar, rastrear y mejorar rendimientos. Deberán ser claramente enlazados para mostrar la relación entre metas estratégicas y las actividades de la compañía.

Desarrollo de alianzas. La necesidad de desarrollar alianzas internas y externas para cumplir con las metas globales también se destaca en los valores capitales del PNCMB. Estas alianzas pueden incluir relaciones trabajadores-directiva; relaciones con los proveedores clave; acuerdos de trabajo con escuelas técnicas, colegios de la comunidad y universidades, y alianzas estratégicas con otras organizaciones.

Responsabilidad y ciudadanía corporativas. Los valores y conceptos capitales resaltan también que el sistema de calidad de la organización debe contemplar la responsabilidad y ciudadanía corporativas. Esto incluye la ética empresarial, protección de la salud pública y del medio ambiente. Las operaciones diarias de la empresa y el ciclo completo de la vida de los productos vendidos deberán tener en cuenta su impacto sobre la salud, la seguridad y el medio ambiente. La planificación de la calidad deberá anticipar cualquier impacto adverso de los servicios de gestión, producción, distribución, transporte, uso y desecho de sus productos.

La responsabilidad corporativa también se refiere al liderazgo y apoyo de áreas como educación, conservación de recursos, servicios a la comunidad, mejora de las prácticas industriales y de empresa, y el compartir información, herramientas y conceptos relacionados con la calidad no patentados.

Enfoque en los resultados. Los criterios del premio destacan continuamente los resultados. Pone de relieve que la medida del rendimiento necesita centrarse en los resultados clave. Pero estos resultados no deben ser meramente financieros. Los resultados deben guiarse y equilibrarse con los intereses de todos los grupos con interés; clientes, empleados, accionistas, proveedores y copartícipes, público y comunidad. La estrategia de la empresa

debe incluir explícitamente todos los requisitos de los grupos con interés. El uso de un conjunto equilibrado de medidas del rendimiento ofrece un medio eficaz de comunicar prioridades a corto y más largo plazo, controlar el rendimiento real y reforzar los apoyos para mejorar los resultados.

Los criterios del Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige. Los valores y conceptos capitales descritos anteriormente se integran en siete categorías:

- 1.0. Liderazgo.
- 2.0. Planificación estratégica.
- 3.0. Enfoque en el cliente y en el mercado.
- 4.0. Información y análisis.
- 5.0. Enfoque en los recursos humanos.
- 6.0. Gestión del proceso.
- 7.0. Resultados empresariales.

Las relaciones dinámicas entre estas siete categorías están descritas mejor en la Figura 14.7, tal como se presenta en el folleto de los Criterios del Premio 1988.

Liderazgo, planificación estratégica, enfoque en el cliente y en el mercado representan la tríada del liderazgo. Estas categorías se colocan juntas para poner de relieve la importancia de un liderazgo enfocado en la estrategia y en los clientes. Enfoque en los recursos humanos, gestión del proceso, resultados empresariales, representan la tríada de los resultados. Los empleados de una empresa y sus proveedores asociados a través de sus procesos clave efectúan el trabajo de la organización que producen los resultados empresariales. Todas las acciones de la empresa apuntan hacia los resultados empresariales: un conjunto de resultados de rendimiento con los clientes, financieros y no financieros, incluyendo resultados de recursos humanos y responsabilidad pública. Información y análisis es una categoría crítica para la gestión efectiva y para un sistema basado en hechos que mejore el rendimiento y la competitividad de la

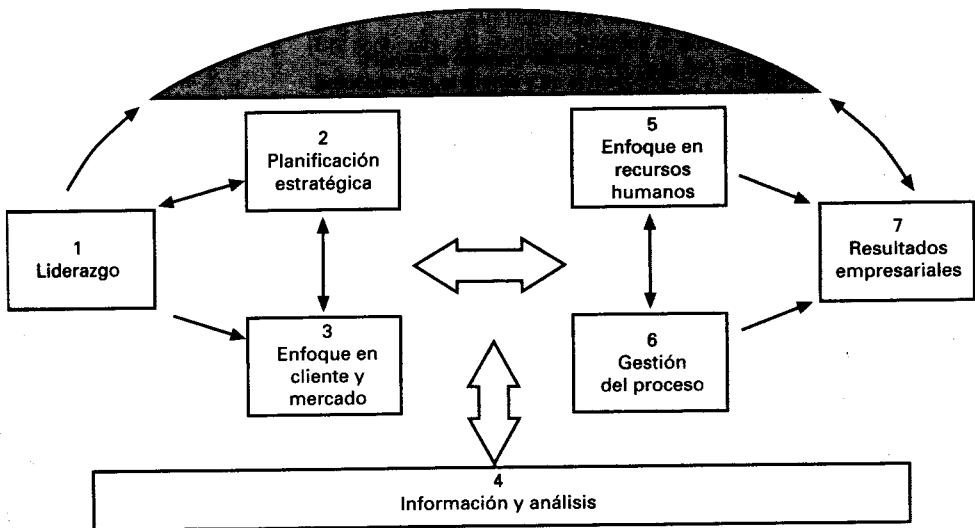


FIGURA 14.7 Los criterios Malcolm Baldrige para un marco de excelencia en el funcionamiento, una perspectiva de sistema (*Instituto Nacional de Normas y Tecnología, 1998, p. 43*).

empresa. Información y análisis sirven de fundamento para el sistema de gestión del rendimiento.

Las siete categorías están subdivididas en 20 puntos de examen, cada uno enfocado a un requisito principal. Cada punto contiene una o más áreas de aplicación. Hay 29 áreas de aplicación. Las siete categorías, los 20 puntos de examen y la puntuación para cada categoría y punto de examen se muestran en la Tabla 14.1.

Las áreas de aplicación dan instrucciones específicas de cómo debe incluirse la información en cada formulario de solicitud. Las notas también ayudan al solicitante a entender dónde se deben introducir ciertos datos cuando parece haber varias posibilidades.

Un ejemplo de un punto de examen y sus cuatro áreas de aplicación se proporciona en la Figura 14.8.

El énfasis en los resultados del Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige.

Durante los primeros años del Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige, algunos pensaron que se ponía demasiado énfasis en los sistemas de calidad y muy poco énfasis en los resultados de calidad. Conti (1992) comparó los puntos fuertes y los puntos débiles del Premio

TABLA 14.1 El Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige: Criterios de 1998 para la excelencia en el funcionamiento. Departamento de Comercio de EE.UU., Instituto Nacional de Normas y Tecnología, Programa Nacional de Calidad, Gaithersburg, MD

Temas de evaluación y puntuaciones 1995

- 1.0. Liderazgo (110 puntos)
 - 1.1. Sistema de liderazgo (80)
 - 1.2. Responsabilidad corporativa y ciudadanía (30)
- 2.0. Planificación estratégica (80 puntos)
 - 2.1. Proceso de despliegue de la estrategia (40)
 - 2.2. Estrategia de la empresa (40)
- 3.0. Enfoque en el cliente y en el mercado (80 puntos)
 - 3.1. Conocimiento del cliente y del mercado (40)
 - 3.2. Satisfacción del cliente e intensificación de las relaciones (40)
- 4.0. Información y análisis (80 puntos)
 - 4.1. Selección y uso de la información y los datos (25)
 - 4.2. Selección y uso de información y datos comparativos (15)
 - 4.3. Análisis y revisión del funcionamiento de la empresa (40)
- 5.0. Enfoque en los recursos humanos (100 puntos)
 - 5.1. Sistemas de trabajo (40)
 - 5.2. Educación de los empleados (30)
 - 5.3. Bienestar y satisfacción de los empleados (30)
- 6.0. Gestión de los procesos (100 puntos)
 - 6.1. Gestión del producto y procesos del servicio (60)
 - 6.2. Gestión de los procesos de apoyo (20)
 - 6.3. Gestión de los procesos de proveedores y de empresas asociadas (20)
- 7.0. Resultados del negocio (450 puntos)
 - 7.1. Resultados de satisfacción del cliente (125)
 - 7.2. Resultados financieros y de mercado (125)
 - 7.3. Resultados de recursos humanos (50)
 - 7.4. Resultados de proveedores y de empresas asociadas (25)
 - 7.5. Resultados específicos de la empresa (125)

Total puntos 1.000

Fuente: Instituto Nacional de Normas y Tecnología, Criterios de 1998 para la excelencia en el funcionamiento, *Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige*, Gaithersburg, MD, 1998.

FORMATO DEL PUNTO

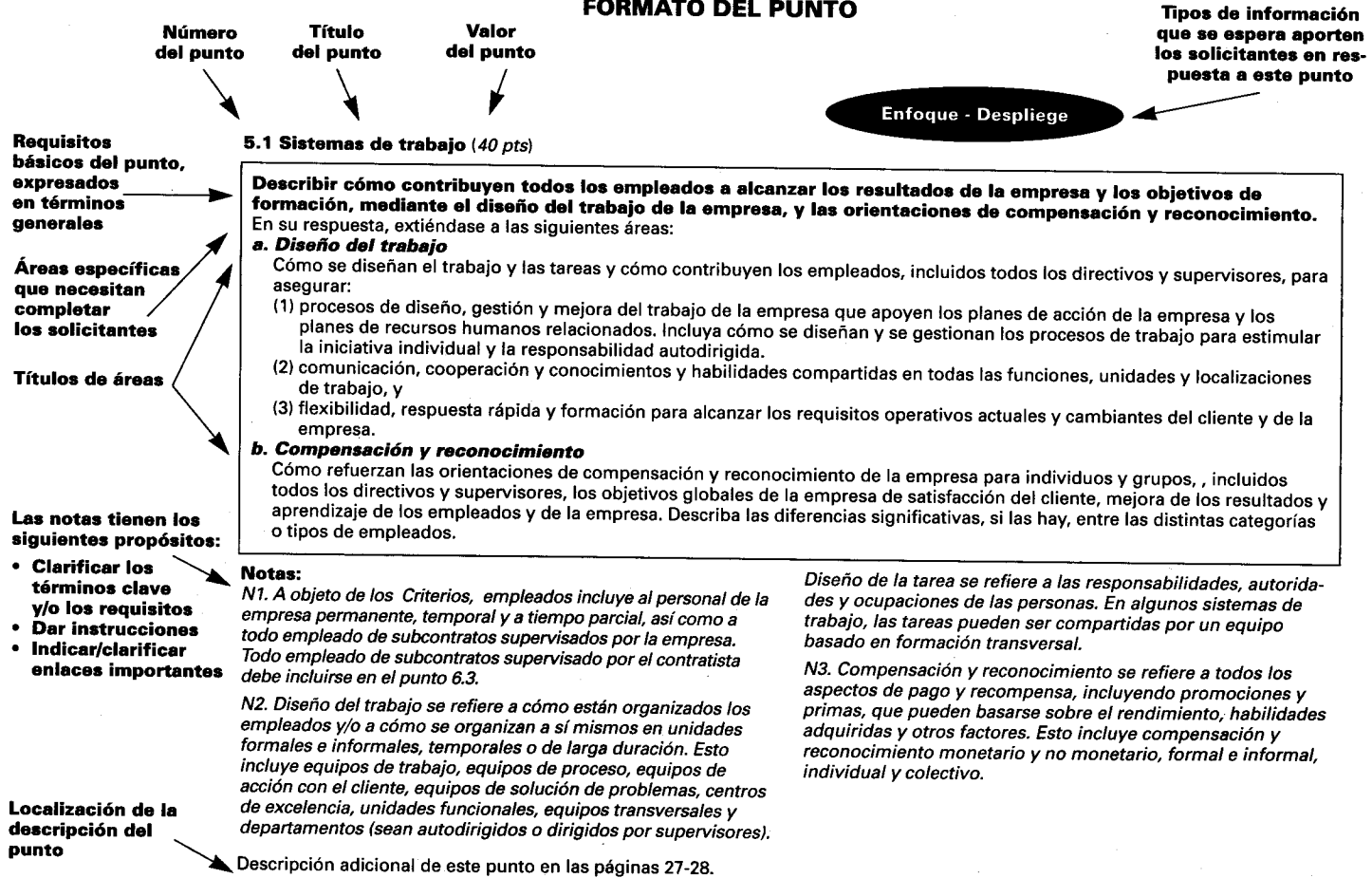


FIGURA 14.8 Ejemplo de áreas que completar (National Institute of Standards and Technology 1998, p. 37).

Deming de Aplicación, el Premio Europeo de Calidad y el Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige en un documento muy penetrante. Las críticas de Conti a las evaluaciones basadas en los sistemas daban justo en la diana. La prueba de la eficacia de cualquier sistema de calidad *debe* estar en los resultados producidos por el sistema.

Conti señala el aparente exceso de enfoque en los sistemas y defecto de enfoque en los resultados reales, por parte del PNCMB. En la realidad, los solicitantes del Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige han puesto siempre el énfasis en los resultados, a veces incluso introduciendo gráficos y datos en lugares inadecuados del formulario de solicitud. Los evaluadores también buscan resultados en casi cualquier área que tratan.

No obstante, el enunciado del formulario de solicitud no estaba claro en los primeros años y era posible interpretar que el proceso de solicitud sólo daba un 10 por ciento de peso a los resultados de satisfacción del cliente y 10 por ciento de peso a los resultados internos. Algunas empresas, y muchos evaluadores, interpretaban las orientaciones de ese modo.

La revisión de 1998 deja completamente claro que el enfoque está en los resultados. El criterio 7, Resultados empresariales, vale ahora 450 puntos de los 1.000.

Las aplicaciones actuales están repletas de cuadros, gráficos, tablas y otras formas de resultados. Las empresas ganadoras se han adentrado en el método de «gestión por hechos», y no resulta sorprendente que informen de sus actividades en documentos ricos en hechos. Los evaluadores esperan esto y a menudo se niegan a calificar alto un punto de examen si no tiene datos convincentes que respalden una declaración. Una de las notas más corrientes en una aplicación puntuada es «Falta de pruebas que respalden la afirmación de...».

Otra mala interpretación sobre la clasificación es la creencia de que los evaluadores y jueces se apoyan enteramente en la puntuación total al tomar la decisión final sobre los solicitantes. Esto no es en absoluto el caso. Las puntuaciones de las siete categorías están siempre muy a la vista de todos los evaluadores y jueces, y las puntuaciones individuales de las categorías se discuten largamente. Es muy improbable que una empresa que puntúe mal en una sola de las categorías sea seleccionada para un premio.

Las puntuaciones, de categorías individuales y la total, se usan principalmente en los primeros pasos del proceso de premio. Se seleccionan las solicitudes con alta puntuación para la fase de revisión por consenso. Después de la puntuación de consenso, se seleccionan las solicitudes con alta puntuación para la visita de inspección. Después de las visitas de inspección, *no* se vuelven a calcular las puntuaciones. Los hallazgos reales de los equipos en la visita de inspección se someten a los jueces, y éstos obtienen más información del líder o de los miembros del equipo que han hecho en la visita de inspección. En esta fase de la resolución, las puntuaciones son ya mucho menos importantes y se usan pocas veces. Los equipos de la visita de inspección concentran gran parte de su actividad en encontrar las pruebas que respalden las afirmaciones de las solicitudes, en verificar los resultados y en examinar los documentos de apoyo. Estas visitas se centran mucho en los resultados, no meramente en el enfoque y el despliegue. El énfasis está en si el enfoque de la empresa está *funcionando* en toda la empresa y en todas las funciones. Los evaluadores verifican los datos, entrevistan a los empleados y revisan las operaciones e instalaciones reales.

Durante la visita de inspección, los evaluadores buscan medidas de la calidad interna y externa. Buscan medidas de los niveles de calidad de los proveedores. Entrevistan a los empleados y comprueban los resultados de los procesos de formación, trabajo en equipo y mejora de la calidad. Buscan datos de satisfacción de los clientes, de evaluaciones competitivas y benchmarks. Buscan pruebas de mejora sostenida y real y de rendimiento de nivel mundial.

Administración del Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige. El Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige está administrado por medio de un complejo conjunto de procesos bajo la gestión del Instituto Nacional de Normas y Tecnología, Administración de la Tecnología del Departamento de Comercio de EE.UU. La Sociedad Americana de la

Calidad dirige el Premio. La mayor parte del trabajo de revisión y puntuación de las solicitudes, visitas de inspección, resolución y desarrollo de los procesos de gestión lo realizan cientos de voluntarios de empresas, universidades, gobierno, consultores y otras organizaciones de Estados Unidos. Estos voluntarios desempeñan distintos papeles clave.

El Comité de Supervisores es un pequeño grupo de personas que han destacado en la gestión de la calidad. Por ejemplo, el último presidente del Comité de Supervisores ha sido Robert Galvin, presidente del Comité Ejecutivo de Motorola. Motorola fue una de las primeras empresas ganadoras del PNCMB. Expertos en gestión de la calidad, como Armand V. Feigenbaum, William Golomski y Joseph M. Juran, han sido miembros del Comité de Supervisores.

Los supervisores se ocupan sobre todo de cuestiones de proceso. Se aseguran de que están en marcha procesos adecuados para gestionar el PNCMB, que están funcionando y que están mejorando continuamente. Revisan las recomendaciones de los jueces para las mejoras de los procesos, pero los supervisores no están implicados en lo que es la evaluación y el dictamen de las solicitudes.

Entre los temas que conciernen a los supervisores, están el número de premios, las categorías de los premios, los cambios de la ley y la transferencia de tecnología basada en las lecciones aprendidas.

El Comité de Evaluadores se compone de más de 200 personas seleccionadas por sus conocimientos, experiencia y reconocimiento de sus pares. No representan a empresas ni a organizaciones, pero sirven como voluntarios al bien común. Todos los miembros del Comité de Evaluadores reciben 3 días de formación rigurosa usando estudios de casos, ejercicios de puntuación y sesiones de creación de equipos. Se convierten en una potente red de trabajo para la mejora de calidad en todo Estados Unidos.

El Comité de Evaluadores se compone de tres grupos distintos: jueces, evaluadores senior y evaluadores. Hay nueve jueces, que supervisan el proceso entero de administrar el premio, ayudan a seleccionar a los evaluadores, revisan las solicitudes puntuadas, seleccionan las organizaciones que recibirán las visitas de inspección y revisan los resultados de estas visitas. Luego deciden qué organizaciones, si hay alguna, recomendar para el Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige.

La decisión final sobre los premios la toma el secretario de Comercio, tras más evaluaciones de fondo sobre las organizaciones recomendadas. Estas evaluaciones adicionales sólo son para determinar si una organización tiene pendientes denuncias relacionadas con el medio ambiente, acciones del Departamento de Justicia, u otros problemas. Si estos cargos son significativos, el secretario puede eliminar a la organización de la lista recomendada. El secretario no puede añadir ninguna organización a la lista y no tiene ninguna otra influencia sobre el proceso del premio.

Los jueces supervisan cada paso del proceso del PNCMB, pero sólo están implicados realmente en la revisión de las solicitudes después de muchas horas de trabajo de los evaluadores. Estas evaluaciones, cribas y visitas de inspección proporcionan el fundamento sobre el que se construye el proceso del premio.

Hay aproximadamente de 20 a 30 evaluadores senior que juegan un papel crucial. Son seleccionados por su experiencia y conocimientos. Muchos han sido simples evaluadores durante varios años o están implicados directamente en la gestión de la calidad de organizaciones ganadoras. Puntúan las solicitudes y dirigen el proceso de revisión por consenso.

Hay casi 200 evaluadores. Los evaluadores puntúan todas las solicitudes, efectúan las visitas de inspección con los evaluadores senior y proporcionan información cada año sobre cómo mejorar las pautas de las solicitudes, el proceso de puntuación y el proceso entero del premio.

El proceso del PNCMB sigue varios pasos cuidadosamente definidos. El primero es la mejora anual de los criterios, de las pautas y del proceso entero del premio. El siguiente paso es el cumplimiento del formulario de determinación de la elegibilidad por la empresa solicitante. Los solicitantes deben tener aprobada la elegibilidad antes de solicitar el premio. Cada solicitante rellena y envía la solicitud. Las solicitudes al premio pasan entonces por cuatro fases de revisión:

- Paso 1:* Revisión independiente por un mínimo de cinco miembros del Comité de Supervisores.
- Paso 2:* Revisión por consenso y evaluación de las solicitudes que hayan puntuado bien en el paso 1.
- Paso 3:* Visitas de inspección a los solicitantes que hayan puntuado bien en el paso 2.
- Paso 4:* Revisión y recomendaciones del juez.

El sistema de puntuación usado por el Comité de Supervisores está descrito en las pautas de solicitud. Se basa en tres dimensiones de evaluación: (1) enfoque, (2) despliegue y (3) resultados. Todos los puntos de examen requieren que los solicitantes proporcionen información relativa a una o más de las tres dimensiones. Las pautas de puntuación se reproducen en la Figura 14.9.

Cada año, después de entregar al secretario de Comercio las recomendaciones de las empresas ganadoras, los jueces revisan todo el proceso del PNCMB. Se pide información a todos los miembros del Comité de Supervisores, a las empresas solicitantes, al administrador del proceso del premio (ASQ), al personal de la oficina del Premio Nacional de Calidad y a otras partes interesadas. Se estudian cuidadosamente las sugerencias de mejora y cada año se introduce una serie de cambios en los criterios del premio, en las pautas de solicitud y en el proceso del premio. Esta mejora constante es uno de los puntos fuertes del Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige.

EL PREMIO EUROPEO DE CALIDAD

Conti (1993) presenta una perspectiva extensa de un sistema de calidad total en *Building Total Quality*. En este sobresaliente texto, Conti usa el Premio Europeo de Calidad como modelo fundamental de la calidad total y da muchas extensiones de este modelo ligado al rendimiento de la empresa.

La perspectiva de Conti del sistema de calidad total merece su comprensión. Descompone el sistema en cinco subdivisiones de primer nivel: papel de la dirección, valores y cultura empresariales, infraestructura, implicación/uso/papel de los recursos humanos, y adecuación/uso de los recursos técnicos. Se muestran en la Figura 14.10.

Conti sugiere también un despliegue ulterior de este modelo desde los criterios de primer nivel a los criterios de segundo nivel. Admite que la elección de criterios es más subjetiva en este nivel y se basa en la experiencia. Sugiere que cuando lo usan distintas empresas y/o distintos sectores del mercado, es esencial asignar pesos apropiados a los diferentes criterios. De hecho, algunos de los pesos asignados pueden ser de cero para ciertas empresas. Los criterios de segundo nivel de Conti se muestran en la Figura 14.11.

Conti fue un contribuyente capital al desarrollo del Premio Europeo de Calidad, de modo que no es sorprendente que su modelo esté conectado estrechamente con el modelo subyacente de este premio.

El Premio Europeo de Calidad (PEC) comparte muchos elementos de los conceptos y criterios del Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige, pero los dos premios difieren en algunos aspectos importantes. Conti ilustra claramente las diferencias y discute abiertamente los puntos fuertes y los puntos débiles de ambos enfoques, e igualmente compara a ambos con el Premio Deming de Aplicación.

El modelo lógico del PEC está muy claro (Fig. 14.12). El primer elemento es el liderazgo que impulsa la gestión del personal, de la política y estrategia, y de los recursos. Éstos, a su vez, impulsan todos los procesos que impulsan la satisfacción del personal, la satisfacción del cliente y el impacto en la sociedad. Los tres impulsan los resultados de la empresa.

Una de las mayores diferencias entre el Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige y el Premio Europeo de Calidad es el énfasis que el PEC pone en la autoevaluación. El PEC hace

PUNTUACIÓN	ENFOQUE/DESPLIEGUE
0 %	Evidente enfoque no sistemático; información anecdótica.
0 % a 30 %	- Comienzo de enfoque sistemático a los objetivos principales del punto. - Etapas iniciales de una transición que va de reaccionar ante los problemas a un enfoque general de mejora. - Brechas importantes en el despliegue que impedirán el progreso hacia la consecución de los objetivos principales del punto.
40 % a 60 %	- Un enfoque seguro y sistemático que responde a los objetivos principales del punto. - Un proceso de mejora basado en los hechos funcionando en las áreas clave; se pone más énfasis en la mejora que en la reacción a los problemas. - No hay brechas importantes en el despliegue, aunque algunas áreas o unidades de trabajo pueden estar en etapas muy tempranas del despliegue.
70 % a 90 %	- Un enfoque seguro y sistemático que responde a los objetivos principales del punto. - Un proceso de mejora basado en los hechos y una colaboración y aprendizaje en la organización son herramientas clave de gestión; prueba clara de refinamiento e integración mejorada como resultado de ciclos de mejora y análisis. - El enfoque está bien desplegado, sin brechas importantes; el despliegue puede variar en algunas áreas o unidades de trabajo.
100 %	- Un enfoque seguro y sistemático que responde enteramente a todos los requisitos del punto. - Un proceso de mejora muy fuerte basado en los hechos y una colaboración y aprendizaje extendidos en la organización son herramientas clave de gestión; fuerte refinamiento e integración, respaldados por un análisis excelente. - El enfoque está completamente desplegado, sin ningún punto débil o brechas significativos en ningún área o unidad de trabajo.

PUNTUACIÓN	RESULTADOS
0 %	Sin resultados o con malos resultados.
10 % a 30 %	- Etapas iniciales de tendencias de desarrollo; algunas mejoras y/o buenos niveles iniciales de resultados en unas pocas áreas. - Sin informe de resultados en muchas o en la mayoría de las áreas de importancia para los requisitos clave de la empresa solicitante.
40 % a 60 %	- Informe de tendencias de mejora y/o de buenos niveles de resultados en muchas o en la mayoría de las áreas de importancia para los requisitos clave de la empresa solicitante. - Sin patrón de tendencias adversas y/o de malos niveles de resultados en áreas de importancia para los requisitos clave de la empresa solicitante. - Algunas tendencias y/o niveles de resultados actuales —evaluados frente a comparaciones relevantes y/o benchmarks— muestran áreas fuertes y/o buenas a muy buenas en relación con niveles de resultados.
70 % a 90 %	- Los resultados reales son buenos o excelentes en la mayoría de las áreas de importancia para los requisitos clave de la empresa solicitante. - Son sostenidas la mayoría de las tendencias de mejora y/o de los niveles de resultados reales. - Muchas o la mayoría de las tendencias y/o de los niveles de resultados reales —evaluados frente a comparaciones relevantes y/o benchmarks— muestran áreas de liderazgo y muy buenos niveles de resultados relacionados.
100 %	- Los resultados reales son excelentes en la mayoría de las áreas de importancia para los requisitos clave de la empresa solicitante. - Tendencias de mejora excelentes y/o niveles de resultados sostenidos excelentes en la mayoría de las áreas. - Pruebas concluyentes de liderazgo en el sector y en benchmarking demostradas en la mayoría de las áreas.

FIGURA 14.9 Pautas de puntuación Baldrige (*National Institute of Standards and Technology 1998, p. 35*).

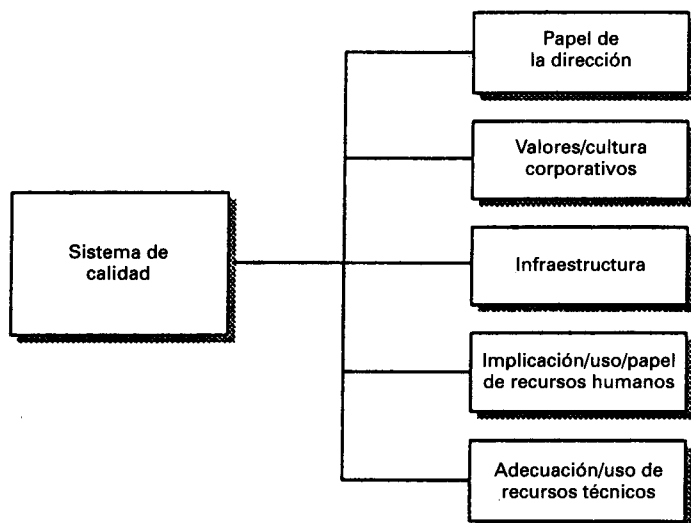


FIGURA 14.10 Despliegue de primer nivel de un sistema de calidad (Conti 1993, p. 112. Usado con su autorización).

de la autoevaluación un requisito de entrada para las empresas que solicitan el premio. Conti (1997) subraya esto en un texto más reciente, *Organizational Self-Assessment*.

Una segunda diferencia entre el PEC y el PNCMB, que Conti cree que es un punto débil del PEC, es la ausencia aparente de la fundamental categoría de resultados internos. Algunas personas arguyen que los resultados internos están implícitos en otras categorías, pero Conti cree que «es inadmisibles que una categoría tan importante esté ausente o implícita en alguna otra categoría» (Conti 1993, p. 289).

Otra diferencia entre el PNCMB y el PEC es el modo en que se administran los premios. El PNCMB es competitivo; se da a un máximo de dos empresas en cada una de las tres categorías: fabricación, servicios y pequeña empresa. Hasta ahora esto no ha supuesto ningún problema, dado que el máximo número de empresas no se ha alcanzado nunca. El PEC es esencialmente no competitivo, cada empresa que alcanza la marca de pase recibe un «premio». El Premio se da al mejor de los «premios». En cierto modo, esto hace al PEC incluso más competitivo, ya que las empresas tienen un mayor deseo de ganar El Premio, no meramente un «premio».

EL PREMIO DEMING DE APLICACIÓN

Otra importante contribución al desarrollo de la calidad total ha sido el Premio Deming de Aplicación, de la Unión Japonesa de Científicos e Ingenieros. En su concluyente libro, *Companywide Quality Control*, Kondo describe la creación y evolución del Premio Deming (Kondo 1995, pp. 37-42):

En reconocimiento a la amistad y contribución de Deming a Japón, se estableció el Premio Deming en 1951 a sugerencia de JUSE para estimular el desarrollo de QC (control de calidad) en Japón. Los premios estaban financiados inicialmente con la donación generosa por Deming de sus derechos sobre las transcripciones de sus conferencias de su curso de QC de ocho días y sobre la traducción al japonés de su libro *Some Theory of Sampling*, junto con otras donaciones.

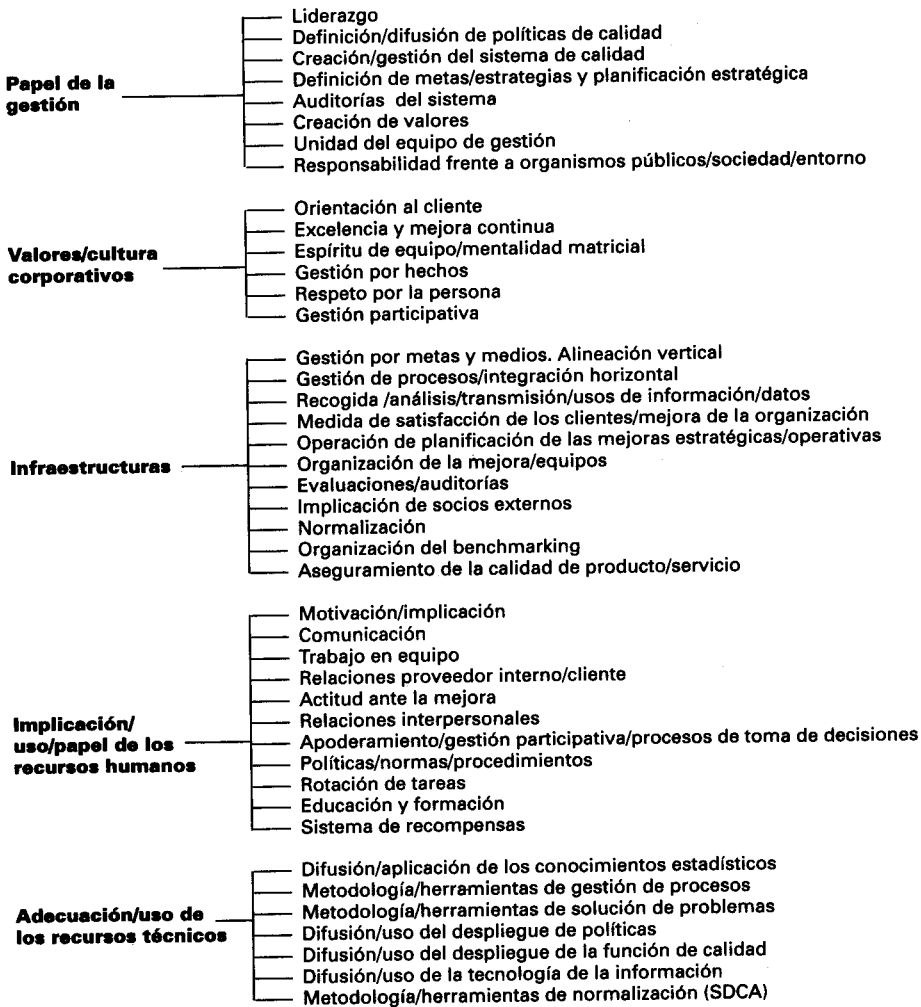


FIGURA 14.11 Despliegue de segundo nivel de un sistema de calidad (Conti 1993, p. 113. Usado con su autorización).

Existen dos tipos de Premio Deming: el Premio Deming para personas y el Premio Deming de Aplicación para empresas y sus divisiones (Kondo 1995, p. 38).

El Premio Deming de Aplicación recompensa a empresas o divisiones operativas que han alcanzado resultados sobresalientes mediante la aplicación inteligente de CWQC (control de calidad en toda la empresa) basada en métodos estadísticos y que se estima que con toda probabilidad seguirán haciéndolo así en el futuro, donde CWQC se define como «la actividad de diseñar, producir y suministrar económicamente productos y servicios de la calidad demandada por los clientes, basándose en principios orientados al cliente y con plena consideración del bienestar público».

En más de 40 años de existencia del Premio Deming de Aplicación, se han introducido muchas modificaciones y mejoras en los criterios del premio y en la administración del premio. El Premio Deming de Aplicación no es competitivo; toda empresa cuya solicitud sea aceptada

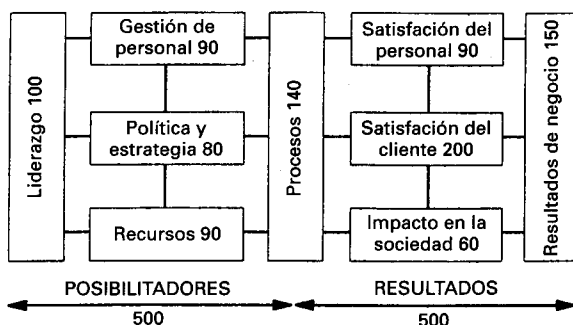


FIGURA 14.12 Premio Europeo de Calidad: el proceso de puntuación (*Leadership for the Quality Century, 1997, Juran Institute, Inc., Wilton, CT. Usado con su autorización*)*.

puede ganar. Los evaluadores son seleccionados por JUSE de entre un pequeño grupo de académicos y otros expertos distinguidos asociados con organizaciones no lucrativas, que comparten un enfoque de la gestión de calidad profundamente enraizado y básicamente uniforme (Conti 1993, p. 286).

Conti ilustra con un cuadro sencillo el despliegue del primer nivel y un ejemplo del despliegue del segundo nivel para el modelo de evaluación del Premio Deming de Aplicación. Este modelo se da en la Figura 14.13.

Existen varias diferencias entre el Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige y el Premio Deming de Aplicación. No hay límite en el número de empresas que pueden recibir un Premio Deming de Aplicación cada año. Hay un énfasis mayor en el uso de métodos estadísticos que en el Premio Baldrige. La propia empresa decide cuándo va a recibir una evaluación objetiva de si sus actividades han alcanzado el nivel capaz de pasar el examen del Premio Deming de Aplicación. Normalmente, la empresa encarga a un equipo de consultores de JUSE que proporcione un apoyo continuo de consultoría durante los 4 o 5 años precedentes al examen oficial.

Kondo señala que una de las principales diferencias entre el Premio Deming de Aplicación y el Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige es que la lista de comprobación de los puntos que los solicitantes deben cumplir para ganar el Premio Baldrige es mucho más detallada, llegando a las 23 páginas. Debido al interés suscitado en todo el mundo, el Comité del Premio Deming creó nuevas reglas en 1984 para que pudieran presentarse los países de fuera del Japón. En 1989, una empresa de servicio de electricidad estadounidense, Florida Power & Light, se convirtió en la primera compañía ganadora extranjera. En 1991, Philips Taiwan se convirtió en la segunda ganadora del Premio Deming de Aplicación para Compañías Extranjeras, y en 1994, la división Power Systems de AT&T fue la tercera.

COMPARACIÓN DE LOS PREMIOS NACIONALES E INTERNACIONALES DE CALIDAD CON LAS NORMAS INTERNACIONALES

En los últimos años ha habido numerosos intentos de comparar las series de normas ISO 9000 con el Premio Nacional de Calidad Malcolm Baldrige, el Premio Deming de Aplicación y el

* El esquema del Premio Europeo de Calidad de este capítulo corresponde al vigente en 1998 (*Nota del traductor*).

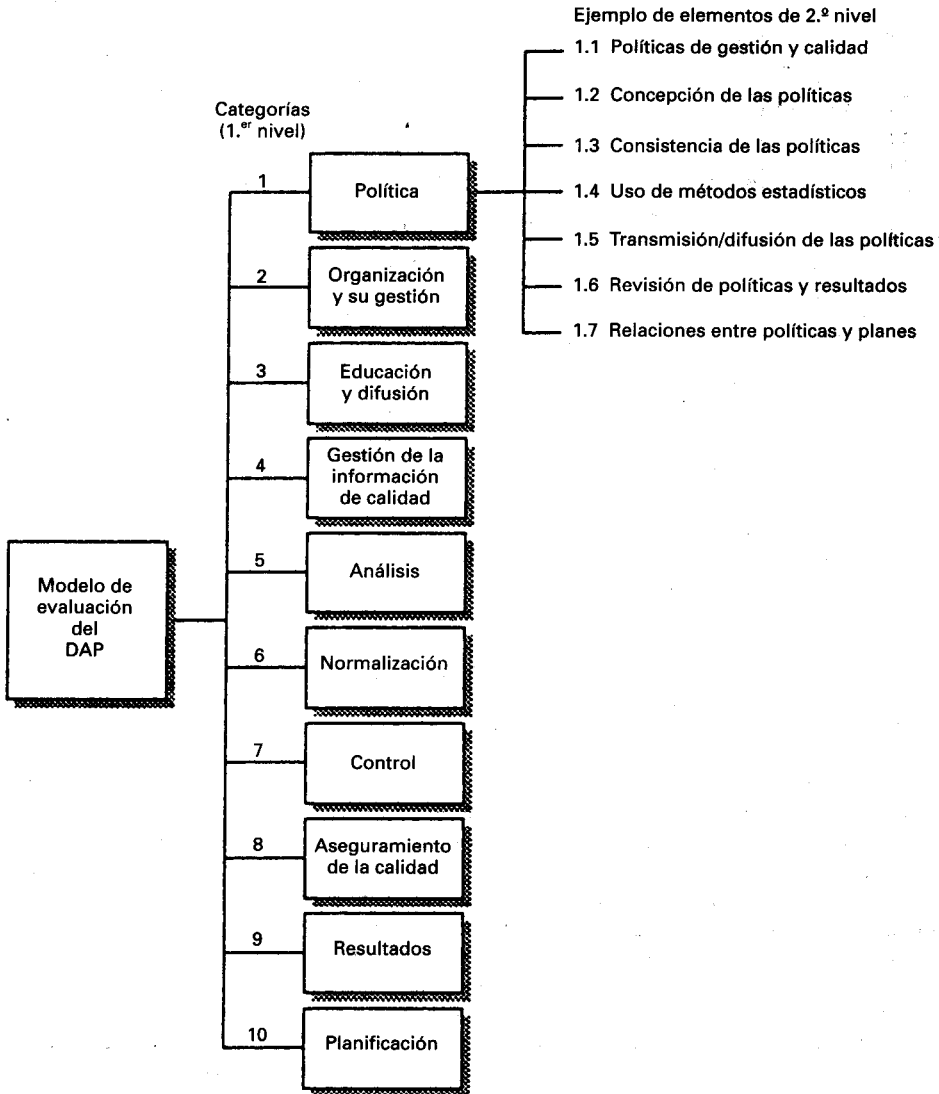


FIGURA 14.13 El Premio Deming de Aplicación (Conti 1993, p. 281. Usado con su autorización).

Premio Europeo de Calidad. Conti (1993, p. 283) proporciona una comparación (Fig. 14.14). En el Capítulo 11 se trata en profundidad de las series de normas ISO 9000.

En el cuadro de Conti (Fig. 14.14), las series de normas ISO 9000 proporcionan un modo de evaluación y certificación de la excelencia de un sistema de calidad que está en el extremo izquierdo del eje x. Es decir, el sistema ISO se centra en los productos y es el menos amplio de los sistemas. Está también en la parte inferior del eje y, indicando que no hay evaluación de excelencia de resultados, sino simplemente del sistema.

Conti ve al PNCMB, al Premio Deming de Aplicación y al PEC como más o menos iguales en su enfoque en la totalidad del sistema de calidad, pero el PEC está algo más centrado en los resultados. El PNCMB ha cambiado desde las comparaciones de Conti y está ahora más enfocado en los resultados, quizá igual que el PEC.

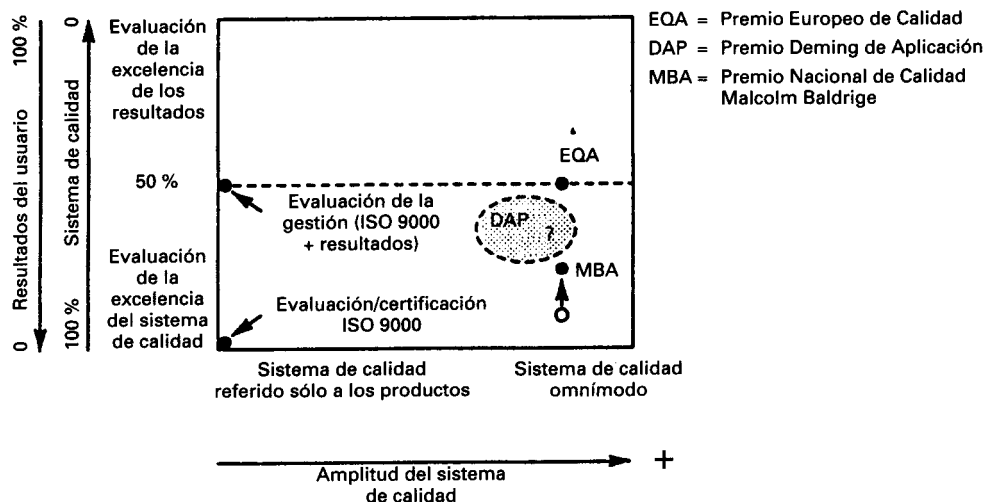


FIGURA 14.14 Comparación entre los premios, las evaluaciones y la ISO (Conti 1993, p. 283. Usado con su autorización).

REINGENIERÍA, SEIS SIGMA Y OTRAS EXTENSIONES DE LA GESTIÓN DE LA CALIDAD TOTAL

En los últimos años ha habido muchas redefiniciones de la gestión de la calidad total. TQM se ha convertido en un término paraguas para muchas colecciones diferentes de conceptos, métodos y herramientas. A medida que se crean nuevos conceptos, frecuentemente se añaden como extensiones a la colección básica. A veces los creadores de estas ideas y herramientas intentan diferenciar sus ideas de TQM y se buscan un lugar separado para sus esfuerzos. Pero la mayoría de las empresas líderes integran continuamente los nuevos métodos con los métodos exitosos más antiguos y descartan lo que no funciona en ese sentido.

Hace unos pocos años se hizo un gran esfuerzo para proclamar que la ingeniería era algo totalmente distinto de otros métodos considerados parte de TQM. Algunas empresas llegaron a crear departamentos nuevos de reingeniería separados de los departamentos de calidad o de los departamentos de mejora continua. Pronto se fundieron estos esfuerzos. En el Capítulo 6, «Gestión de los procesos», se trata a fondo la historia de la gestión de los procesos de empresa, de la mejora de la calidad de los procesos de empresa y de la reingeniería.

Más recientemente, ha habido un énfasis en «seis sigma» y formación de calidad «cinturón negro». El concepto de seis sigma lo introdujo en los años ochenta Motorola en sus intentos para reducir los defectos en los productos manufacturados a sólo unas pocas partes por millón. Más tarde, Motorola extendió el concepto de seis sigma a los procesos de empresa y a las operaciones de servicios. Motorola permitía una deriva media del proceso de hasta 1,5 desviaciones típicas, de forma que su término de seis sigma coloca realmente los objetivos en 4,5 desviaciones típicas, o sea, 3,4 partes/millón.

Conforme otras empresas han tomado ideas prestadas de Motorola y de otras empresas líderes y han añadido sus propias variaciones, seis sigma se ha convertido en «un programa dirigido a la casi eliminación de defectos de todo producto, proceso y transacción» (Tomkins 1997, p. 22). Seis sigma se ha convertido así en un enfoque disciplinado y cuantitativo para mejorar las operaciones en todo tipo de sectores y funciones empresariales. Las iniciativas seis

sigma pueden sonar muy familiares a muchas empresas líderes con sistemas de gestión de la calidad total exitosos, pero a menudo suenan muy nuevas a aquellas empresas que han simplemente rozado en el pasado la gestión de la calidad.

Los pasos básicos del proceso de seis sigma son muy similares a los procesos de mejora de la calidad y de control de la calidad que se han tratado en el Capítulo 5, «El proceso de mejora de la calidad», y en el Capítulo 4, «El proceso de control de la calidad». Los cinco pasos básicos se exponen normalmente como definir, medir, analizar, mejorar y controlar. Su implantación subraya el liderazgo en los niveles más altos de la empresa. En muchas compañías ha venido del máximo ejecutivo, como Jack Welch en General Electric, Bob Galvin en Motorola y Larry Bossidy en Allied Signal. La implantación ha bajado en cascada a través de todos los niveles de dirección y se han comprendido claramente las responsabilidades (Hoerl 1998, p. 36).

El principal énfasis de seis sigma, como en muchas otras iniciativas de calidad, está en la reducción de costes y desperdicios, mejora de los beneficios, mejora de la capacidad y reducción de la duración del ciclo. Se pone especial énfasis en satisfacer las necesidades de los clientes. Las organizaciones intentan estimar el impacto financiero de cada operación. Estas empresas establecen también una métrica clara del rendimiento para cada mejora en costes, calidad, beneficios y mejora de capacidad. Se requieren decididamente cifras financieras. Los proyectos emprendidos son normalmente importantes con mejoras normalmente del orden de los 50.000\$ a 100.000\$.

Otra diferencia en las iniciativas de seis sigma y muchos programas de gestión de la calidad total está en la asignación de personal a tiempo completo. Los facilitadores y líderes de equipos (llamados a menudo cinturones negros y cinturones negros maestros) son elegidos cuidadosamente y trabajan el 50 por ciento de su tiempo en proyectos de mejora. La formación de estas personas es también extensiva, normalmente 4 o 5 semanas de formación intensiva y altamente cuantitativa (Hoerl 1998, p. 36). Algunas empresas han llegado a implantar, para sus nuevos cinturones negros, programas de formación que duraban hasta 6 meses.

En estos últimos años, otros muchos conceptos, métodos y herramientas se han convertido en parte de la filosofía global de la gestión de la calidad total. Muchos de estos conceptos se han convertido en parte de este manual. Durante miles de años, las organizaciones han intentado aprender los secretos del éxito de las otras, pero en estos últimos años el benchmarking se ha convertido en una herramienta de gestión frecuentemente usada (y a veces mal usada). El benchmarking está tratado en el Capítulo 12. Se han normalizado los sistemas de aseguramiento de la calidad y las evaluaciones por terceros se han convertido en un hecho corriente. Estos desarrollos se tratan en el Capítulo 11. Las organizaciones han extendido sus sistemas de calidad a sus proveedores, operaciones que han creado una verdadera relación cliente/proveedor. Estas extensiones se tratan en el Capítulo 21. El servicio al cliente, la satisfacción del cliente y la fidelidad del cliente se han convertido en elementos críticos de todos los sistemas de calidad. Muchos de estos nuevos desarrollos se discuten en el Capítulo 25. Nuevos métodos y herramientas se han desarrollado para extender la gestión de la calidad a los sistemas de información. De ellos se trata en el Capítulo 34.

REFERENCIAS

-
- Byrne, John A. (1996). «Strategic Planning». *Business Week*, New York, Aug. 26.
- Conti, Tito (1993). *Building Total Quality*, Chapman and Hall, London.
- Conti, Tito (1992). «A Critical Review of the Current Approach to Quality Awards». *Proceedings of the EOQ Conference*, Brussels, June, pp. 130-139.
- Deming, W. Edwards (1993). *The New Economics For Industry, Government, Education*, Massachusetts Institute of Technology, Center for Advanced Engineering Study, Boston.
- Deming, W. Edwards (1982). *Out of the Crisis*, Massachusetts Institute of Technology, Center for Advanced Engineering Study, Boston.

- Endres, Al C., and Godfrey, A. Blanton (1994). «The Evolution of Quality Management Within Telecommunications». *IEEE Communications Society Journal*, October.
- Fromm, Bill, and Schlesinger, Len (1993). *The Real Heroes of Business and Not a CEO Among Them*, Currency Doubleday, New York.
- Garvin, David A. (1991). «How the Baldrige Award Really Works». *Harvard Business Review*, Nov.-Dec., pp. 80-93.
- Godfrey, A. Blanton (1998). «Hidden Costs to Society». *Quality Digest*, vol. 18, no. 6, June, p. 18.
- Godfrey, A. Blanton (1997). «A Short History of Managing for Quality in Health Care». *The Handbook for Managing Change in Health Care*, Chip Caldwell, ed., ASQ Quality Press, Milwaukee, pp. 1-9.
- Godfrey, A. Blanton (1995). «The Malcolm Baldrige National Quality Award: Seven Years of Progress—7000 Lessons Learned». *Best on Quality*, vol. 5, Quality Press, Milwaukee, pp. 27-68.
- Godfrey, A. Blanton (1992). *Testimony on the Malcolm Baldrige National Quality Award before the Subcommittee on Technology and Competitiveness of the Committee on Science, Space and Technology*. U.S. House of Representatives, February 5, U.S. Government Printing Office.
- Godfrey, A. Blanton (1992). «Malcolm Baldrige National Quality Award—The Spark of the Quality Revolution», *Electronics Buyers News*, January.
- Godfrey, A. Blanton, and Myers, Dale H. (1994). «Self-Assessment Using the Malcolm Baldrige National Quality Award». *Proceedings of the First European Forum on Quality Self-Assessment*, March 3-4, Milano, Italy, pp. 67-77.
- Hamel, Gary, and Prahalad, C. K. (1994). *Competing for the Future*. Harvard Business School Press, Boston.
- Hammer, Michael (1996). *Beyond Reengineering*, Harper Business Division of Harper Collins Publishers, New York.
- Hammer, Michael, and Champy, James (1993). *Reengineering the Corporation*, Harper Collins, Inc., New York.
- Hoerl, Roger W. (1998). «Six Sigma and the Future of the Quality Profession». *Quality Progress*, vol. 31, no. 6, June, pp. 35-42.
- Juran, J. M. (1995). *Managerial Breakthrough, 30th Anniversary Edition*, McGraw-Hill, Inc., New York.
- Juran, J. M. (1992). *Juran on Quality By Design*, Free Press, New York.
- Juran, J. M. (1989). *Juran on Leadership for Quality—An Executive Handbook*, Free Press, New York.
- Juran, J. M. (1964). *Managerial Breakthrough*, McGraw-Hill, Inc., New York.
- Juran, J. M., and A. Blanton Godfrey (1990). «Worker Participation—Developments in the USA». *Proceedings of the International Congress of Quality Control Circles*, Tokyo, November.
- Juran, J. M., and Godfrey, A. Blanton (1990). «Total Quality Management (TQM)—Status in the U.S.». *Proceedings on the Senior Management Conference on TQC*, JUSE, Tokyo, November.
- Juran, Joseph M., and Gryna, Frank M. (1993). *Quality Planning and Analysis*, 3d ed., McGraw-Hill, New York.
- Juran, Joseph M., and Gryna, Frank M., eds. (1988). *Juran's Quality Control Handbook*, 4th ed., McGraw-Hill, New York.
- Kano, Noriaki, and Koura, Kozo (1991). «Development of Quality Control Seen Through Companies Awarded the Deming Prize». *Reports of Statistical Application Research*, Japanese Union of Scientists and Engineers, vol. 37, nos. 1-2, 1990-1991, pp. 79-105.
- Kondo, Yoshio (1995). *Companywide Quality Control: Its Background and Development*, 3A Corporation, Tokyo.
- Kondo, Yoshio, Kume, Hitoshi, and Shimizu, Shoichi (1995). «The Deming Prize». In *The Best on Quality: Targets, Improvement, Systems*, Quality Press, Milwaukee, vol. 5, pp. 3-19.
- National Institute of Standards and Technology (1998). *1998 Criteria for Performance Excellence*, Malcolm Baldrige National Quality Award, Gaithersburg, MD.
- National Institute of Standards and Technology (1992). *1992 Criteria for Performance Excellence*. Malcolm Baldrige National Quality Award, Gaithersburg, MD.
- One Hundredth Congress of the United States of America (1987). «The Malcolm Baldrige Quality Improvement Act of 1987». *H. R. 812, Federal Register*, January 6.
- Peppers, Don, and Rogers, Martha (1993). *The One to One Future: Building Relationships One Customer at a Time*, Currency Doubleday, New York.
- Peterson, Donald (1992). «How Donald Peterson Turned Ford Around», Interview in *Boardroom Reports*, New York, June 15.

- Peterson, Wayne (1992). *Testimony on the Malcolm Baldrige National Quality Award before the Subcommittee on Technology and Competitiveness of the Committee on Science, Space and Technology*. U.S. House of Representatives, U.S. Government Printing Office, Feb. 5.
- Port, Otis (1998). «Quality Claims Its Own Bull Market». *Business Week*, March 16, p. 113.
- Reichheld, Frederick F. (1996). *The Loyalty Effect*, Harvard Business School Press, Boston.
- Reimann, Curt W. (1992a). *Testimony on the Malcolm Baldrige National Quality Award before the Subcommittee on Technology and Competitiveness of the Committee on Science, Space and Technology*. U.S. House of Representatives, U.S. Government Printing Office, Feb. 5.
- Reimann, Curt W. (1992b). «The First Five Years of the Malcolm Baldrige National Quality Award». *Proceedings of IMPRO92*, Juran Institute, Inc., Wilton, CT, November 11-13.
- Sörqvist, Lars (1998). «Poor Quality Costing». Doctoral Thesis No. 23, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Starr, Martin K., ed. (1988). *Global Competitiveness—Getting the U.S. Back on Track*, W.W. Norton, New York.
- Sugiura, Hideo (1992). «Productivity in the Work Place: The Honda Story». International Productivity Congress, Asian Productivity Organization, Tokyo.
- The TQM Committee (1997a) «A Manifesto of TQM (1)—Quest for a Respectable Organization Presence». *Societas Qualitas*, vol. 10, no. 6, Jan./Feb.
- The TQM Committee (1997b) «A Manifesto of TQM (2)—Quest for a Respectable Organization Presence». *Societas Qualitas*, vol. 11, no. 1, Mar./Apr.
- The TQM Committee (1997c) «A Manifesto of TQM (3)—Quest for a Respectable Organization Presence». *Societas Qualitas*, vol. 11, no. 2, May/June.
- The TQM Committee (1997d) «A Manifesto of TQM (4)—Quest for a Respectable Organization Presence». *Societas Qualitas*, vol. 11, no. 3, July/Aug.
- Tomkins, Richard (1997). «GE Beats Expected 13 % Rise». *Financial Times*, October 10, p. 22.
- U.S. Department of Commerce (1998). *1998 Criteria for Performance Excellence*. National Institute of Standards and Technology, National Quality Program, Gaithersburg, MD.
- Wadsworth, H. M., Stephens, K. S., and Godfrey, A. B. (1986). *Modern Methods for Quality Control and Improvement*, John Wiley and Sons, New York.
- Waltari, Mika (1949). *The Egyptian*, Werner Söderström Osakeyhtiöm, Helsinki.
- Yasuda, Yuzo (1991). *40 Years, 20 Million Ideas: The Toyota Suggestion System*, translated by Fredrich Czupryna, Productivity Press, Cambridge, MA.

Capítulo 44

MÉTODOS ESTADÍSTICOS BÁSICOS

Edward J. Dudewicz

(Department of Mathematics, Syracuse University, Syracuse, New York)

EL CONJUNTO DE HERRAMIENTAS ESTADÍSTICAS	44.2	La distribución de Poisson	44.28
FUENTES Y RESUMEN DE DATOS	44.3	La distribución binomial negativa	44.29
Planificación de la obtención y análisis de datos	44.3	La distribución multinomial	44.30
Datos históricos, sus usos y riesgos	44.5	Selección de una distribución discreta	44.31
Datos para experimentos planificados	44.6	DISTRIBUCIONES CONTINUAS DE PROBABILIDAD	44.32
Filtrado de datos	44.7	La distribución continua uniforme	44.32
Estadística descriptiva para resumir datos	44.10	La distribución exponencial	44.33
Exactitud en el cálculo en estadística descriptiva	44.17	La distribución de Weibull	44.35
MODELOS DE PROBABILIDAD PARA EXPERIMENTACIÓN	44.19	La distribución normal	44.38
El espacio muestral	44.21	La distribución logarítmica normal	44.41
Sucesos	44.21	Distribuciones mezcladas	44.42
Reglas de la probabilidad; combinatoria	44.23	La distribución multinormal	44.44
Probabilidad condicional; teorema de Bayes	44.24	La distribución lambda generalizada y extendida	44.44
DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD DISCRETAS	44.26	Selección de una distribución continua	44.45
La distribución uniforme discreta	44.26	Métodos de muestreo y remuestreo (Bootstrap Methods)	44.46
La distribución binomial	44.27	ESTIMACIÓN ESTADÍSTICA	44.47
La distribución hipergeométrica	44.28	Estimación por puntos	44.47
		Estimación por intervalos de confianza	44.47
		Intervalos de predicción	44.52
		Intervalos de tolerancia	44.53
		Estimación bayesiana	44.60

Intervalos con amplitud y precisión fijada	44.61	HERRAMIENTAS ESTADÍSTICAS ADICIONALES	44.87
TESTS DE HIPÓTESIS ESTADÍSTICAS	44.61	Transformación de datos	44.87
Conceptos básicos, tipos de errores	44.61	Métodos de muestreo de Montecarlo	44.90
Utilización de la curva operativa característica en la selección de la región de aceptación ...	44.66	Métodos de muestreo y remuestreo	44.91
Test de una hipótesis con tamaño de muestra fijado inicialmente	44.67	Método generalizado de muestreo y remuestreo	44.92
Test de una hipótesis con tamaño de muestra no fijado inicialmente	44.79	Análisis de conglomerados (clúster) y análisis discriminante ..	44.92
Obtención de conclusiones de un test de hipótesis	44.80	Discriminación heterocedástica ..	44.94
Determinación del tamaño de muestra requerido para un test de hipótesis	44.84	Selección del mejor frente al test de hipótesis	44.94
Relación con los intervalos de confianza	44.84	ANÁLISIS DE REGRESIÓN Y CORRELACIÓN	44.95
Casos estándar	44.86	Regresión lineal simple	44.99
Significación estadística frente a significación práctica	44.86	Residuos, valores atípicos (outliers), intervalos de confianza y predicción, extrapolación; falta de ajuste. Observaciones repetidas	44.104
		Intervalos de confianza	44.105
		Regresión múltiple	44.106
		REFERENCIAS	44.117

EL CONJUNTO DE HERRAMIENTAS ESTADÍSTICAS

Muchas de las decisiones en control de calidad, así como en muchas áreas de la moderna actividad humana (por ejemplo, evaluación de nuevos tratamientos médicos y comprobación de máquinas, planificación de experimentos científicos y estrategias de marketing e inversión, por citar unas pocas), se apoyan en una base *estadística* —definida desde una óptica estrecha, como la colección, análisis e interpretación de datos, o con una visión más amplia, como «la ciencia de tomar decisiones en la incertidumbre»—. Para un práctico, la *estadística* es vista como un equipo de herramientas que ayuda a resolver problemas. El conjunto de herramientas estadísticas mostrado en la Tabla 44.1 da una lista de los problemas que pueden ser resueltos, las herramientas estadísticas que deben ser aplicadas y dónde pueden encontrarse en este libro.

Se utilizarán ejemplos prácticos lo más extensamente que nos sea posible en el espacio disponible, para suministrar al lector un modelo de solución y un conjunto de datos con análisis correcto que permita comprobar la exactitud del software de sus ordenadores. Salidas comentadas de esos programas de ordenadores, como el SAS y el BMDP, se utilizarán en muchos de esos ejemplos.

Además de los métodos estadísticos básicos discutidos en este capítulo, otros cuatro capítulos cubren áreas específicas: el Capítulo 45, «Control estadístico del proceso»; el Capítulo 46, «Muestreo de aceptación»; el Capítulo 47, «Diseño y análisis de experimentos», y el Capítulo 48, «Conceptos de fiabilidad y análisis de datos». Otros capítulos incluyen otras aplicaciones. También el Apéndice III, «Selección de normas, especificaciones y documentos relacionados con la calidad», incluye documentos sobre técnicas estadísticas y procedimientos.

FUENTES Y RESUMEN DE DATOS

La fuente de un conjunto de datos que deseamos analizar para resolver un problema es una consideración muy importante. Las dos fuentes que utilizaremos y que son las más frecuentemente utilizadas son los datos históricos y los datos obtenidos de un diseño de experimentos. Los investigadores que utilizan datos históricos son como un ciego examinando un elefante, por las razones que señalaremos en el apartado de Datos históricos, sus usos y problemas, así como en el apartado Datos para diseños de experimentos. Señalemos ahora que todos los datos necesitan una cuidadosa revisión, tal como se discute más adelante en Filtración de datos.

Planificación de la obtención y análisis de datos. Las herramientas citadas en la Tabla 44.1 deben utilizarse de forma adecuada para obtener un beneficio que justifique el costo de su utilización. Para obtener este beneficio no es suficiente con meter números en las fórmulas. El proceso completo debe incluir una planificación cuidadosa de la recogida de datos, análisis de los datos para extraer conclusiones estadísticas, y llevar los resultados obtenidos a la resolución del problema original. Un listado de algunas de las etapas de este proceso son las siguientes:

1. Recoger la suficiente información para pasar de la situación de un problema de ingeniería a una situación específica que pueda ser evaluada por métodos estadísticos.
2. Planificar la obtención de los datos.
 - a. Determinar el tipo de datos necesitado. Los datos variables (leídos en una escala de medida) pueden ser más caros que los atributos (pasa o no pasa), pero la información es mucho más útil.
 - b. Determinar si hay disponible datos históricos que puedan ser aplicados al problema presente; sin embargo, hay que tener cuidado con los peligros de los conjuntos de datos históricos.
 - c. Si el problema exige la evaluación de varias decisiones alternativas, obtener información de las consecuencias económicas de una decisión errónea.
 - d. Si el problema requiere la estimación de un parámetro, definir la precisión que se necesita en la estimación.
 - e. Determinar si el error de la medida es suficientemente grande para influir en el tamaño de la muestra o en el método de análisis de los datos; los errores de laboratorio pueden ocultar la variabilidad de los experimentos.
 - f. Definir las hipótesis necesitadas para calcular el tamaño de muestra requerido.
 - g. Calcular el tamaño de muestra requerido considerando la precisión deseada del resultado, riesgos estadísticos, variabilidad de los datos, medida del error, y otros factores.
 - h. Definir los requerimientos para preservar el orden de las medidas cuando el tiempo es un parámetro clave.
 - i. Definir los requerimientos para recoger los datos en grupos definidos que reflejen las diferentes condiciones que deben ser evaluadas.
 - j. Definir el método de análisis de datos y las hipótesis requeridas.
 - k. Definir las exigencias que se necesitan de los programas informáticos.
3. Recoger los datos.
 - a. Utilizar métodos que aseguren que la muestra se recoge de forma aleatoria.
 - b. Registrar los datos y las condiciones presentes en el tiempo en que se tomó cada observación.
 - c. Examinar el conjunto de datos para asegurar que el proceso tiene suficiente estabilidad para hacer predicciones válidas para el futuro.
4. Analizar los datos.
 - a. Filtrar los datos.

TABLA 44.1 El equipo de herramientas estadísticas

Problema	Herramienta estadística	Págs. o capítulo
1 Planificación de la investigación estadística	Planificación y análisis de datos para la resolución de problemas específicos	44.2 - 44.4
2 Resumen de datos	Distribución de frecuencias, histogramas e índices	44.10 - 44.19
3 Predicción de resultados con una muestra	Distribuciones de probabilidad	44.26 - 44.46
4 Determinación de probabilidad de sucesos	Teoremas básicos de probabilidad	44.19 - 44.26
5 Determinación de diferencias significativas entre dos conjuntos de datos o entre un conjunto de datos y un valor estándar	Test de hipótesis	44.61 - 44.80
6 Tamaño muestral requerido para un test de hipótesis	Determinación del tamaño de la muestra para un test de hipótesis	44.84
7 Determinación de la capacidad de un resultado muestral para estimar un valor verdadero	Límites de confianza	44.41 - 44.52
Tamaño muestral requerido para estimar un valor verdadero	Determinación del tamaño de muestra para la estimación	44.51 - 44.52
8 Determinación de límites de tolerancia en una característica	Límites de tolerancia estadística	44.53 - 44.57
Determinación de límites de tolerancia en dimensiones que interaccionan	Límites de tolerancia para dimensiones que interaccionan	44.56 - 44.60
9 Utilización de información anterior en predicción de sucesos futuros	Teorema de Bayes	44.24 - 44.25 44.60 - 44.61
10 Consideración de las consecuencias económicas en la definición de las reglas de decisión	Teoría de la decisión estadística	44.25
Conversión de datos para satisfacer hipótesis estadísticas	Transformaciones de datos	44.87 - 44.90
11 Predicción de la actuación de un sistema	Métodos de muestreo de Montecarlo	44.90 - 44.91
Determinación de la pertenencia a un grupo	Análisis de conglomerados (clúster) y discriminante	44.92 - 44.94
Determinación del mejor	Selección del mejor	44.94 - 44.95
12 Estimación de las relaciones entre dos o más variables por una ecuación que determina una variable por el conocimiento de las demás variables	Análisis de regresión	44.95 - 44.117
13 Control de calidad de procesos por la determinación precoz de cambios:		
1. Por variables	Gráficos de control de variables	Cap. 45
2. Por atributos	Gráficos de control de atributos	Cap. 45
14 Evaluación de calidad de lotes de un nivel de calidad definido:		
1. Medición de calidad por atributos	Planes de muestreo para atributos	Cap. 46
2. Medición de calidad por variables	Planes de muestreo para variables	Cap. 46
3. Determinación de fiabilidad	Planes de muestreo para fiabilidad	Cap. 46
4. Producto a granel	Planes de muestreo para producto a granel	Cap. 46
15 Planificación y análisis de experimentos:		
1. Investigación del efecto al variar un factor	Diseño de experimentos de un factor	Cap. 47
2. Investigación del efecto al variar dos o más factores	Diseño de experimentos de dos o más factores	Cap. 47
3. Investigación de la variabilidad de las mediciones de laboratorio	Test entre laboratorios	Cap. 47
4. Experimentación en las condiciones del proceso para determinar los valores óptimos de las variables	Evolución del proceso (EVOP)	Cap. 47
5. Determinación de los valores óptimos de un grupo de variables que afectan a la respuesta de una variable	Metodología de la superficie de respuesta	Cap. 47
Predicción de funcionamiento sin fallos (fiabilidad)	Predicción y análisis de la fiabilidad	Cap. 48

- Por estas y otras razones, mucha más información se puede obtener por un cuidadoso diseño de experimentos que por un exhaustivo análisis de datos históricos recogidos en circunstancias no controladas. Lo mejor que se puede normalmente esperar del análisis de un

conjunto de datos históricos es una indicación de las variables más importantes que se deben incluir en el diseño de experimentos.

Como un ejemplo de uno de los fallos descritos arriba, supongamos que un conjunto de datos históricos consiste en un resultado Y en cada uno de los cinco pares de puntos (x_1, x_2) dados en la Tabla 44.2. Aparentemente, parece que tenemos un amplio recorrido de los valores de x_1 (concentración de ácido), desde 80 a 110, y también un buen recorrido de los valores de x_2 (presión), de 105 a 144. Sin embargo, una representación de los datos por los puntos (x_1, x_2) , como la mostrada en la Figura 44.1, muestra que los cinco puntos están en línea recta. No hay posibilidad de que ningún análisis de estos datos nos diga cuándo un efecto es debido a x_1 o a x_2 . Los puntos no recubren todo el espacio de puntos (x_1, x_2) con x_1 entre 80 y 110 y x_2 entre 105 y 144. También, para resolver el problema de producción, puede ser conveniente explorar fuera de este espacio histórico de operación, lo que no es posible con el conjunto de datos históricos.

Un problema como el mostrado en la Figura 44.1 se llama *multicolinealidad* del conjunto de datos, es decir, del conjunto de datos $(x_1, \dots, x_k)$ que tenemos disponibles para el análisis. Con $k = 2$, este problema es fácil de detectar por un gráfico como el de la Figura 44.1, y este gráfico debe hacerse. Con $k = 3$ se puede detectar esta situación utilizando paquetes informáticos. Sin embargo, lo normal es que k sea mucho mayor de 2 o 3, y entonces se necesita análisis estadístico para detectar multicolinealidad. Casi multicolinealidad (es decir, cuando los puntos están casi en una recta cuando $k = 2$, o en un plano cuando $k = 3$, o en lo que se llama un hiperplano $k - 1$ dimensional cuando k es mayor que 3) es un gran problema por ser muy difícil su detección. Para una bibliografía extensiva y comentarios en programas informáticos para este problema, véanse Hoerl y Kennard (1981). Para resultados más recientes, véanse Huh y Olkin (1995), donde se incluyen ilustraciones numéricas utilizando los datos clásicos de Longley (1967).

Datos para experimentos planificados. *Datos para experimentos planificados* son datos recogidos para intentar estudiar un problema que ha aparecido o con el que estamos conviviendo. Estos datos son recogidos en varias posiciones $(x_1, \dots, x_k)$ de las variables que se considera afectan bastante al problema, mientras que se mantienen constantes (si ello es posible, y en cualquier caso registrando sus valores) todas las demás variables $(x_{k+1}, \dots, x_m)$ que pueden tener un posible efecto en el resultado; por ejemplo, si la presión atmosférica no puede ser controlada en muchas circunstancias, debe ser medida y registrada en cada experimento si se piensa de antemano que puede tener un efecto en el resultado. (Si es irrelevante, puede ser despreciada más tarde; si es relevante pero no ha sido registrada, no será posible detectar su influencia). Detalles de los diseños que se usan, es decir, cómo elegir los valores de $(x_1, \dots, x_k)$ para los experimentos una vez que las variables que se van a variar han sido elegidas, son considerados en el Capítulo 47, «Diseño y análisis de experimentos», y en Dudewicz y Karian (1985).

TABLA 44.2 Conjunto de datos históricos

Número del dato	x_1 (Concentración de ácido)	x_2 (Presión)
1	100	131,0
2	90	118,0
3	105	137,5
4	110	144,0
5	80	105,0

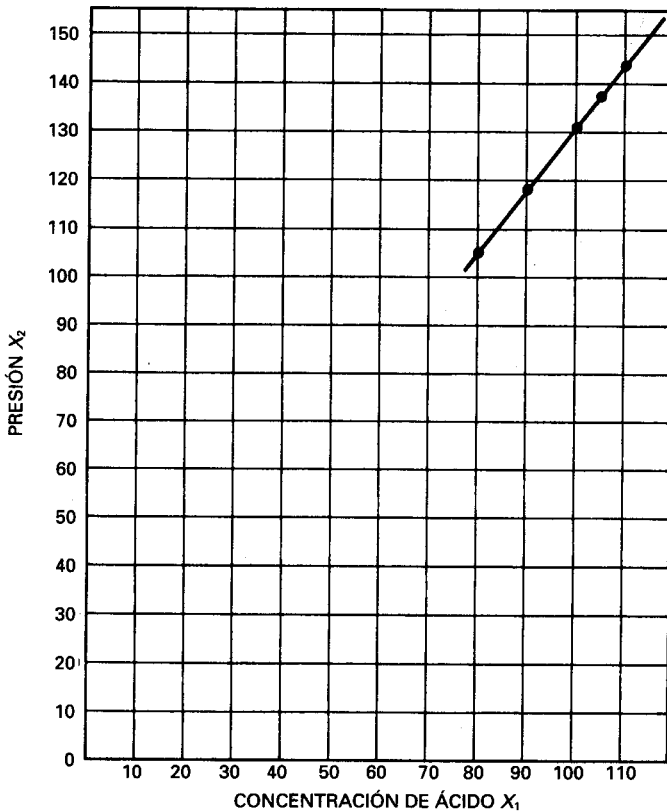


FIGURA 44.1 Representación de los puntos (x_1, x_2) de un conjunto de datos históricos. Se han dibujado cinco puntos, que se han unido por una línea recta.

Filtrado de datos. Una vez que los datos especificados en la lista precedente para la colección y análisis de datos, etapa 2, han sido recogidos (etapa 3), la primera etapa en este análisis (etapa 4a) es filtrar los datos. Discutiremos la necesidad para esta crítica (y con frecuencia omitida) etapa, exponiendo algunos métodos comunes de filtrado y un método muy utilizado que tiene algunos graves peligros.

La necesidad del filtrado de datos. Un conjunto de datos que no contiene datos transcritos incorrectamente, que no contiene resultados de experimentos hechos incorrectamente, como consecuencia, por ejemplo, de un mal funcionamiento de un equipo, y cuando además el modelo básico no cambia de forma en la región de experimentación, se llama un conjunto *limpio* de datos. Este tipo de datos es el que espera obtener normalmente los investigadores que cuidan sus experimentos y el registro de los resultados y condiciones. Sin embargo, contrariamente a lo que esperan los investigadores, pocos estadísticos han visto conjuntos de datos limpios (incluso aunque lleven muchos años trabajando con datos procedentes de diversas áreas). Por tanto, todos los conjuntos de datos necesitan, como primera etapa de su análisis, que se examinen los valores que puedan causar interferencias no válidas para decidir si esos valores deben eliminarse del conjunto de datos. Los procedimientos para realizar este examen se llaman *métodos de filtrado de datos*. Entre los más potentes de estos métodos están los basados en el análisis de regresión (estudiados más adelante en este capítulo).

Hay también una cantidad de métodos que pueden y deben ser usados antes de realizar análisis de regresión, con el objetivo de detectar los «anómalos, o *outliers*», es decir, observaciones (o grupos de observaciones) que se desvían considerablemente de los otros datos disponibles. Numerosos tests están disponibles para detectar anómalos [véase en Sheesley (1977) algunos de ellos]. Una regla simple llama a una observación anómala si dista 2,5, 3 o 4 desviaciones típicas de la media (Draper y Smith 1981). Esto se discute posteriormente.

Métodos de filtrado de datos. Uno de los métodos más comunes de filtrado de datos es clasificar las observaciones como extrañas si están fuera de un intervalo de radio L veces la desviación típica y centrado en la media. (La desviación típica se discute más adelante en Características de la muestra). Normalmente, el número L se toma igual a 2,5, 3 o 4. Cuanto mayor es L , menos probable será detectar los anómalos; mientras que cuanto más pequeño sea L , aumenta la probabilidad de considerar datos buenos como anómalos. Por ejemplo, de la Tabla B del Apéndice II se deduce que si $L = 3$, entonces $(100) (0,0027) = 0,27$ por ciento de las observaciones distarán más de tres desviaciones típicas de la media, incluso aunque no haya datos anómalos; esto asume que los datos se distribuyen normalmente. Por tanto, si se usa $L = 3$, se puede esperar encontrar alrededor de tres posibles anómalos en un conjunto de 1.000 datos (ya que el 0,27 por ciento de 1.000 es 2,7, es decir, aproximadamente 3). Si el conjunto de datos que se considera es más grande, se identificarán más anómalos, incluso si no hay problemas con los datos (lo que es muy poco probable). Por esta razón:

- Los anómalos deben ser eliminados del análisis sólo si pueden ser atribuidos a causas específicas (tales como errores en el registro de datos, errores experimentales, y casos similares).
- Típicamente, se toma L en función del tamaño del conjunto de datos que se filtra; con $n = 1.000$ puntos, $L = 3$ es razonable; con $n = 100$, se puede utilizar $L = 2,5$, y solamente $(100) (0,0124) = 1,24$ anómalos se puede esperar encontrar si los datos no tienen problemas.

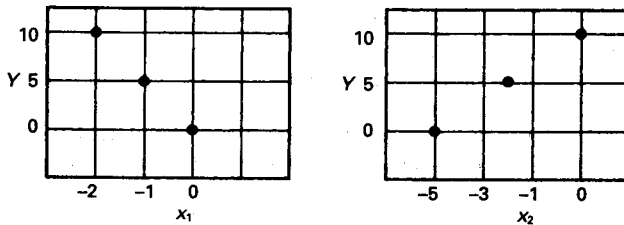
Después de que los datos anómalos han sido suprimidos o reemplazados (lo que es deseable si el experimento puede ser repetido en condiciones similares a las indicadas en el plan de experimentos), los datos deben ser filtrados de nuevo: con los peores puntos eliminados o corregidos, menos casos extremos pueden ser identificados como posibles datos anómalos. Otro método bastante usado, el de los gráficos de dispersión, se discute a continuación.

Diagramas de dispersión y sus peligros. En los *diagramas de dispersión* se dibuja cada par de variables de un conjunto de datos en un conjunto de ejes. En el ejemplo de la Tabla 44.2 se representarían los pares de variables Y y x_1 , Y y x_2 , y finalmente, x_1 y x_2 en tres diagramas de dispersión. El último de estos gráficos es el de la Figura 44.1 (y muestra algunos problemas con los datos que ya hemos discutido). Cuando se utiliza esta técnica, se deben utilizar todas las variables que han sido medidas (y no sólo las variables de mayor interés; véase Nelson 1979, Capítulo 4).

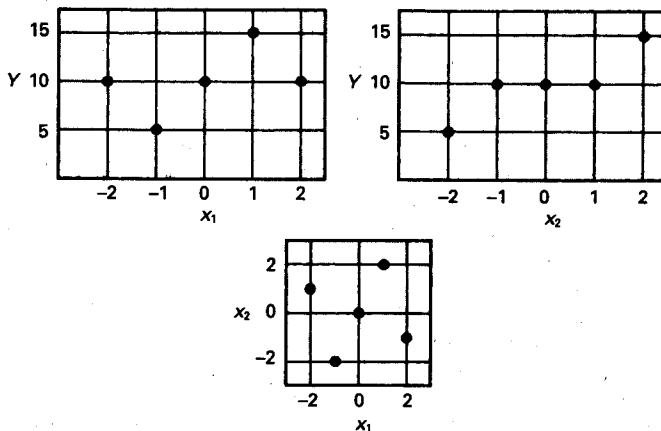
Estos gráficos se deben utilizar con mucha precaución. Mientras que los puntos que parecen extraños (es decir, lejos de la mayoría de los demás puntos) deben ser sometidos a examen para ver si hay problemas con ellos, no se deben usar estos gráficos para concluir relaciones del resultado Y con x_1 y/o x_2 . Por ejemplo, supongamos que se tiene el conjunto de datos de la Tabla 44.3. Entonces, por el diagrama de dispersión de Y respecto a x_1 y de Y respecto a x_2 (véase la Figura 44.2), se estaría tentado de concluir que Y es una función decreciente de x_1 y una función creciente de x_2 (y por tanto, para maximizar el resultado Y parece que se debería situar x_1 en el nivel más bajo posible y x_2 lo más alto posible). Sin embargo, como fácilmente puede comprobarse, los datos en la Tabla 44.3 verifican exactamente la relación (modelo) $Y = 10 + x_1 + 2x_2$. Así, Y es una función creciente de x_1 (y no una función decreciente como el diagrama de dispersión había sugerido). Daniel (1977) sugirió que el conjunto de datos de la Tabla 44.4 puede darnos más luz ahora. Los diagramas de dispersión de este conjunto de datos están dados en la Figura 44.3. Entonces se ve que incluso con una fuerte

TABLA 44.3 Conjunto de datos A para un diagrama de dispersión. Ejemplo

Número del dato	x_1	x_2	Y
1	-2	1	10
2	-1	-2	5
3	0	-5	0

**FIGURA 44.2** Diagrama de dispersión de Y respecto a x_1 y de Y respecto a x_2 del conjunto A de datos de la Tabla 44.3.**TABLA 44.4** Conjunto de datos B para un diagrama de dispersión. Ejemplo

Número del dato	x_1	x_2	Y
1	-2	1	10
2	-1	-2	5
3	0	0	10
4	1	2	15
5	2	-1	10

**FIGURA 44.3** Diagramas de dispersión para el conjunto B de datos de la Tabla 44.4.

relación (aquí se utiliza de nuevo $Y = 10 + x_1 + 2x_2$), el diagrama de dispersión puede que no suministre ninguna idea de esta relación. Incluso peor, seleccionando algunos de los puntos (x_1, x_2), se puede obtener que el diagrama de Y respecto a x_1 tenga cualquier pendiente (negativa, con la Tabla 44.3 y la Figura 44.2; cero; o positiva), o la relación puede ser descrita por una curva suave en cualquier dirección o con cierto grado de complejidad. (Los métodos de regresión dados más tarde en este capítulo no son engañados por las relaciones entre datos de la Tabla 44.4. Dan relaciones ciertas). Los diagramas de dispersión son útiles en la detección de datos anómalos; sin embargo, no son sustitutos de la regresión y pueden ser fácilmente mal empleados.

Estadística descriptiva para resumir datos. Muchos de los métodos prácticos de resumir datos son conceptualmente muy sencillos. Dependiendo de los objetivos del resumen de datos, muchas veces un método proporciona un resumen completo y útil. Más frecuentemente, dos o más métodos se utilizarán para obtener la claridad en la descripción que se desea. Algunos métodos clave son gráficos de los datos en función del tiempo, distribuciones de frecuencias e histogramas, estadísticos de las muestras (media, mediana, moda, varianza, desviación típica y percentiles), medidas de tendencia central y medidas de dispersión.

Gráficos de los datos en función del tiempo. Después de que los datos se han obtenido, es muy útil en diferentes situaciones la representación de los valores de Y respecto al orden temporal en el que los experimentos han sido hechos (lo que esencialmente es un diagrama de dispersión de Y respecto al tiempo t). Entre los posibles fenómenos para los que puede ser útil un gráfico de este tipo, están:

- Cuando al comienzo de la investigación aparecen unas pocas observaciones alejadas de las otras; con frecuencia representa la curva de aprendizaje de los experimentadores respecto a la situación experimental, y estos experimentos deben ser repetidos si es posible.
- Cuando hay tendencias cada día (o cada semana, etc.); lo que puede representar el fenómeno de calentamiento de una máquina o proceso, fatiga del operario, o similares tendencias relacionadas con el tiempo.
- La variabilidad decrece (o crece) con el tiempo; puede ser debido al proceso de aprendizaje o a variación en las características de las materias primas (como cuando un lote de material está gastado y el próximo lote de material tiene menos o más heterogeneidad).

Si bien las tendencias precedentes pueden manifestarse evidentes en un gráfico de las observaciones originales respecto al tiempo, se manifiestan de forma más clara en los residuos de las observaciones (diferencia entre los valores observados y los predichos) después de un análisis de regresión. Véase más adelante en este capítulo en Análisis de regresión.

Histograma de frecuencias. El *histograma de frecuencias* (o de distribución de frecuencias) es una herramienta estadística de representar muchos datos en una forma que manifiesta claramente la tendencia central y la dispersión a lo largo de la escala de medida, así como la frecuencia relativa con que se presentan los diferentes valores.

La Tabla 44.5 muestra los «datos» de las medidas de la resistencia eléctrica de 100 bobinas. Con un examen de estos 100 números se tiene dificultad en entender su significado.

La Tabla 44.6 muestra los mismos datos tras la tabulación. Nótese cómo el análisis de las barras en la columna «Tabulación» hace más evidente cuál es la tendencia central y la dispersión. La columna «Frecuencia» es un recuento de estas barras. La columna «Frecuencias acumuladas» muestra el número de cables con resistencia igual o mayor que el valor considerado.

La Tabla 44.6 muestra 17 valores desde 3,44 hasta 3,27, separados 0,01 ohmio cada uno del siguiente. Cuando se desea reducir el número de estos valores, se les agrupa en «intervalos». La Tabla 44.7 muestra los mismos datos agrupados en una distribución de frecuencias

TABLA 44.5 Resistencia (ohmios) de 100 bobinas

3,37	3,34	3,38	3,32	3,33	3,28	3,34	3,31	3,33	3,34
3,29	3,36	3,30	3,31	3,33	3,34	3,34	3,36	3,39	3,34
3,35	3,36	3,30	3,32	3,33	3,35	3,35	3,34	3,32	3,38
3,32	3,37	3,34	3,38	3,36	3,37	3,36	3,31	3,33	3,30
3,35	3,33	3,38	3,37	3,44	3,32	3,36	3,32	3,29	3,35
3,38	3,39	3,34	3,32	3,30	3,39	3,36	3,40	3,32	3,33
3,29	3,41	3,27	3,36	3,41	3,37	3,36	3,37	3,33	3,36
3,31	3,33	3,35	3,34	3,35	3,34	3,31	3,36	3,37	3,35
3,40	3,35	3,37	3,32	3,35	3,36	3,38	3,35	3,31	3,34
3,35	3,36	3,39	3,31	3,31	3,30	3,35	3,33	3,35	3,31

TABLA 44.6 Diagrama de tallos y hojas de las resistencias de 100 bobinas

Resistencia, ohmios	Tabulación	Frecuencia	Frecuencia acumulada
3,45			
3,44		1	1
3,43			
3,42			
3,41		2	3
3,40		2	5
3,39		4	9
3,38		6	15
3,37		8	23
3,36		13	36
3,35		14	50
3,34		12	62
3,33		10	72
3,32		9	81
3,31		9	90
3,30		5	95
3,29		3	98
3,28		1	99
3,27		1	100
3,26			
Total		100	

TABLA 44.7 Distribución de frecuencias de valores de resistencia

Resistencia, ohmios		Frecuencias	Frecuencias acumuladas
Intervalos	Puntos medios		
3,415-3,445	3,43	1	1
3,385-3,415	3,40	8	9
3,355-3,385	3,37	27	36
3,325-3,355	3,34	36	72
3,295-3,325	3,31	23	95
3,265-3,295	3,28	5	100
		100	

de sólo seis intervalos, cada uno de amplitud 0,03 ohmios. La agrupación de los datos en intervalos simplifica la presentación y el estudio de la distribución, pero se pierde algún detalle (sin embargo, se puede retroceder a los datos originales si es necesario).

Los pasos para construir una distribución de frecuencias son:

1. Decidir el número de intervalos. La Tabla 44.8 da la orientación adecuada para la mayoría de los casos habituales. Esta orientación no es rígida y debe ser ajustada si es necesario; su finalidad es, además de proporcionar un claro resumen de los datos, mostrar las anomalías subyacentes en los datos.
2. Calcular la amplitud del intervalo, que es igual a la diferencia entre el mayor y el menor valor observados y el número de intervalos. Conviene redondear este resultado a un número conveniente.
3. Construir los intervalos dando los extremos de los intervalos. Para ayudar a posteriores cálculos, conviene que:
 - a. Los extremos de los intervalos deben tener un decimal más que los datos y deben terminar en 5.
 - b. La amplitud del intervalo debe ser constante en toda la distribución de frecuencias.
4. Situar cada observación en el intervalo apropiado y contar la frecuencia f en cada intervalo.

Hay varias formas de mostrar las frecuencias de una distribución en forma gráfica. La más utilizada es el histograma de frecuencias. La Figura 44.4 muestra la resistencia eléctrica de los datos de la Tabla 44.7 representada en forma de histograma. Este diagrama es tan fácil de construir e interpretar que es muy utilizado en el análisis elemental de datos.

Un ejemplo de utilización muy extendido y efectivo de los histogramas es en el estudio de la capacidad de un proceso, comparando la distribución de valores entre los que varía el proceso con los límites de tolerancia, también llamados especificaciones. El histograma de la Figura 44.5 muestra un proceso que es intrínsecamente capaz de funcionar entre las tolerancias dibujadas en la misma figura. La gran proporción de producto defectuoso que está produciendo es consecuencia de que la media del proceso se ha desplazado del centro de intervalo definido por las tolerancias (véase el Capítulo 22, «Operaciones», para encontrar otros ejemplos).

Como regla general, la extracción de conclusiones para la población por el análisis del histograma de una muestra requiere que el tamaño de la muestra supere los 50 elementos.

Características de una muestra: media, mediana, moda, varianza, desviación típica, percentiles. Cuando se tiene un conjunto grande de datos, los *estadísticos descriptivos* proporcionan un método simple de extraer información de lo que a primera vista parece ser una masa de datos sin ningún sentido. Los estadísticos hacen referencia a un «valor típico (o central)» (media, mediana, moda), o a una medida de cuanta variabilidad está presente (varianza,

TABLA 44.8 Número de intervalos en una distribución de frecuencias

Número de observaciones	Número de intervalos recomendados
20-50	6
51-100	7
101-200	8
201-500	9
501-1.000	10
Más de 1.000	11-20

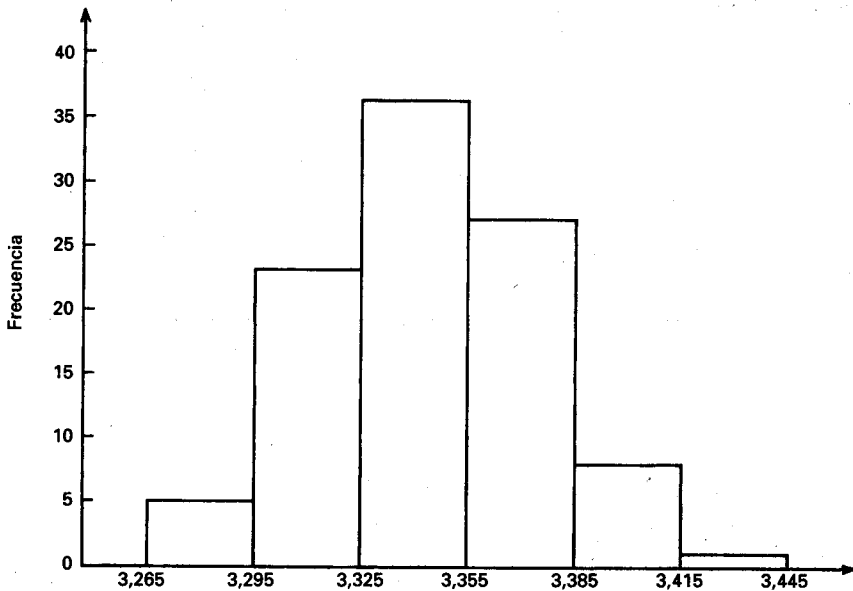


FIGURA 44.4 Histograma de resistencia.

desviación típica), o a una medida de frecuencia (percentiles). Los dos primeros tipos de estadísticos (valores típicos y variabilidad) serán discutidos más adelante, pues primero presentaremos el concepto de percentiles.

La *curva de percentiles* es un gráfico de los percentiles correspondientes a los valores de los datos. Por ejemplo, para los datos de resistencia de 100 cables dados en la Tabla 44.6, un 1 por ciento de los cables está en o por debajo de la resistencia 3,27; un 2 por ciento de los cables está en o por debajo de 3,28; un 5 por ciento está en o por debajo de 3,29, y así sucesivamente, como

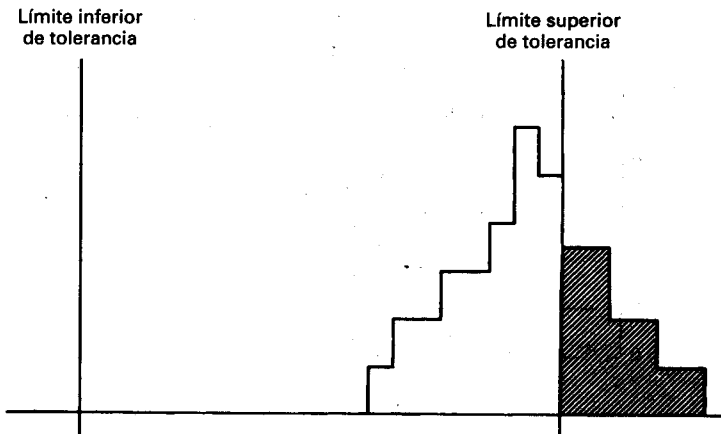


FIGURA 44.5 Histograma de un proceso.

TABLA 44.9 Percentiles de los valores de la resistencia de la Tabla 44.6

Resistencia (x)	3,27	3,28	3,29	3,30	3,31	3,32	3,33	3,34
Percentiles (y)	1	2	5	10	19	28	38	50
	3,35	3,36	3,37	3,38	3,39	3,40	3,41	3,42
	64	77	85	91	95	97	99	99
	3,43	3,44						
	99	100						

se da en la Tabla 44.9. El gráfico de los percentiles para estos datos aparece en la Figura 44.6. Nótese que la representación de los percentiles para los datos nos da una curva a saltos (pues la curva de los percentiles salta en cada dato y permanece constante entre los datos), la interpolación de una línea continua nos da una mejor representación de la realidad; la vemos en la curva punteada dibujada en la Figura 44.6. (Si bien los valores 3,42 y 3,43 no se dan en nuestro ejemplo, es de esperar que aparezcan en una muestra mayor; por tanto, la curva suave es la que utilizaríamos para evaluar su probabilidad de aparición). Nótese que ningún dato es desechado o agrupado al hacer la curva de percentiles de un conjunto de datos; en este sentido, tenemos ahora un proceso más preciso que en la construcción de un histograma de datos (pues no hay información «perdida» en el proceso). En muchos trabajos de estadística se utiliza la curva de percentiles, con frecuencia bajo el nombre de *función de distribución* de datos. (En artículos no muy recientes se le llamaba función de distribución *acumulada*). Como la distribución da la probabilidad de los datos de ser iguales o inferiores a un determinado valor, se tiene que su grá-

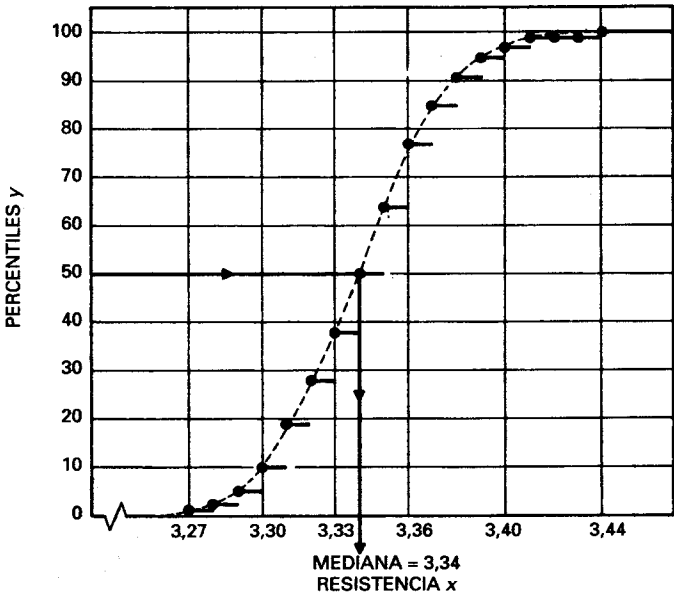


FIGURA 44.6 Curva de percentiles de un conjunto de datos.

fica es idéntica a la de la curva de percentiles, con la única diferencia de un cambio de escala en el eje vertical, que ahora va de 0 a 1 (pues al dividir por 100 la escala de 0 a 100 de la curva de percentiles se obtiene un rango de variación de 0 a 1).

Medidas de tendencia/posición central. Muchas distribuciones de frecuencias muestran una *tendencia central*, es decir, una forma tal que la mayoría de las observaciones se amontonan en una zona entre los valores extremos. La tendencia central es uno de los conceptos fundamentales en el análisis estadístico.

Hay tres medidas principales de tendencia central: media aritmética, mediana y moda. La *media aritmética* (ordinariamente «media») se utiliza en distribuciones simétricas o casi simétricas que no tienen un pico claramente dominante. La media aritmética $\bar{X}$ es la medida más generalmente usada en los trabajos referentes a la calidad. Se emplea frecuentemente para indicar el tamaño medio, la producción media, el tanto por ciento medio de defectos, etc. De manera que los gráficos de control han sido diseñados para analizarla y observar su evolución. Los gráficos de control nos dan inmediatamente indicaciones de los cambios significativos de la media (véase el Capítulo 45, «Control estadístico del proceso»).

La *media* se calcula sumando las observaciones y dividiendo por el número de observaciones. Un método abreviado para calcular la media se da en el ejemplo siguiente en el apartado Medidas de dispersión.

La *mediana* (el valor medio cuando los datos se ordenan de mayor a menor) se utiliza para reducir los efectos de valores extremos o para datos que pueden ser ordenados pero que no son económicamente medibles (matices de color, apariencia visual, olores), o para ciertos tests en situaciones especiales. Por ejemplo, si la vida media de cinco piezas se utiliza para decidir cuando los requerimientos de un test de duración son satisfechos, entonces los tiempos de vida de tres piezas sirven para predecir la media de las cinco piezas, y de esta forma la decisión del test puede obtenerse mucho más pronto. Los tiempos de vida de las tres piezas dan la mediana de los tiempos de vida de las cinco piezas. Según muestra la Figura 44.6, la mediana es el valor de la escala horizontal para el que la curva de percentiles alcanza el 50 por ciento.

La *moda* (el valor que se presenta con más frecuencia en los datos, se utiliza para distribuciones muy asimétricas, en la descripción de situaciones en las que se encuentran dos picos de frecuencia, o para eliminar los efectos de valores extremos. La «eficiencia» estadística de estas medidas varía. Para más detalles, pueden verse Dixon y Massey (1969, Capítulo 9) o Dudewicz (1976, pp. 221-222).

Medidas de dispersión. Los datos están siempre distribuidos alrededor de la zona de tendencia central, y la extensión de esta distribución se llama *dispersión* o *variación*. La evaluación de dispersión es la segunda de las dos medidas fundamentales del análisis estadístico.

Hay varias medidas de dispersión. La más sencilla es el *recorrido*, que es la diferencia entre los valores máximo y mínimo de los datos. Como el recorrido está basado sólo en dos valores, es útil cuando el número de observaciones es pequeño (alrededor de 10 o menor).

La medida más importante de dispersión es la *desviación típica*. La definición de la desviación típica de una muestra (también llamada desviación típica muestral) es

$$s = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

donde s = desviación típica muestral
 Σ = «suma de»
 X = valores observados
 $\bar{X}$ = media aritmética
 n = número de observaciones

Los cálculos se efectúan con más comodidad con la fórmula equivalente:

$$s = \sqrt{\frac{n\Sigma(X^2) - (\Sigma X)^2}{n(n-1)}}$$

El cuadrado de la desviación típica se llama *varianza*. Hay una media llamada *covarianza*, que nos da información de las relaciones entre pares de observaciones de las características X e Y en n individuos o elementos. Está definida por

$$s_{XY} = \frac{\Sigma[(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})]}{n - 1}$$

Más discusiones de las relaciones entre dos o más variables se dan más tarde en el apartado de Análisis de regresión y de correlación.

Cuando los datos se presentan en forma de una distribución de frecuencias, pueden hacerse ciertas simplificaciones para encontrar la media y la desviación típica. Esto aparece ilustrado en la Tabla 44.10. Para empezar, el valor 3,37 se fija como un origen arbitrario. Se coloca un cero en esta línea en la columna d' . Los otros datos en esta columna indican cuántos intervalos está la línea correspondiente por encima o por debajo del cero arbitrario. Se asignan signos negativos cuando el valor de la fila es menor que el elegido como cero. Los valores fd' de la columna (4) se obtienen por la multiplicación de los valores de las columnas (2) y (3). Análogamente, $f(d')^2$ se obtiene multiplicando los valores de las columnas (3) y (4). Obsérvese que los totales en las dos últimas columnas se identifican con las expresiones $\Sigma fd'$ y $\Sigma f(d')^2$, respectivamente, e i es la amplitud de los intervalos. Dado que las multiplicaciones son ahora muy sencillas, todos los cálculos pueden hacerse muy rápidamente.

$$\bar{X} = A + \left(\frac{\Sigma fd'}{n} \right) i = 3,37 + \left(\frac{-87}{100} \right) 0,03 = 3,344$$

$$s = i \sqrt{\frac{n\Sigma f(d')^2 - (\Sigma fd')^2}{n(n-1)}}$$

$$s = 0,03 \sqrt{\frac{100(185) - (-87)^2}{100(99)}} = 0,031$$

TABLA 44.10 Cálculo de la media y de la desviación típica

Punto medio (1)	Frecuencia f (2)	d' (3)	fd' (4)	$f(d')^2$ (5)
3,43	1	+2	2	4
3,40	8	+1	8	8
3,37	27	0	0	0
3,34	36	-1	-36	36
3,31	23	-2	-46	92
3,28	5	-3	-15	45
	$\Sigma = 100$		$\Sigma = -87$	$\Sigma = 185$

Para tamaños de muestras de alrededor de 10 o menos observaciones, la desviación típica se puede calcular aproximadamente a partir del recorrido mediante la expresión R/d_2 , donde d_2 es el factor del Apéndice II, Tabla A. Por ejemplo, supongamos que la primera columna de valores de la Tabla 44.5 representa una muestra de 10 elementos. El recorrido es $3,40 - 3,29 = 0,11$. Por la Tabla A del Apéndice II se tiene que $d_2 = 3,078$. La estimación de la desviación típica es, pues, $0,11/3,078 = 0,036$. Este cálculo es mucho más simple que el directo de la desviación típica. Algunas otras consideraciones en las siguientes secciones ilustrarán esta característica del recorrido. Dixon y Massey (1969, pp. 136-140) suministran procedimientos y tablas para diversas aplicaciones del recorrido.

Una medida final que da una idea de la dispersión relativa es el *coeficiente de variación*. Se define como la desviación típica dividida por la media, y como ya se ha indicado, es una medida relativa de la dispersión. Es útil para comparar varios conjuntos de datos similares que difieren en la media pero tienen una dispersión *relativa* parecida.

La obtención de estadísticos considerada en los párrafos precedentes se puede hacer con un ordenador, como se expone más adelante. (Consultar también el Capítulo 10 para obtener información general de programas informáticos para control de calidad).

Diagramas de tallos y hojas, diagramas de barras y gráficos estadísticos. La observación de los datos para encontrar tendencias, anomalías y otras características es muy importante. De hecho, se dice con frecuencia que «la primera regla en estadística es: mira a los datos». Por tanto, no se deben introducir los datos en un programa informático sin examinarlos minuciosamente. Antes se les debe examinar visualmente, calcular sus estadísticos clásicos importantes, comprobar si satisfacen los tests que garanticen el cumplimiento de ciertas condiciones y hacer las representaciones gráficas de algunas características de los datos. Hay diferentes métodos y aproximaciones para esta etapa inicial de análisis, defendidos por diferentes escuelas de estadísticos, que les atribuyen prioridades diferentes, todos son utilizados, y en conjunto tienen un uso generalizado y una relevante utilidad. Algunos de estos métodos ampliamente valorados (además de otros que veremos pronto con detalle) son los diagramas de tallos y hojas y los diagramas de barras, que se pueden ver en los textos introductorios de estadística. Estos métodos son parte de lo que se llama *estadística gráfica*, y hay muchos programas informáticos que los ejecutan. Sin embargo, para obtener su potencial (y no quedarse en una utilización mediocre o inapropiada), estos métodos deben utilizarse de forma cuidadosa e inteligente (como vimos antes con los diagramas de dispersión, por ejemplo). A este respecto, una excelente referencia con muchos ejemplos (dando incluso gráficos no apropiados para ciertos datos y contrastándolos con la información que refleja un buen gráfico) es la obra de Schmid (1983).

Exactitud en el cálculo en estadística descriptiva. Incluso el cálculo exacto de estadísticos de simples no es una tarea sencilla, como puede verse inicialmente en el ejemplo considerado en el párrafo de codificación de datos. En particular:

- El cálculo manual es propenso al error, particularmente si hay 10 o más datos.
- El desarrollo de programas informáticos para realizar los cálculos exige conocimientos de estadística, análisis numérico y programación; por tanto, no es posible hacerlos uno mismo.
- Mucho software utilizado en los ordenadores (especialmente en los microordenadores) no es de alta calidad.

En vista de las consideraciones precedentes, se recomienda siempre la utilización de programas informáticos estadísticos de alta calidad. En particular, sugiero la utilización del programa SAS, BMDP, STATPRO y LABONE. Son de excelente calidad, y entre todos ellos son capaces de adaptarse a una amplia variedad de ordenadores (incluyendo las unidades centrales IBM y Data General, APPLE y microordenadores IBM PC, y una gran variedad de microordenadores).

Otros programas informáticos de buena valoración y muy difundidos son MINITAB y SPSS. Hay muchos otros programas informáticos diseñados para áreas particulares estadísticas (como para diseño de experimentos). Es conveniente saber que la calidad varía mucho de unos a otros; SAS es considerado por muchos como el «programa de oro» entre los considerados.

Detalles de SAS se pueden ver en SAS Institute, Inc. (1982). Para BMDP, véase Dixon (1983). Para STATPRO, consultar Pinsky (1983). Para LABONE, véanse Levy y Dumoulin (1984). En cada caso, una llamada telefónica nos dará información actualizada respecto a los programas adaptables a ordenadores concretos, así como de las licencias de utilización.

El Capítulo 10, «Aplicaciones de los ordenadores a los sistemas de calidad», nos da información adicional de los programas estadísticos. Los paquetes gráficos disponibles con estos programas informáticos (tales como el SAS/GRAPH con el SAS) son de excelente calidad, lo que justifica su costo de utilización por la dirección. La American Society for Quality (Sociedad Americana para la Calidad) publica anualmente un «directorio de software para garantizar la calidad y para el control de calidad» (véase, por ejemplo, ASQC 1996).

Codificación de datos. Supongamos que tenemos las cinco observaciones, $X_1, \dots, X_5$, de la Tabla 44.11, de las que deseamos calcular la media y la desviación típica. Entonces, en una calculadora de bolsillo (como la Texas TI-55) o en un ordenador central, encontramos:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^5 X_i &= 49.345 & \sum_{i=1}^5 X_i^2 &= 4,8698581 \times 10^8 \\ \bar{X} &= 9.869 & s^2 &= 0,985 & s &= 0,992 \end{aligned}$$

El único problema con estas respuestas es que son *erróneas*. Por ejemplo, 9.869 es menos que todas las observaciones; por lo tanto, no puede ser la media. Además la desviación típica es una medida de la dispersión de los datos; la diferencia del mayor al menor es 0,00008; por lo tanto 0,992 es demasiado grande. El problema que nos lleva a esta inexactitud es que los ordenadores han trabajado con ocho decimales exactos, desechando decimales necesarios para un cálculo exacto. Si puede ser tan penoso calcular con exactitud la media y la desviación típica de cinco números, se deduce que la exactitud requiere la utilización cuidadosa de análisis numérico en problemas de mayor número de datos, como se verá más adelante, y por esta razón no se puede confiar en la utilización de un software sin un minucioso análisis de sus posibilidades. Los cuatro programas sugeridos son de gran calidad.

Si se tiene que utilizar software de calidad no garantizada, se recomienda la *codificación* de los datos; esto significa utilizar en los cálculos $Y_1, \dots, Y_5$, con $Y_i = a(X_i + b)$ para ciertos a y b . Por ejemplo, si elegimos $a=10^5$ y $b = -9.869$, obtendremos $Y_1=13$, $Y_2=7$, $Y_3=15$, $Y_4=8$ e $Y_5=9$. Para estos valores (calculamos en los mismos ordenadores):

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^5 Y_i &= 52 & \sum_{i=1}^5 Y_i^2 &= 588 & \bar{Y} &= 10,4 & s_Y^2 &= 11,8 & s_Y &= 3,4351 \end{aligned}$$

que son exactos. Ahora se puede probar que la relación entre $\bar{X}$, s_X^2 e $\bar{Y}$, s_Y^2 es

TABLA 44.11. Cinco datos

$X_1 = 9.869,00013$
$X_2 = 9.869,00007$
$X_3 = 9.869,00015$
$X_4 = 9.869,00008$
$X_5 = 9.869,00009$

$$\bar{X} = \frac{1}{a} \bar{Y} - b \quad s_x^2 = \frac{1}{a^2} s_y^2$$

Por lo tanto, encontramos (exactamente de nuevo):

$$\begin{aligned}\bar{X} &= 10,4 \times 10^{-5} + 9.869 = 9.869,000104 \\ S_x^2 &= 11,8 \times 10^{-10} \text{ (por tanto, } s_x = 0,000034)\end{aligned}$$

Este método de *codificación de datos* mantiene la exactitud en diversas situaciones, incluso en complejos cálculos estadísticos (como la regresión), y es hecho automáticamente por muchos de los programas informáticos de alta calidad. Por tanto, debe ser utilizado cuando se utiliza un programa informático diferente de los de gran calidad, citados anteriormente. Adicionalmente, muchos de los resultados absurdos resultantes de la utilización de software de insuficiente exactitud pueden ser detectados inmediatamente si se practica la regla de oro de la estadística, consistente en «Mirar los datos» (es demasiado frecuente reunir datos y analizarlos en un ordenador sin examinarlos atentamente siguiendo las medidas recomendadas en este capítulo, lo que ha llevado a problemas muy costosos a muchas empresas).

Los mejores valores de a y de b para una codificación son $a = 1/s_x$ y $b = -\bar{X}$. Si estos valores no se pueden calcular de forma fiable por el software, debe utilizarse en su lugar la estimación considerada en el próximo párrafo.

Estimación sencilla del centro y la dispersión. Con frecuencia se necesitan estimaciones simples del centro y de la dispersión de un conjunto de datos (por ejemplo, para su uso en codificación, como se discutió antes, y también para un análisis rápido de datos bajo la presión del tiempo). Dos estimaciones simples del centro son la mediana ($\tilde{X}$) y el centro del recorrido, expresados por

$$\frac{\text{Máximo } (X) + \text{Mínimo } (X)}{2}$$

Una estimación sencilla de la dispersión es

$$\frac{\text{Máximo } (X) - \text{Mínimo } (X)}{2}$$

Para los datos de la Tabla 44.11, el verdadero valor es $\bar{X} = 9.860,000104$. Los dos métodos sencillos proporcionan 9.869,00009 y 9.869,000110, respectivamente. De forma análoga, el verdadero valor de la desviación típica es $s_x = 0,000034$, y la estimación simple proporciona 0,000020. (Si se utiliza la Tabla A del Apéndice II y se toma el recorrido dividido por d_2 en vez del recorrido dividido por 4, se obtiene una estimación mejor. Con cinco datos, $d_2 = 2,326$, por lo que nuestra estimación de s_x es entonces $0,000080/2,326 = 0,000034$).

MODELOS DE PROBABILIDAD PARA EXPERIMENTACIÓN

Se establece una diferencia entre una muestra y una población (o *universo*). Una *muestra* es un número limitado de medidas tomadas entre muchas medidas. Una *población* es las muchas medidas de las que la muestra es tomada. (Obsérvese que la población puede existir físicamente, como todos los conjuntos estéreo de un cierto lote. También puede ser sólo un concepto, como todos los experimentos que pueden hacerse).

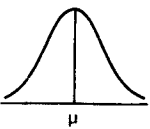
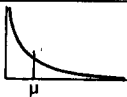
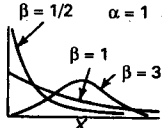
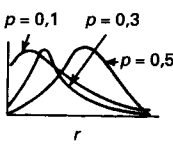
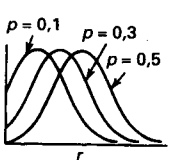
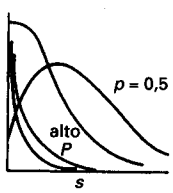
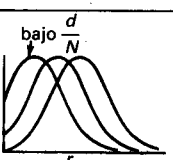
DISTRIBUCIÓN	FORMA	FUNCIÓN DE PROBABILIDAD	COMENTARIOS SOBRE APLICACIÓN
NORMAL		$y = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(X-\mu)^2}{2\sigma^2}}$ μ = Media σ = Desviación típica	Aplicable cuando las observaciones se concentran alrededor de la media y es igualmente probable que las observaciones ocurran por encima o por debajo de la media. La variación en las observaciones es normalmente el resultado de muchas causas pequeñas.
EXPONENCIAL		$y = \frac{1}{\mu} e^{-\frac{x}{\mu}}$	Aplicable cuando es más probable que ocurran más observaciones por debajo de la media que por encima.
WEIBULL		$y = \alpha \beta (X - \gamma)^{\beta-1} e^{-\alpha(X-\gamma)^\beta}$ α = Parámetro de escala β = Parámetro de forma γ = Parámetro de localización	Aplicable en la descripción de muchos tipos de variación, incluyendo las distancias de la normal y la exponencial.
POISSON*		$y = \frac{(np)^r e^{-np}}{r!}$ n = Número de pruebas r = Número de veces que ocurre un suceso p = Probabilidad de que ocurra el suceso en una prueba	Igual que la binomial, pero es particularmente aplicable cuando hay muchas pruebas con poca probabilidad (menos de 0,10) de que ocurra cierto suceso (éxito u ocurrencia) en cada prueba.
BINOMIAL*		$y = \frac{n!}{r!(n-r)!} p^r q^{n-r}$ n = Número de pruebas r = Número de veces que ocurre un suceso p = Probabilidad de que ocurra el suceso en una prueba $q = 1 - p$	Aplicable al definir la probabilidad de que ocurra r veces un suceso en n pruebas, sabiendo que el suceso tiene una probabilidad p de ocurrir en cada prueba.
BINOMIAL NEGATIVA*		$y = \frac{(r+s-1)!}{(r-1)!(s!) } p^r q^s$ r = Número de veces que ocurre un suceso s = Diferencia entre el número de ensayos y el número de veces que ocurre un suceso p = Probabilidad de que ocurra el suceso en una prueba $q = 1 - p$	Aplicable al definir la probabilidad de que ocurra r veces un suceso en la realización de $r + s$ pruebas, sabiendo que la probabilidad de que ocurra el suceso en cada ensayo es p (Obsérvese que el número total de ensayos es $r + s$)
HIPERGEOMÉTRICA*		$y = \frac{\binom{d}{r} \binom{N-d}{n-r}}{\binom{N}{n}}$	Aplicable al calcular la probabilidad de que al extraer al azar, y sin reposición, n individuos de una población de N individuos, r tengan una determinada propiedad, que la tienen d individuos en la población

FIGURA 44.7 Resumen de las distribuciones de probabilidad univariantes. (Con los asteriscos se señalan a las distribuciones discretas, si bien se las ha representado por curvas continuas para facilitar la comparación con las distribuciones continuas).

Una *distribución de probabilidad* es una fórmula matemática que relaciona los valores de una característica con su probabilidad de ocurrir en una población. La Figura 44.7 resume algunas distribuciones. Cuando la característica que tiene que medirse puede tomar cualquier valor (salvo la restricción de la precisión del aparato de medida), su distribución de probabilidad se llama una *distribución continua* de probabilidad. Por ejemplo, la distribución de probabilidad de los datos de resistencia de la Tabla 44.7 es un ejemplo de una distribución continua de probabilidad, dado que la resistencia puede tomar cualquier valor, con la única restricción de la precisión del equipo de medida. La experiencia confirma que la mayoría de las características continuas siguen una de las distribuciones de probabilidad usuales, como la distribución *normal*, la distribución *exponencial* y la distribución de *Weibull*, o bien puede ajustarse con una distribución empírica, como se discute más tarde en este capítulo. Estas distribuciones nos dan las probabilidades asociadas con los distintos valores de la característica considerada. Otras distribuciones (por ejemplo, la *t*, *F* y la *chi cuadrado*) son importantes en el análisis de datos, pero no proporcionan probabilidades de los distintos valores de la característica o variable considerada.

Cuando la característica que se mide sólo puede tomar ciertos valores (por ejemplo, los enteros 0, 1, 2, 3, etc.), su distribución de probabilidad se llama una distribución de probabilidad *discreta*. Por ejemplo, la distribución del número r de piezas defectuosas en una muestra de cinco piezas sólo puede tomar los valores $r = 0$, $r = 1$, $r = 2$, $r = 3$, $r = 4$ y $r = 5$. Las distribuciones discretas más utilizadas son la de Poisson, la binomial, la binomial negativa y la hipergeométrica (véase la Figura 44.7).

Los párrafos siguientes explican cómo se pueden utilizar las distribuciones de probabilidad con una muestra de observaciones para hacer predicciones de lo que sucede en las poblaciones.

El espacio muestral. La estadística trabaja con los *resultados de los experimentos*. Cuando se realiza un experimento se obtienen resultados; denotemos un resultado por el símbolo e . Ese resultado se llama un *suceso simple*. El conjunto de esos resultados posibles de un experimento se llama el *espacio muestral* o *espacio de sucesos simples* del experimento.

Si consideramos el experimento de lanzar tres monedas y anotar para cada moneda si cae mostrando la cara (H) o la cruz (T), el espacio de sucesos contendrá ocho resultados posibles:

HHH HHT HTH THH HTT THT TTH TTT

que, para simplificar la notación, los denominaremos como $e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7$ y e_8 .

Asociamos un número a cada uno de estos sucesos simples, que se llama *probabilidad*. Este número representa la proporción de veces en que cada suceso simple ocurriría al realizar una gran cantidad de experimentos de este tipo. Por ejemplo, la probabilidad de HHH en nuestro experimento de lanzar tres monedas se suele tomar igual a $1/8 = 0,125$, ya que ocurre aproximadamente en la octava parte de las veces en que se lanzan de tres monedas al aire, siempre que sea elevado el número de repeticiones del lanzamiento. La probabilidad de un suceso simple se representa por $P(e)$; usualmente tenemos que $P(HHH) = 1/8$.

Dado que en cada experimento se obtiene un resultado, se tiene que 1 es la suma de la proporción de veces que ocurre cada suceso e del espacio muestral. Dado que las probabilidades representan a lo que tienden esas proporciones cuando aumenta el número de experimentos, también se tiene que *la suma de las probabilidades de todos los sucesos simples posibles es 1*. En nuestro ejemplo de las tres monedas,

$$P(e_1) + P(e_2) + P(e_3) + P(e_4) + P(e_5) + P(e_6) + P(e_7) + P(e_8) = 1$$

Sucesos. Con frecuencia estamos interesados en el estudio no de un suceso simple, sino en una combinación de ellos, que se le llama *suceso compuesto*. Por ejemplo, el suceso «más caras que cruces» ocurre si y sólo si se da uno de los sucesos simples e_1, e_2, e_3, e_4 (es decir, los sucesos simples HHH, HHT, HTH, THH) en nuestro ejemplo del lanzamiento de las tres monedas. La frecuencia con la que encontramos «más caras que cruces» es la suma de las fre-

cuencias de e_1, e_2, e_3 y e_4 . Por tanto, la probabilidad del suceso «más caras que cruces» es la suma de las probabilidades de los sucesos elementales que lo componen:

$$P(\text{más caras que cruces}) = P(e_1) + P(e_2) + P(e_3) + P(e_4)$$

Para escribir esta expresión de forma más sencilla se suele denotar el suceso que nos interesa por un símbolo. Si, por ejemplo, A representa al suceso «más caras que cruces», entonces

$$P(A) = P(e_1) + P(e_2) + P(e_3) + P(e_4)$$

Por tanto, la probabilidad de un suceso compuesto es la suma de las probabilidades de todos los sucesos simples que lo componen. (Obsérvese que estos sucesos deben ser mutuamente excluyentes). Dado que en el ejemplo de las tres monedas tenemos $P(e_1) = P(e_2) = P(e_3) = \dots = P(e_8) = 1/8$, deducimos que

$$P(A) = 1/8 + 1/8 + 1/8 + 1/8 = 1/2$$

es decir, esperamos obtener más caras que cruces (cuando las tres monedas son lanzadas) en alrededor del 50 por ciento de los lanzamientos.

En el ejemplo con las tres monedas se tiene la igualdad de los sucesos simples, es decir, $P(e_i) = P(e_j)$ para todos los posibles valores de i y j . Cuando esta hipótesis es cierta, se deduce que para cada suceso compuesto A se tiene que

$$P(A) = \frac{\text{número de sucesos simples en } A}{\text{número de elementos del espacio de sucesos}}$$

En el caso de las tres monedas, esta fórmula nos proporciona la misma respuesta obtenida antes, es decir, $P(A) = 4/8 = 1/2$.

Decimos que dos sucesos compuestos A_1 y A_2 son incompatibles o mutuamente excluyentes si ningún suceso elemental e_i está en A_1 y A_2 . Por ejemplo, si A_1 es el suceso «dos caras» y A_2 es el suceso «más cruces que caras», entonces A_1 y A_2 son incompatibles, ya que $A_1 = \{e_2, e_3, e_4\}$ y $A_2 = \{e_5, e_6, e_7, e_8\}$ no tienen ningún suceso elemental en común. Con frecuencia se expresa de forma abreviada la incompatibilidad de los sucesos A_1 y A_2 escribiendo

$$A_1 A_2 = \Phi$$

o también $A_1 \cup A_2 = \Phi$, que se lee «suceso A_1 o A_2 » (que ocurre si y sólo si al menos uno de los sucesos A_1 o A_2 ocurre).

Si A_1 y A_2 son incompatibles, se tiene

$$P(A_1 \text{ o } A_2) = P(A_1) + P(A_2)$$

Esta ecuación se debe a que $P(A_1 \text{ o } A_2)$ es el número de sucesos elementales e_i que hay en A_1 o A_2 dividido por el número total de sucesos elementales; como no hay sucesos elementales comunes en A_1 y A_2 , el resultado obtenido coincide con la suma del número de sucesos elementales de A_1 más el número de sucesos elementales de A_2 y la posterior división de esta suma por el número total de sucesos elementales. En nuestro ejemplo, $P(A_1 \text{ o } A_2) = P(A_1) + P(A_2) = 3/8 + 4/8 = 7/8$.

En nuestro ejemplo, hemos considerado hasta ahora los sucesos

A : «más caras que cruces»

A_1 : «2 cruces»

A_2 : «más cruces que caras»

Estos sucesos aparecen en el espacio de sucesos de la Figura 44.8. Ahora A y A_1 no son mutuamente excluyentes (incompatibles), por lo que la regla adición de probabilidades no es correcta para esos dos sucesos, ya que en $P(A) + P(A_1) = 4/8 + 3/8 = 7/8$ se cuentan dos veces las probabilidades de los sucesos elementales e_2, e_3 y e_4 . Vemos, pues, que una expresión correc-

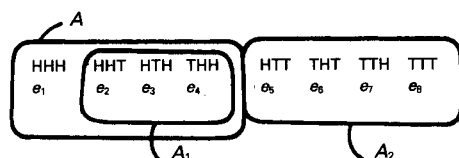


FIGURA 44.8 Sucesos y espacio de sucesos del experimento de lanzar tres monedas al aire.

ta para $P(A \text{ o } A_1)$ precisa la sustracción de la parte común de A y A_1 , contada dos veces, es decir, hemos de restar la probabilidad de que en el resultado del lanzamiento ocurran los dos sucesos A y A_1 , que es obtener $P(A \text{ y } A_1) = 3/8$ en nuestro ejemplo. Hemos deducido que para dos sucesos cualesquiera A y A_1 , la regla de adición de probabilidades es

$$P(A \text{ o } A_1) = P(A) + P(A_1) - P(A \text{ y } A_1)$$

Para sucesos incompatibles, $P(A_1 \text{ y } A_2)$ es 0, lo que reduce la fórmula precedente en este caso a la simple adición de las probabilidades.

Reglas de la probabilidad; combinatoria. La teoría de la probabilidad está en la base de todas las decisiones que se basan en el muestreo. Como hemos visto, la probabilidad se expresa por un número entre 1,0 (certeza de que un suceso ocurrirá) y 0,0 (imposibilidad de que un suceso ocurra), y la definición más intuitiva de probabilidad está basada en una interpretación en términos de frecuencias. En el caso simple de que un suceso A pueda ocurrir en s casos de un total de n casos posibles, que sean todos igualmente probables, se tiene que la probabilidad de que el suceso ocurra es

$$P(A) = \frac{s}{n} = \frac{\text{número de casos en que sucede } A}{\text{número de casos posibles}}$$

El recuento de s y n puede ser complejo; entonces la obtención de la probabilidad exige la utilización de la *combinatoria*.

Ejemplo: Un lote consta de 100 piezas. Se extrae *al azar* una pieza, lo que significa que cada una de las 100 piezas tiene la misma probabilidad de ser seleccionada. Si el lote contiene un total de 8 piezas defectuosas, la probabilidad de que la pieza extraída sea defectuosa es $8/100 = 0,08$.

Los siguientes teoremas son útiles en la resolución de problemas de probabilidad:

Teorema 1: Si $P(A)$ es la probabilidad de que el suceso A ocurra, entonces la probabilidad de que no ocurra el suceso A es $1 - P(A)$.

Teorema 2: Si A y B son dos sucesos, entonces la probabilidad de que obtengamos el suceso A o el suceso B en una realización del experimento es

$$P(A \text{ o } B) = P(A) + P(B) - P(A \text{ y } B)$$

Si los sucesos A y B no pueden ocurrir simultáneamente (es decir, si A y B son incompatibles o «mutuamente excluyentes»), entonces la probabilidad de que ocurra A o B es

$$P(A \text{ o } B) = P(A) + P(B)$$

Ejemplo: Si de un lote que tiene el 5 por ciento de piezas defectuosas se extrae una muestra de 6 piezas, la probabilidad de que haya r piezas defectuosas en la muestra se obtiene con la distribución binomial de probabilidad que veremos más adelante. Esa distribución nos dice que la probabilidad de 0 piezas defectuosas en la muestra es 0,7351 y que

la probabilidad de una pieza defectuosa en la muestra es 0,2321. Por tanto, la probabilidad de que la muestra contenga 0 o 1 pieza defectuosa es $0,7351 + 0,2321 = 0,9672$.

Teorema 3: Si A y B son dos sucesos, la probabilidad de que ocurran simultáneamente ambos sucesos es

$$P(A \text{ y } B) = P(A) \times P(B|A)$$

donde $P(B|A)$ = probabilidad de que B ocurra suponiendo que el suceso A haya ocurrido.

Un caso particular de este teorema se presenta cuando los sucesos A y B son *independientes*; es decir, cuando el que ocurra o no uno de los sucesos no influye en la probabilidad de que ocurra el otro suceso. Si A y B son independientes, la probabilidad de que ocurran A y B es

$$P(A \text{ y } B) = P(A) \times P(B)$$

Ejemplo: Un sistema complejo consiste de dos grandes subsistemas independientes. Las probabilidades de funcionamiento correcto para cada uno de los subsistemas son 0,95 para el primero y 0,90 para el segundo. El funcionamiento correcto del sistema complejo exige que los dos subsistemas funcionen correctamente. La probabilidad de funcionamiento correcto del sistema es, pues, $0,95 \times 0,90 = 0,855$.

Los teoremas precedentes se han enunciado para dos sucesos, pero se extienden de forma natural a cualquier número de sucesos.

Probabilidad condicional; teorema de Bayes. En *probabilidad condicional* buscamos respuesta a preguntas del tipo «Si conozco que el suceso A_2 ha ocurrido, entonces en los ensayos en que A_2 ha ocurrido, ¿con qué frecuencia aparece el suceso A_1 ?». El símbolo que se utiliza para esta probabilidad condicional es

$$P(A_1 | A_2)$$

que se lee «la probabilidad de A_1 suponiendo se sabe que A_2 ha sucedido», y se calcula por la fórmula

$$P(A_1 | A_2) = \frac{P(A_1 \text{ y } A_2)}{P(A_2)}$$

Si $P(A_1 | A_2) > P(A_1)$, decimos que A_2 da «información positiva respecto a A_1 ».

Si $P(A_1 | A_2) < P(A_1)$, se dice que A_2 da «información negativa respecto a A_1 ».

Si $P(A_1 | A_2) = P(A_1)$, decimos que A_2 no da información respecto a A_1 o que A_1 y A_2 son dos sucesos «independientes». En este caso la información de que haya o no haya ocurrido el suceso A_2 no altera la probabilidad de que ocurra A_1 .

La potente *fórmula inversa de probabilidad condicional*, es decir,

$$P(A_1 | A_2) P(A_2) = P(A_1 \text{ y } A_2) = P(A_2 \text{ y } A_1) = P(A_2 | A_1) P(A_1)$$

es la base del teorema de Bayes, que en su enunciado más sencillo establece que

$$P(A_2 | A_1) = \frac{P(A_1 | A_2) P(A_2)}{P(A_1 | A_2) P(A_2) + P(A_1 | \text{no } A_2) P(\text{no } A_2)}$$

donde «no A_2 » es el suceso «que no ocurra A_2 ». Para problemas resueltos de probabilidad, véase Dudewicz (1993).

Las técnicas presentadas en este capítulo con el título Test de hipótesis consisten en analizar una muestra de observaciones para alcanzar la conclusión (con un riesgo dependiente de la muestra) de aceptar o rechazar la hipótesis. Quien realiza el experimento debe evaluar las consecuencias de extraer conclusiones incorrectas, y aunque tal vez en menor grado, la probabilidad de que pueden presentarse los valores extremos de los parámetros de la población. Sin embargo, esta evaluación se suele hacer cualitativamente, apoyándose en el buen juicio del experimentador. Pero en la práctica, el tamaño de la muestra es fijado por consideraciones de tipo económico, y el experimentador define el error de tipo I (normalmente 0,05 o 0,01) en términos numéricos y entonces debe aceptar el error de tipo II que se obtiene al fijar el tamaño de la muestra por las restricciones económicas. Existe una forma metódica de definir las consecuencias de los errores de tipo I y de tipo II, así como la probabilidad de obtener valores extremos de los parámetros, que presupone la utilización del teorema de Bayes y de la teoría estadística de decisión.

Teoría estadística de la decisión. Esta teoría requiere dos informaciones que normalmente no se utilizan en el análisis clásico:

1. Las consecuencias económicas de cometer errores de tipo I o de tipo II.
2. Las probabilidades de los diferentes valores de los parámetros de la población (la teoría clásica no hace ninguna hipótesis relativa a los diferentes valores que puedan tomar los parámetros de la población).

Las tablas estadísticas y los planes de muestreo basados en el teorema de Bayes o en los conceptos de la teoría de la decisión no son usuales, pero dado que estos conceptos tienen un efecto muy significativo, parece inminente el desarrollo de valiosos trabajos basados en estos conceptos. Oliver y Springer (1972) dieron un ejemplo de tablas bayesianas de aceptación de muestras. Hadley (1967) proporcionó material de estudio incluyendo ejemplos de tests de hipótesis, intervalos de confianza y planes de aceptación de muestras. Lenz y Rendtel (1984) compararon los planes de muestreo bayesianos con los proporcionados por las MIL-STD-105D y Skip Lot. Véase también la discusión en el Capítulo 46, bajo Procedimientos bayesianos.

La paradoja de Simpson. Lo que se llama la *paradoja de Simpson* fue descubierta en 1951 por E. H. Simpson. Desde entonces se ha comprobado que tiene importantes aplicaciones en industria, medicina y muchos otros campos; una discusión de la paradoja se encuentra en Dudewicz y Mishra (1988, pp. 55-57) y se dan ejemplos en Wardrop (1955) y sus referencias. Daremos un ejemplo para ilustrar el problema y discutir cómo evitarlo.

Supongamos que una compañía tiene dos factorías en diferentes lugares. Ambas fabrican un producto de alta tecnología cuyo proceso productivo no es aún dominado (por lo que es necesario mucho retrabajo y se obtiene mucha chatarra). Un nuevo proceso modificado se introduce en ambas factorías, que se ejecuta en alguna de las líneas dedicadas antes al proceso antiguo, que se sigue realizando en las restantes líneas. Los resultados del ensayo se resumen a la dirección indicando que con el nuevo método se ha obtenido un 46 por ciento de productos correctos (sobre 11.000 unidades fabricadas), en tanto que con el método antiguo sólo un 11 por ciento de productos resultaron correctos (sobre 10.100 unidades fabricadas). La pregunta consiste en decidir si se tiene suficiente información, y caso de ser así, cuál es la decisión que se debe adoptar para seleccionar el proceso de fabricación que pueda resultar más idóneo en el futuro.

Es obvio que a primera vista se está tentado de decidir por el nuevo proceso, pues su proporción de productos correctos es cuatro veces mayor que en el proceso antiguo, sobre un número considerable de productos. Sin embargo, supongamos que preguntamos por más información que la dada en el resumen para la alta dirección de la empresa. Supongamos que nos interesamos por los resultados en ambas factorías. De hecho, puede ocurrir que el nuevo método sea significativamente superior en *ambas* factorías, como se ilustra en la Tabla 44.12, donde vemos que el nuevo método hace decrecer la proporción de productos correctos del 10 al 5 por ciento en la planta 1 y del 95 al 50 por ciento en la planta 2. Por tanto, el método

TABLA 44.12 Paradoja de Simpson con dos métodos y dos localizaciones

		Factoría 1	Factoría 2
Proceso usual	Correctos	1.000	95
	Defectuosos	9.000	5
Nuevo proceso	Correctos	50	5.000
	Defectuosos	950	5.000

antiguo es significativamente mejor en ambas factorías (en la Factoría 1, que trabaja en condiciones peores, por lo que tiene una menor proporción de productos correctos, y en la Factoría 2, que por tener una proporción mayor de productos correctos se le encargó la producción de 10.000 de los productos fabricados con el nuevo proceso).

Esto es paradójico, dado que el proceso antiguo funciona mejor en ambas factorías, en tanto que da resultados peores si se suman los resultados de las dos factorías. De hecho, mucha gente piensa que esto es imposible antes de estudiar un ejemplo numérico como el que hemos proporcionado. Para evitar decisiones erróneas (como la selección del proceso peor), hay unas acciones que pueden tomarse. En primer lugar, el número de ensayos que deberán hacerse en diferentes instalaciones debe ser el mismo. (Esto no es siempre posible, dada la diferente capacidad o restricciones que pueden tener las distintas instalaciones). En segundo lugar, cuando se evalúan resultados que provienen de varios (dos o más) lugares, máquinas, técnicos, regiones geográficas, etc., se debe insistir en que mejor que el resumen global del tanto por ciento de éxito del método es preferible tener el tanto por ciento de éxito del método por lugar, máquina, técnico, región geográfica, etc. Esto nos permitirá evitar los errores debidos a la paradoja de Simpson (y, adicionalmente, nos permitirá detectar diferencias en proporción de producto correcto en diferentes localizaciones, máquinas, técnicos, regiones geográficas, etc.).

DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD DISCRETAS

Las distribuciones de probabilidad discretas se utilizan para modelizar situaciones en que el resultado de interés sólo puede tomar unos pocos valores (tales como 0 o 1 para fallo o éxito, o 0, 1, 2, 3... para el número de veces que ocurre un determinado suceso de interés). A continuación se dan los modelos de las distribuciones discretas de probabilidad más usuales, se indica cómo obtener los valores numéricos de sus probabilidades y su uso en control de calidad.

La distribución uniforme discreta. Si la probabilidad de obtener cada uno de los valores $x_1, \dots, x_n$ en un experimento es la misma, se dice que el resultado del experimento tiene la distribución uniforme de probabilidad en el conjunto de valores $x_1, \dots, x_n$. En este caso la probabilidad de x_i es $1/n$. Puesto que la probabilidad es tan sencilla, no se necesitan tablas especiales.

Modelo que proporciona una distribución uniforme. El modelo que nos proporciona una distribución uniforme es la elección al azar de un elemento de una población finita en la que cada uno de los valores ocurre el mismo número de veces. (Esto hace que cada uno de los valores tenga la misma probabilidad de salir en la muestra).

Utilización de los números aleatorios. Los números aleatorios se utilizan frecuentemente en los muestreos de inspección. Supongamos, por ejemplo, que un lote tiene 1.000 artículos numerados desde el 500 hasta el 1.499. Entonces la probabilidad de que un artículo seleccionado al azar tenga el número i (para un valor de i entre 500 y 1.499) es $1/1.000 = 0,001$. La

probabilidad de que el artículo seleccionado al azar tenga un número de serie mayor o igual a 1.400 es $100/1.000 = 0,10$.

La distribución binomial. Si se hacen n repeticiones independientes de un experimento y en cada uno de ellos la probabilidad de que ocurra un suceso es p , entonces la probabilidad de que el suceso ocurra r veces en los n experimentos es

$$\frac{n!}{r!(n-r)!} p^r q^{n-r}$$

donde $q = 1 - p$.

En la práctica, la hipótesis de que la probabilidad se mantenga constante en cada experimento se considera razonable cuando el tamaño de la población es como mínimo 10 veces el tamaño de la muestra (en estas circunstancias, el cambio en probabilidad de un experimento al siguiente debido a la disminución de la población es despreciable).

La Tabla F del Apéndice II proporciona tablas parciales de la distribución binomial y da referencias de tablas más completas. King (1971, Capítulos del 20 al 22) discute la distribución binomial de probabilidad.

Modelo que proporciona una distribución binomial. Cuando de un experimento se hacen n ensayos y en cada uno de ellos se tiene una probabilidad p de que ocurra cierto suceso de interés (usualmente denominado *éxito*), entonces el número de veces r que ocurre ese suceso sigue la distribución binomial de probabilidad. El nombre proviene del hecho de que el factor

$$\frac{n!}{r!(n-r)!}$$

que aparece en la expresión de la probabilidad de los diferentes valores de r se llama *coeficiente binomial* en matemáticas.

Utilización de las probabilidades binomiales. Un lote de 100 unidades de cierto producto es entregado por un proveedor que en el pasado ha entregado una media de un 5 por ciento de unidades defectuosas. Se selecciona al azar una muestra aleatoria de 6 unidades. La Tabla 44.13 da las probabilidades de los posibles resultados.

Al utilizar la fórmula debe recordarse que $0! = 1$. La Tabla F del Apéndice II nos da probabilidades binomiales acumuladas, es decir, la probabilidad de obtener r o menos de r veces el suceso estudiado en n pruebas. En el ejemplo precedente, la probabilidad de obtener 1 o 0 unidades defectuosas en n ensayos se puede leer en la tabla, obteniendo la probabilidad acumulada de 0,9672. Este resultado es la suma de las probabilidades correspondientes a los valores de $r = 0$ y $r = 1$, es decir, $0,7351 + 0,2321 = 0,9672$.

TABLA 44.13 Tabla de probabilidades binomiales

r	$P(\text{exactamente } r \text{ defectos en } 6) = [6!/r!(6-r)!](0,05)^r(0,95)^{6-r}$
0	0,7351
1	0,2321
2	0,0306
3	0,0021
4	0,0001
5	0,0000
6	0,0000

La distribución hipergeométrica. En ciertos casos, no son ni aproximadamente admisibles las hipótesis de la distribución de Poisson (véase más abajo) ni de la distribución binomial. Cuando la única hipótesis admisible es que la extracción de la muestra ha sido aleatoria, se tiene que la distribución hipergeométrica da exactamente la probabilidad de que suceda r veces el suceso estudiado al realizar n pruebas o extracciones de un lote de N artículos que contiene d defectuosos, mediante la expresión

$$\frac{\binom{d}{r} \binom{N-d}{n-r}}{\binom{N}{n}}$$

donde $\binom{N}{n}$ es el número de «combinaciones de orden n que se pueden formar con N elementos» y que es igual a $N!/[n!(N-n)!]$, donde $N! = [N(N-1)(N-2) \dots 1]$ y $0! = 1$. Se pueden evitar cálculos utilizando las tablas de Lieberman y Owen (1961). Duncan (1974) compara los resultados de las distribuciones de Poisson, binomial e hipergeométrica.

Modelo que proporciona una distribución hipergeométrica. La distribución hipergeométrica es apropiada cuando se realizan n pruebas independientes, pero la probabilidad de que ocurra el suceso estudiado varía de ensayo a ensayo por la disminución de la población finita. No obstante, cuando las hipótesis de las distribuciones binomial o de Poisson se verifican aproximadamente, se las utiliza en lugar de la distribución hipergeométrica, pues lo poco que se perderá en exactitud se va a ganar en sencillez.

Utilización de las probabilidades hipergeométricas. Un lote de 100 unidades de cierto producto es entregado por un proveedor que en el pasado ha entregado una media de un 5 por ciento de unidades defectuosas. Se selecciona al azar una muestra aleatoria de 20 unidades. Para calcular la probabilidad de que la muestra no contenga ninguna unidad defectuosa, se debe considerar que el lote tiene 5 unidades defectuosas y 95 correctas, por lo que

$$P(0 \text{ en } 20) = \frac{\binom{5}{0} \binom{95}{20}}{\binom{100}{20}} = \frac{\left[\frac{5!}{0!(5-0)!} \right] \left[\frac{95!}{20!(95-20)!} \right]}{\frac{100!}{20!(100-20)!}} = 0,319$$

Repetir distintas sustituciones en la fórmula para encontrar las probabilidades $P(r \text{ en } 20)$, donde r en este ejemplo sólo puede tomar los valores 0, 1, 2, 3, 4 y 5.

La distribución de Poisson. En la práctica, la distribución discreta más importante es la distribución de Poisson. Es una distribución que aproxima a otras distribuciones más exactas en la modelización de ciertos fenómenos, como la hipergeométrica y la binomial, y que se aplica cuando el tamaño de la muestra es como mínimo 16, el número de elementos de la población supera en diez veces al número de elementos de la muestra, y la probabilidad p de que ocurra el suceso estudiado en cada ensayo es menor que 0,1. (Estas condiciones son verificadas frecuentemente).

La Figura 44.7 representa la función de probabilidad de Poisson, si bien lo que se utiliza en los trabajos prácticos son las tablas de probabilidades acumuladas de la distribución de Poisson.

Modelo que proporciona una distribución de Poisson. De la misma manera que la distribución de Poisson es una buena aproximación de otras distribuciones que son exactas para ciertos modelos, también se tiene que la distribución de Poisson es la distribución exacta

cuando ciertas hipótesis se verifican. Estas hipótesis son que los sucesos ocurran aleatoriamente (en el tiempo, o en el espacio, o en una superficie, por ejemplo) con una probabilidad de que ocurra el suceso estudiado proporcional a la amplitud del intervalo de tiempo (o al volumen del espacio, o al área) y que no haya «solapamientos». [Para más detalles, véase Dudewicz (1976, Sección 3.2)]. Por ejemplo, si se sabe que un blanco de $0,1 \text{ m}^2$ está contenido en un área de 10 m^2 que se bombardea aleatoriamente (una bomba cada cierto intervalo de tiempo para evitar solapamientos), la probabilidad de un impacto será de $0,1/10 = 0,01$. El número de impactos en el blanco sigue la distribución de Poisson, lo que permite calcular el número de bombas que se deben lanzar para que la probabilidad de obtener ocho o más impactos en el blanco sea como mínimo de 0,95; este tipo de consideraciones es el que se hace en la práctica cuando se sabe que ocho o más impactos en el blanco lo destruyen completamente, y se desea tener un 95 por ciento de probabilidad de destruir el objetivo.

Utilización de las probabilidades de Poisson. Un lote de 300 unidades de un producto es suministrado por un proveedor cuyo historial nos indica que entrega una media de un 2 por ciento de unidades defectuosas. Se selecciona una muestra aleatoria de 40 unidades del lote. La Tabla E del Apéndice II nos da la probabilidad de obtener r o menos de r unidades defectuosas en una muestra de n unidades. (La aplicación de estas probabilidades se explica en el Capítulo 46, bajo Característica operativa, curva OC). Utilizando la Tabla 44.14, con un valor de np igual a $40(0,02) = 0,8$, se obtienen las probabilidades de sucesos individuales por sustracción de probabilidades acumuladas. La probabilidad de obtener exactamente dos unidades defectuosas es $0,953 - 0,809 = 0,144$.

La distribución binomial negativa. La distribución binomial negativa es una de las más utilizadas en la práctica cuando el tamaño de la muestra no se sabe a priori, pues es determinado por el propio experimento a medida que se va realizando.

Modelo que proporciona una distribución binomial negativa. Si la probabilidad de que ocurra un suceso deseado es constante en cada ensayo sucesivo y hacemos ensayos hasta que el suceso deseado haya aparecido m veces, entonces la probabilidad de que se necesiten r ensayos es

$$\frac{(r-1)!}{(m-1)!(r-m)!} p^m (1-p)^{r-m}$$

donde r puede ser $m, m+1, m+2, \dots$ Esta ecuación es equivalente a la más complicada dada en la Figura 44.7. Otras situaciones que nos llevan a una distribución binomial negativa se discuten en el Capítulo 5 de Johnson y Kotz (1969). Los cálculos onerosos se pueden evitar con las tablas dadas por Williamson y Bretherton (1963); Johnson y Kotz (1969) dan referencias de tablas adicionales.

TABLA 44.14 Tabla de probabilidades de Poisson

r	Probabilidades acumuladas (r o menos en la muestra)
0	0,449
1	0,809
2	0,953
3	0,991
4	0,999
5	1,000

Utilización de las probabilidades binomiales negativas. Un gran lote es inspeccionado hasta que se encuentra el primer artículo defectuoso ($m = 1$); si esto ocurre en las cinco primeras extracciones, se rechaza el lote. Por lo tanto, se acepta el lote si no se encuentra ningún artículo defectuoso en las primeras cinco extracciones (y no es necesario realizar las extracciones 6, 7..., ya que nunca se inspeccionarán más de cinco artículos con este plan de inspección). Si el lote tiene un 10 por ciento de artículos defectuosos, se deduce de la Tabla 44.15 que la probabilidad de que el lote sea aceptado es

$$1 - (0,10 + 0,09 + 0,081 + 0,0729 + 0,06561) = 0,59049$$

La distribución multinomial. Las distribuciones discretas de probabilidad consideradas hasta ahora (uniforme, binomial, hipergeométrica, Poisson y binomial negativa) se refieren a situaciones *univariantes*, lo que significa que los resultados hacen referencia a una sola variable (como el número de unidades defectuosas en una muestra de tamaño n en una distribución binomial). Sin embargo, hay casos muy importantes en los que el resultado de cada prueba es *multivariante*. Un ejemplo es el caso de una muestra de n piezas en las que se cuentan el número de piezas que necesitan retrabajo y el número de piezas que deben ir a la chatarra, que se llama una distribución *bivariante*. La distribución multinomial se utiliza cuando hay varias categorías en las que se clasifican los artículos de las muestras obtenidas aleatoriamente.

Modelo que proporciona una distribución multinomial. Si exactamente uno de los sucesos $E_1, \dots, E_k$ ocurre en cada una de las n repeticiones de cierto experimento y las probabilidades son, respectivamente, $p_1, \dots, p_k$ (con $p_1 + \dots + p_k = 1$, puesto que en cada una de las repeticiones debe obtenerse como resultado uno, y sólo uno, de los sucesos $E_1, \dots, E_k$), se tiene entonces que la probabilidad de que E_1 ocurra x_1 veces... y E_k ocurra x_k veces es

$$\frac{n!}{x_1!x_2! \dots x_k!} p_1^{x_1} p_2^{x_2} \dots p_k^{x_k}$$

Normalmente, es difícil disponer de tablas de la distribución multinomial, por lo que los cálculos se hacen directamente con la fórmula de la probabilidad, o (si n es grande) con la distribución normal multivariante (una distribución multivariante continua) utilizada como aproximación de la distribución multinomial.

Utilización de las probabilidades multinomiales. Supongamos que $n = 5$ grandes artículos se fabrican e inspeccionan cada día, siendo los resultados de la inspección correcta, necesita retrabajo o debe ir a la chatarra. Los resultados históricos muestran que un 80 por ciento es

TABLA 44.15 Tabla de probabilidades binomiales negativas ($m = 1, p = 0,10$)

r	Probabilidad de necesitar r pruebas para encontrar una defectuosa
1	0,10
2	0,09
3	0,081
4	0,0729
5	0,06561
6	0,059049
7	0,053144
8	0,047830

correcto, que un 15 por ciento necesita retrabajo y que un 5 por ciento debe ir a la chatarra. ¿Cuáles son las probabilidades de los resultados posibles tras un día de trabajo?

La Figura 44.9 muestra las probabilidades de los artículos fabricados, calculadas directamente por la fórmula básica. Obsérvese que en cuanto se conoce el número de piezas que necesitan retrabajo (por ejemplo 1) y el número de piezas que deben ir a la chatarra (por ejemplo 0), queda determinado el número de piezas correctas (por ejemplo $5 - 1 - 0 = 4$). Tenemos que utilizar la distribución de probabilidad multinomial, dado que las diferentes categorías no son independientes (una pieza no puede ser simultáneamente correcta y tener que ir a la chatarra).

Selección de una distribución discreta. La selección de la distribución de probabilidad que debe utilizarse se puede hacer por el conocimiento de la situación subyacente al problema estudiado, o bien ajustando una distribución de frecuencias relativas a un modelo. En cualquier caso, es aconsejable chequear con un test la validez del modelo elegido.

Selección de una distribución para un modelo real. En muchos casos conocemos (o asumimos) que el modelo que lleva a una de las distribuciones que hemos estudiado dirige una situación práctica. Por ejemplo, si se extraen 50 artículos de un gran lote que tiene un 100p por ciento de artículos defectuosos, se asume el modelo binomial con $n = 50$ y probabilidad p de obtener un artículo defectuoso en cada extracción.

$x_2 = \text{Número de artículos enviados a chatarra}$

5	0,0000003125					
4	0,000025	0,0000046875				
3	0,0008	0,0003	0,000028125			
2	0,0128	0,0072	0,00135	0,000084375		
1	0,1024	0,0768	0,0216	0,0027	0,0001265625	
0	0,32768	0,3072	0,1152	0,0216	0,002025	0,0000759375
	0	1	2	3	4	5
	$x_1 = \text{Número de artículos retrabajados}$					

FIGURA 44.9 Tabla de probabilidades multinomiales, $k = 3$ categorías; $n = 5$; $p_1 = P(\text{retrabajo}) = 0,15$; $p_2 = P(\text{chatarra}) = 0,05$; $p_3 = P(\text{pase}) = 0,80$.

TABLA 44.16 Manchas por artículo en el trabajo ya realizado

Número de manchas	Frecuencias
0	50
1	25
2	25

Test chi cuadrado de validez de un modelo. Para comprobar la validez de un supuesto modelo discreto, en el que el suceso i ocurre con una probabilidad p_i , se comparan las frecuencias observadas para cada suceso con las frecuencias predichas por el modelo utilizando el test chi cuadrado discutido más adelante (Test 12b). Sólo puede omitirse un test de confirmación si se desea correr el riesgo de asumir un modelo que puede tener muy poco parecido con la realidad [véase la Sección 9.12 de Dudewicz y Mishra (1988) y especialmente el Problema 9.12.2 de la p. 532].

Modelos empíricos obtenidos por frecuencias relativas. Si hay pocas razones que nos lleven a la adopción de uno de los modelos específicos discutidos anteriormente, se puede utilizar como modelo las frecuencias relativas de los datos históricos del pasado. Por ejemplo, si se observa el número de manchas de cada uno de los 100 artículos producidos en el pasado, se pueden obtener las frecuencias de la Tabla 44.16, con las que se puede estimar la probabilidad de obtener r manchas con la frecuencia relativa, como se indica en la Tabla 44.17. Este modelo se debe comprobar considerando la distribución de frecuencias en una nueva muestra y aplicando el test chi cuadrado como se indicó anteriormente. Véanse también los Métodos bootstrap (Métodos de muestreo y remuestreo), más adelante.

DISTRIBUCIONES CONTINUAS DE PROBABILIDAD

Las distribuciones de probabilidad continuas se utilizan para modelizar situaciones en que el resultado puede tomar cualquiera de los valores de un intervalo (como por ejemplo todos los valores mayores que cero en el caso que se mida el tiempo del primer fallo de un motor que funciona continuamente). Vamos a exponer los modelos que nos llevan a las distribuciones continuas más utilizadas y a considerar cómo se pueden obtener los valores de sus probabilidades y su utilización en control de calidad.

La distribución continua uniforme. Si todos los valores entre a y b ($a < b$) son posibles y la probabilidad de que un valor pertenezca a un subintervalo es proporcional a su longitud, entonces la distribución uniforme es la apropiada a esta situación. La función de probabilidad es plana en el intervalo (a, b) , con densidad de probabilidad $y = 1/(b - a)$. Por tanto, la probabilidad de que un valor esté en un intervalo de longitud c es $c/(b - a)$. Por ser estas probabilidades tan sencillas, no se necesitan tablas especiales.

TABLA 44.17 Probabilidades de manchas por estimación de frecuencias relativas

Número de manchas	Frecuencias
0	0,50
1	0,25
2	0,25

Modelo que proporciona una distribución uniforme. El modelo que proporciona una distribución uniforme continua en un intervalo (a,b) es la selección aleatoria de un valor entre a y b . Por ejemplo, si una válvula en una conducción de agua se puede abrir de manera que según el ángulo de giro la presión del agua que sale varía entre 0 atmósferas (válvula completamente cerrada) y 3 atmósferas (válvula completamente abierta), entonces la presión resultante al girar aleatoriamente la válvula será una variable aleatoria uniforme en el intervalo $(0, 100)$.

Utilización de números aleatorios. Las variables aleatorias uniformes en el intervalo $(0, 1)$ se llaman *números aleatorios*. Esas variables se utilizan con frecuencia en modelos de simulación en ordenadores y son muy importantes en los estudios de calidad de sistemas. Detalles completos sobre las fuentes de números aleatorios de alta calidad se encuentran en Dudewicz y Ralley (1981). Consideraciones especiales para utilización de simulación en ordenadores personales se dan en Dudewicz et al. (1985).

La distribución exponencial. La función de probabilidad exponencial es

$$y = \frac{1}{\mu} e^{-x/\mu}$$

La Figura 44.7 muestra la forma de la curva de distribución exponencial. Obsérvese que las distribuciones normal y exponencial tienen distintas formas. El examen de la tabla de áreas muestra que un 50 por ciento de una población normalmente distribuida está encima de la media y otro 50 por ciento está por debajo de la media. En una población exponencial, el 36,8 por ciento está encima de la media y el 63,2 por ciento se encuentra situado por debajo de la media. (Esto sirve para constatar que no es siempre cierta la idea intuitiva de que el 50 por ciento de una población está por debajo de la media). La propiedad de tener un mayor porcentaje por debajo de la media ayuda a indicarnos aplicaciones de la distribución exponencial. Por ejemplo, la distribución exponencial describe la distribución de cargas en los miembros de una estructura, ya que las cargas menores son mucho más numerosas que las cargas mayores. La distribución exponencial es también útil para describir los tiempos de fallo de cierto equipo complejo.

Modelo que proporciona una distribución exponencial. Se puede demostrar que aparece la distribución exponencial en los tiempos de fallo cuando los fallos ocurren de forma «aleatoria» (y no por el desgaste, sino que los fallos se producen como colisiones aleatorias). En efecto, la distribución exponencial se caracteriza como la única distribución continua con la «propiedad de falta de memoria» que hace que la probabilidad de que un determinado elemento tenga un tiempo t_0 de vida adicional depende sólo del valor t_0 y no del tiempo que ese elemento haya estado en uso [véase Dudewicz (1976), pp. 88, 106, para detalles].

Predicciones con distribuciones exponenciales. Las predicciones basadas en la distribución exponencial sólo necesitan la estimación de la vida media de la población. Por ejemplo, el tiempo entre fallos sucesivos de un equipo complejo es medido, y el histograma resultante se parece a la curva de probabilidad exponencial. Los resultados de las mediciones en una muestra indican que el *tiempo medio entre dos fallos (TMEF, abreviadamente)* es 100 horas. ¿Cuál es la probabilidad de que el tiempo medio entre dos fallos sea como mínimo de 20 horas?

El problema se reduce a encontrar el área debajo de la curva exponencial más allá de las 20 horas (Fig. 44.10). La Tabla C en el Apéndice II da el área debajo de la curva más allá de un cociente particular X/μ . En este problema,

$$\frac{X}{\mu} = \frac{20}{100} = 0,20$$

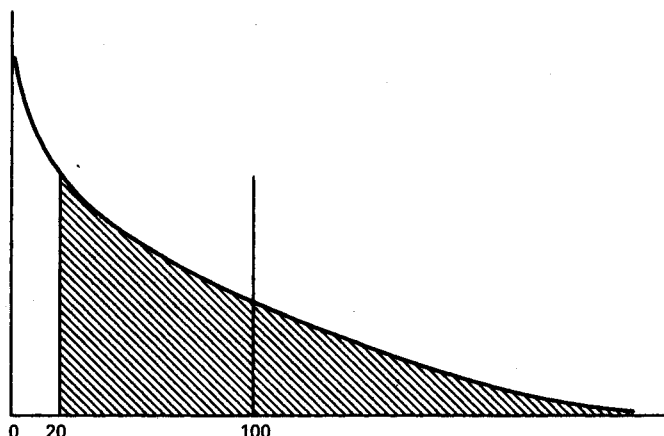


FIGURA 44.10 Distribución del tiempo entre fallos.

y con la Tabla C en el Apéndice II se obtiene que el área debajo de la curva más allá de las 20 horas es 0,8187; esto significa que hay alrededor de un 82 por ciento de probabilidad de que el equipo trabaje sin fallo continuamente durante 20 o más horas. Cálculos similares nos indicarían que hay una probabilidad de 0,9048 para 10 o más horas. En el Capítulo 48, «Conceptos de fiabilidad y análisis de datos», se calcula esta probabilidad para el tiempo en que debe estar funcionando un equipo, y el resultado se llama *fiabilidad*. Estos análisis se pueden hacer con el papel probabilístico exponencial.

Ejemplo: relaciones entre la fiabilidad de un sistema y sus partes. Se admite normalmente que la probabilidad de supervivencia de un sistema es el producto de las probabilidades de supervivencia de sus componentes: $P_s = P_1 P_2 \dots P_n$. Esto se conoce como la *regla del producto*. Esta fórmula asume (1) que el fallo de cualquier parte del sistema causará el fallo del sistema y (2) que las fiabilidades de sus partes son independientes unas de las otras, es decir, que la fiabilidad de una parte no depende de la fiabilidad de ninguna otra parte [Evans (1966) presenta una buena discusión de esta y otras hipótesis en los cálculos de fiabilidad]. Un conjunto de luces en serie en un árbol de Navidad prueba la regla del producto. Estas hipótesis no se suelen cumplir al 100 por ciento correctamente. Sin embargo, la fórmula es una aproximación que debe ser mejorada en cuanto tengamos información disponible sobre las interrelaciones entre las partes y su relación con el sistema. [Un ejemplo lo da la fórmula de redundancia (véase más adelante, en Ejemplo: redundancia)]. Ahora ilustraremos la regla del producto.

Supongamos que se tienen los siguientes requerimientos de fiabilidad en los subsistemas de un sistema de comunicación:

Subsistema	Fiabilidad (para un período de 4 horas), %
Receptor	0,970
Sistema de control	0,989
Fuente de energía	0,995
Antena	0,996

¿Cuál es la fiabilidad esperada del sistema conjunto si se verifican los requerimientos precedentes?

$$P_s = (0,970)(0,989)(0,995)(0,996) = 0,951$$

La probabilidad de que el sistema completo funcione sin fallo durante un período de 4 horas es del 95 por ciento.

Si se puede asumir que cada parte sigue una distribución exponencial, entonces

$$P_s = e^{-t_1 \lambda_1} e^{-t_2 \lambda_2} \dots e^{-t_n \lambda_n}$$

Además, si t es el mismo para cada pieza,

$$P_s = e^{-t \Sigma \lambda}$$

Por tanto, cuando la proporción de fallo es constante (y por tanto se puede aplicar la distribución exponencial), la «predicción de fiabilidad» de un sistema puede hacerse con la adición de las proporciones de fallos de las partes del sistema. Esto se ilustra en el Capítulo 19, bajo Diseños de fiabilidad, mantenimiento y disponibilidad.

Ejemplo: redundancia. Muchos diseños de sistemas han sido inventados para conseguir el incremento de la fiabilidad del sistema introduciendo redundancia. El más simple de tales sistemas es el *sistema paralelo*, que funciona si al menos uno de sus componentes funciona. Si cada componente tiene una fiabilidad $R(t_0)$, entonces el sistema paralelo consistente en m componentes tiene una fiabilidad igual a [véase Dudewicz (1976, p. 39)]:

$$1 - [1 - R(t_0)]^m$$

que es mayor que $R(t_0)$.

Muchos diseños han sido introducidos mirando a la fiabilidad y al costo, como los n sistemas de k salidas. Para detalles de estos y otros aspectos de fiabilidad, véanse Zacks (1983), Ireson (1982) y Lloyd y Lipow (1982).

La distribución de Weibull. La distribución de Weibull es una familia de distribuciones cuya función de densidad general es

$$y = \alpha \beta (X - \gamma)^{\beta-1} e^{-\alpha(X-\gamma)^\beta}$$

donde α = parámetro de escala; β = parámetro de forma, y γ = parámetro de localización.

La curva de la función de densidad (Fig. 44.7) varía mucho en función de los valores de los parámetros. El más importante es el parámetro de forma β , que da la forma de la curva. Obsérvese que cuando β es 1,0, la función de Weibull coincide con la función exponencial, y que cuando β vale alrededor de 3,5 ($\alpha = 1$ y $\gamma = 0$), la distribución de Weibull se aproxima a la distribución normal. En la práctica, β varía desde $1/3$ hasta 5. El parámetro de escala α está relacionado con el apuntamiento de la curva; es decir, si α varía, la curva se transforma de aplanada en puntiaguda.

El parámetro de localización es el mínimo valor posible de X . Frecuentemente se asume que puede ser 0, con la consiguiente simplificación de la ecuación. Normalmente no es necesario determinar los valores de esos parámetros, ya que las predicciones se hacen directamente con el papel probabilístico de Weibull. King (1971, pp. 136-140) da procedimientos para encontrar gráficamente, α , β y γ .

La distribución de Weibull cubre muchos tipos de distribuciones. Esto la hace popular en la práctica por simplificar el problema de examinar un conjunto de datos y decidir cuál de las distribuciones usuales (es decir, la normal o la exponencial) ajusta mejor. En particular, tanto los casos PFC (proporción de fallos creciente) como PFD (proporción de fallos decreciente)

son casos particulares de la distribución de Weibull, correspondientes a $\beta > 1$ y a $\beta < 1$ [véase Dudewick (1976, pp. 88-89)].

Modelo que proporciona una distribución de Weibull. Se puede demostrar que se obtiene una distribución de Weibull si una distribución exponencial se eleva a una potencia, pues si Y sigue la distribución exponencial, entonces $Y^{1/\beta}$ tiene una distribución de Weibull (Dudewicz 1976, p. 89).

Predicciones con distribuciones de Weibull. El cálculo analítico de las distribuciones de Weibull (incluso con tablas) es penoso, por lo que las predicciones suelen hacerse con el papel probabilístico de Weibull. Por ejemplo, cinco ejes templados de transmisión de un motor se someten a un test de esfuerzo hasta que cada uno de ellos falla. La duración del test para cada eje, o tiempo de vida en condiciones de fatiga, o abreviadamente, «vida en fatiga», expresado en número de revoluciones hasta que se obtiene el fallo, fue:

10.263
12.187
16.908
18.042
23.271

El problema es predecir el porcentaje de fallo en la población para diferentes valores del número de revoluciones. La solución es representar los datos en el papel de Weibull, observar si los puntos se sitúan aproximadamente en línea recta, y en ese caso, leer aproximadamente las predicciones (porcentaje de fallo) en el gráfico.

Si bien los gráficos de Weibull pueden utilizar el procedimiento de rangos medios usado en el papel probabilístico normal (véase más adelante en Predicciones con distribuciones normales), mucha de la literatura de aplicaciones de la distribución de Weibull utiliza «rangos medianos». La Tabla D del Apéndice II da, para varios tamaños de las muestras, los valores del rango mediano. (Obsérvese que el procedimiento del rango medio no necesita ninguna tabla). Los rangos medianos que necesitamos en este ejemplo particular de una muestra de cinco fallos están en la Tabla 44.18 (donde se dan las estimaciones del rango medio para poder establecer la correspondiente comparación). El número de revoluciones que provoca el fallo se representa en el gráfico de Weibull como abscisas de puntos cuyas ordenadas son los valores del recorrido mediano (véase Figura 44.11). Los puntos se sitúan aproximadamente en línea recta [King (1971, pp. 126-128) describe cómo modificar el gráfico para ayudar a obtener una línea recta], por lo que se asume que se aplica la distribución de Weibull. El eje vertical da los tantos por ciento acumulados de fallos en la población correspondiente a valores de «vida en fatiga» expresados en miles de revoluciones en el eje horizontal. Por ejemplo, alrededor del 50 por ciento de la población de ejes fallará en menos de 17.000 revoluciones. Alrededor del 90 por ciento de la población de ejes fallará en menos de 24.000 revoluciones.

TABLA 44.18 Tabla de rangos medianos y medios

Número de fallo i	Rango mediano	Rango medio = $\frac{i}{5+1}$
1	0,1294	0,1667
2	0,3147	0,3333
3	0,5000	0,5000
4	0,6853	0,6667
5	0,8706	0,8333

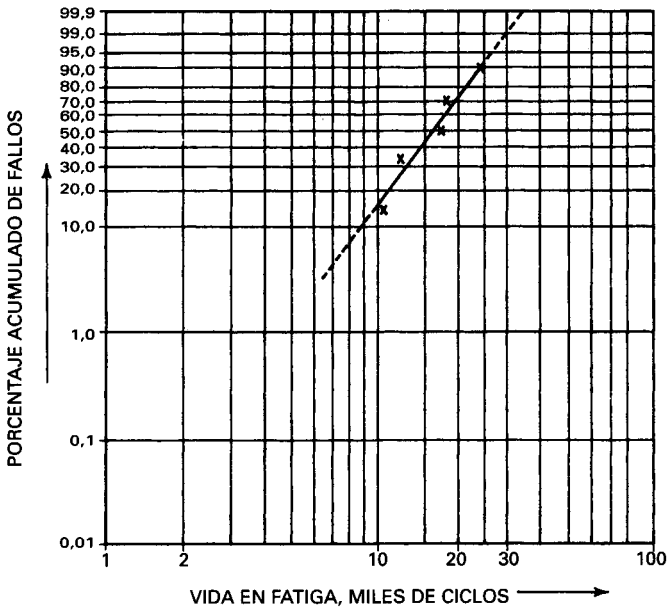


FIGURA 44.11 Distribución del tiempo de vida en fatiga en papel probabilístico de Weibull.

ciones. Con sustracciones adecuadas, se pueden hacer predicciones adecuadas del porcentaje de fallos entre dos límites de «duración de vida en fatiga».

Es tentador utilizar el papel probabilístico para, particularmente, predecir tiempos de vida. Por ejemplo, supongamos que el requerimiento mínimo de «vida en fatiga» se hubiese especificado en 8.000 revoluciones y que las cinco medidas indicadas arriba fuesen los resultados de cinco experimentos realizados para evaluar la posibilidad de nuestro diseño de satisfacer el requerimiento de las 8.000 revoluciones. Dado que los cinco tests exceden las 8.000 revoluciones, el diseño parece adecuado, y en consecuencia se podría comenzar la producción. Sin embargo, la extrapolación en el gráfico de Weibull predice que alrededor del 8 por ciento de la producción de ejes fallará antes de las 8.000 revoluciones. Esto sugiere una revisión del diseño antes de comenzar la producción. Por tanto, la pequeña *muestra* (toda *dentro* de las especificaciones) da un resultado engañoso.

También pueden hacerse extrapolaciones en otra dirección. El gráfico de probabilidad de los datos del test de duración de vida no exige que todos los tests se hayan completado (es decir, que todas las piezas de la muestra hayan fallado) antes de comenzar el dibujo del gráfico. Cuando una unidad falla, el tiempo de fallo puede representarse asociado con el rango mediano correspondiente. Si los primeros puntos parecen seguir una línea recta, parece que podríamos dibujar la recta *antes* de que todos los tests hubiesen terminado. La línea recta puede ser extrapolada más allá de los datos proporcionados por el test, y las predicciones de vida se pueden hacer sin necesidad de emplear mucho tiempo en la completación del test para todos los elementos de la muestra. Esta aproximación se utiliza para predecir, *antes de la utilización de las garantías*, los «pocos vitales» componentes de un producto complejo que serán los más problemáticos. Sin embargo, las extrapolaciones tienen peligros. Requieren una razonable dosis de conocimientos estadísticos, experiencia en ingeniería y sentido común.

Moult (1963) describe la utilización de los gráficos de Weibull en la comparación de la idoneidad de dos tipos de acero para fabricación de cojinetes. El gráfico se muestra en la Fi-

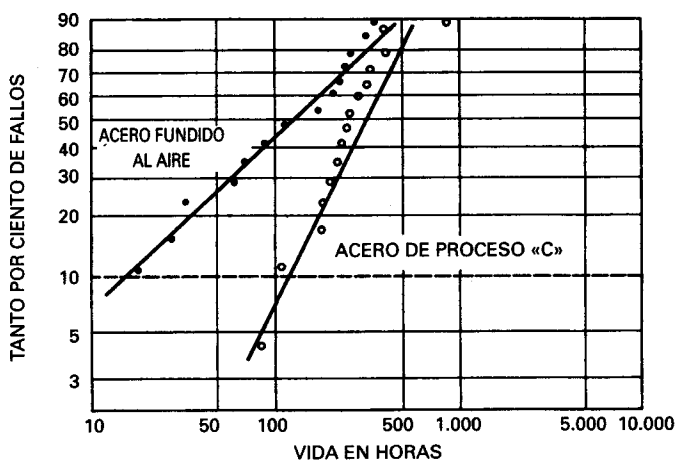


FIGURA 44.12 Límite de fatiga —comparación del proceso «C» de desgasificación al vacío frente a la fundición al aire AISI 8620.

gura 44.12. Nelson (1982) discute el papel de Weibull. El papel probabilístico está disponible para las distribuciones normal, exponencial, Weibull y otras distribuciones. (Pueden obtenerse en TEAM, Technical and Engineering Aids for Management, Box 25, Tamworth, NH 03886). Aunque las funciones matemáticas y las tablas proporcionan la misma información que los gráficos, éstos muestran *relaciones* entre las probabilidades y los valores de X que no son fáciles de ver sólo con los cálculos. Por ejemplo, la reducción en el tanto por ciento de defectos de una población al aumentar el intervalo entre las tolerancias se manifiesta muy claramente con los gráficos.

La distribución normal. Muchas características de ingeniería se aproximan por la distribución normal:

$$y = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2}$$

donde $e = 2,718$; $\pi = 3,141$; μ = media de la población, y σ = desviación típica de la población.

Los problemas relativos a la distribución normal se resuelven con una tabla, y debe advertirse que esta distribución sólo exige la estimación de la media μ y de la desviación típica σ de la población (y mientras no se indique lo contrario, las letras griegas se utilizarán para los valores población, en tanto que las romanas se emplearán para los valores en la muestra) para poder hacer predicciones en la población. La curva de la distribución normal de probabilidad está relacionada con una distribución de frecuencias y su histograma. A medida que se toma una muestra mayor y la amplitud de los intervalos se hace más pequeña, el histograma se aproxima a una curva continua. Si se midiese la población completa (en la práctica la población se considera infinita, como sucede al considerar, por ejemplo, la posible producción de un proceso) y si su distribución fuese normal, se obtendría un resultado como el indicado en la Figura 44.7. Por tanto, la forma de un histograma de los datos de una muestra suministra indicaciones sobre la distribución de probabilidad de una población. Si el histograma se parece a la forma de «campana» de la Figura 44.7, se tiene una cierta base para asumir que la población sigue una distribución normal

de probabilidad. (No es necesario que el histograma de la muestra sea perfectamente normal; la hipótesis de normalidad se aplica sólo a la población, y las muestras aleatorias tienen pequeñas desviaciones respecto a la normalidad). Hahn (1971) da unos criterios prácticos de reconocimiento de la normalidad. (El nombre distribución *normal* proviene de una época en que todas las demás distribuciones eran consideradas erróneamente como no normales. Hoy, algunos prefieren el nombre de distribución *de Gauss*).

Modelo que proporciona una distribución de normal (errores aditivos, teorema central del límite). Se puede probar que si una variable Y es la suma de muchas otras variables que no sean muy dependientes unas de otras, entonces Y tiene aproximadamente una distribución normal. [Este resultado se llama el *teorema central del límite*; véase Dudewicz (1976, página 149)]. Los estadísticos recomiendan que hay que sumar 10 o más variables para que se tenga cierta confianza en que la suma seguirá la distribución normal; sin embargo, muchos estudios aplicados han obtenido buenos resultados con sólo la adición de tres términos.

Predicciones con distribuciones normales. Las predicciones requieren dos estimaciones y una tabla. Las estimaciones son

$$\text{Estimación de } \mu = \bar{X} \quad \text{y} \quad \sigma = s$$

Los cálculos de $\bar{X}$ y s en una muestra se hacen por uno de los métodos previamente discutidos.

Por ejemplo, por la experiencia acumulada, un fabricante concluye que el tiempo que tarda en fundirse un tipo particular de bombillas que fabrica se distribuye normalmente. Se ensaya una muestra de 50 bombillas y se encuentra que la vida media es de 60 días, con una desviación típica de 20 días. ¿Qué proporción de bombillas de la población completa que pueda fabricar se espera que tenga una vida superior a los 100 días?

El problema es encontrar el área debajo de la curva más allá de los 100 días (véase Figura 44.13). El área debajo de una función de densidad de probabilidad entre dos valores de la variable representa la probabilidad entre esos dos valores. Por tanto, el área más allá de los 100 días es la probabilidad de que la bombilla dure más de 100 días. Para encontrar esa área se debe calcular la distancia en desviaciones típicas entre un valor X y la media:

$$K = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

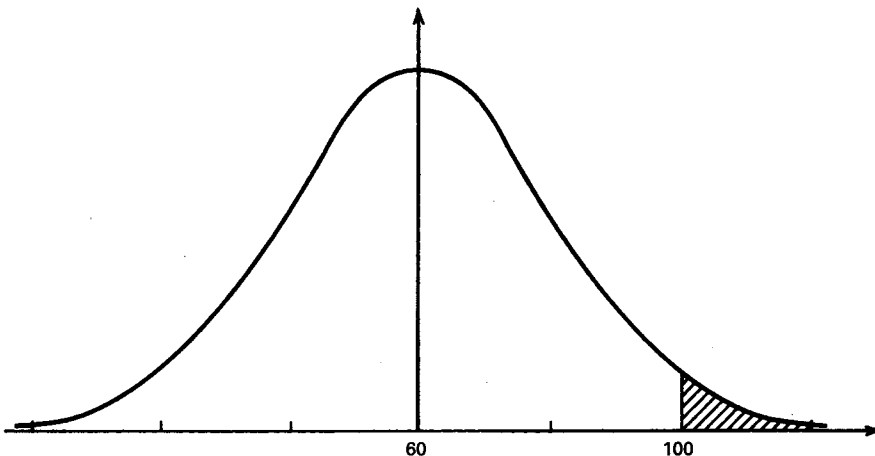


FIGURA 44.13 Distribución de la vida de un tipo de bombillas.

En este problema, $K = (100 - 60)/20 = +2,0$. La Tabla B en el Apéndice II muestra, para $K = 2$, una probabilidad de 0,9773, lo que aplicado a este problema significa que la probabilidad de que una bombilla dure 100 o menos de 100 días es 0,9773. La curva normal es simétrica alrededor de la media, y el área total es 1,000. La probabilidad de que una bombilla dure más de 100 días es $1,0000 - 0,9773 = 0,0227$, lo que nos indica que un 2,27 por ciento de las bombillas de la población seguirán encendidas después de 100 horas de funcionamiento.

De forma análoga, si una característica se distribuye normalmente, y si se obtienen estimaciones de la media y de la desviación típica de la población, este método permite determinar el tanto por ciento de la producción que está entre los límites de especificación dados por ingeniería.

La Figura 44.14 muestra algunas áreas situadas por debajo de la curva de una distribución normal (que pueden deducirse con la Tabla B del Apéndice II). Por tanto, el 68,26 por ciento de la *población* estará entre la media de la población más o menos una desviación típica, 95,46 por ciento de la población estará entre la media $\pm 2\sigma$, y finalmente, el intervalo entre la media $\pm 3\sigma$ contiene el 99,73 por ciento de la población. El porcentaje de una *muestra* situado entre unos límites puede ser diferente del porcentaje de la población situado entre esos mismos límites. Esta importante observación es crucial en el estudio de los tests de hipótesis (que veremos más adelante en este capítulo).

Otra forma de hacer predicciones con la distribución normal se basa en la utilización del papel probabilístico. El papel probabilístico se construye de forma que la representación de los datos procedentes de la población de una distribución concreta sea una línea recta, por lo que los datos de una muestra procedente de una distribución normal se sitúan aproximadamente sobre una línea recta al representarlos en un papel probabilístico normal. (Es razonable obtener pequeñas desviaciones respecto a la línea recta, dado que los datos proceden de una *muestra* de la población). Las etapas para representar unos datos en un papel probabilístico son:

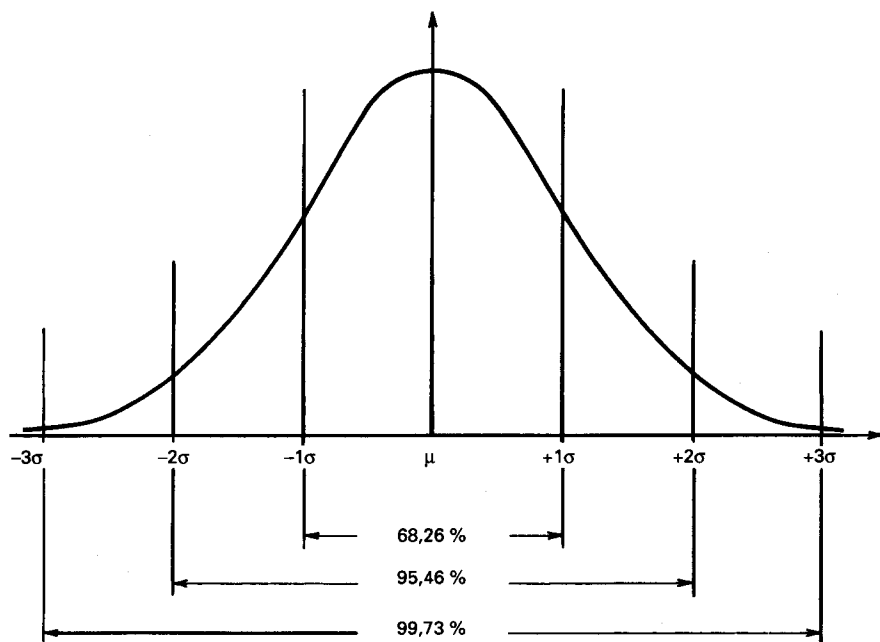


FIGURA 44.14 Área bajo la curva normal.

- 1. Ordenar los datos de menor a mayor. El dato menor tiene rango i de 1 y el dato mayor tiene rango n .
- 2. Para cada valor, calcular la frecuencia acumulada.
- 3. Para cada valor, calcular

$$\frac{\text{Frecuencia acumulada}}{n + 1} \times 100$$

Esto proporciona la probabilidad estimada en tanto por ciento para el rango medio de los datos representados.

- 4. Representar los puntos cuyas coordenadas son los pares de números formados por los valores observados y la probabilidad estimada del rango medio.

Si las observaciones están en forma de distribución de frecuencias, el procedimiento es el mismo, salvo que en lugar de utilizar los valores observados se utilizan los extremos de los intervalos, que con las probabilidades estimadas nos dan las coordenadas de los puntos que se dibujan en el papel probabilístico (véase la Tabla 44.19).

El gráfico se muestra en la Figura 44.15, utilizando en su obtención los extremos inferiores de los intervalos, la última columna de la Tabla 44.19 y la escala en tanto por ciento situada en la parte superior del gráfico. La recta se ha trazado a ojo, tratando de ajustarse lo más posible a los puntos, y el ajuste parece razonable. Esta recta es una estimación de la población, y permite obtener por lectura directa, y con una aproximación razonable, las predicciones hechas antes con la tabla normal de probabilidad. Por ejemplo, el 5 por ciento de la población de cables tendrá resistencia superior a 3,39. También, un 95 por ciento tendrá valores mayores que 3,29. (Por tanto, $95 - 5 = 90$ por ciento tendrá valores entre 3,29 y 3,39).

La Figura 44.16 muestra un formato que incorpora al papel probabilístico nuevos elementos que permiten analizar los límites de confianza y los límites de control. (Este formato fue desarrollado inicialmente por E. F. Taylor).

King (1971) da una descripción práctica de procedimientos con papel probabilístico para distribuciones normales, así como para otras distribuciones importantes. El ajuste de la recta a los puntos es hecho a ojo cuando el ajuste es bueno (como sucede en la Figura 44.15); cuando el ajuste no es tan claro, es preciso utilizar tests estadísticos para poder aceptar o rechazar la normalidad de la población, representada por una muestra. Véase Iman (1982) para los detalles y gráficos en los que este análisis debe hacerse.

La distribución logarítmica normal. Si $Y = e^Z$, donde Z tiene una distribución normal, se dice que Y tiene una *distribución logarítmica normal* (ya que el logaritmo de Y tiene una distribución normal).

TABLA 44.19 Datos de resistencias

Intervalos	Frecuencia	Frecuencia acumulada	Frecuencia acumulada	(100)
			$\frac{100 + 1}{n + 1}$	
3,415-3,445	1	1	0,99 %	
3,385-3,415	8	9	8,90	
3,355-3,385	27	36	35,60	
3,325-3,355	36	72	71,30	
3,295-3,325	23	95	94,10	
3,265-3,295	5	100	99,00	
	100			

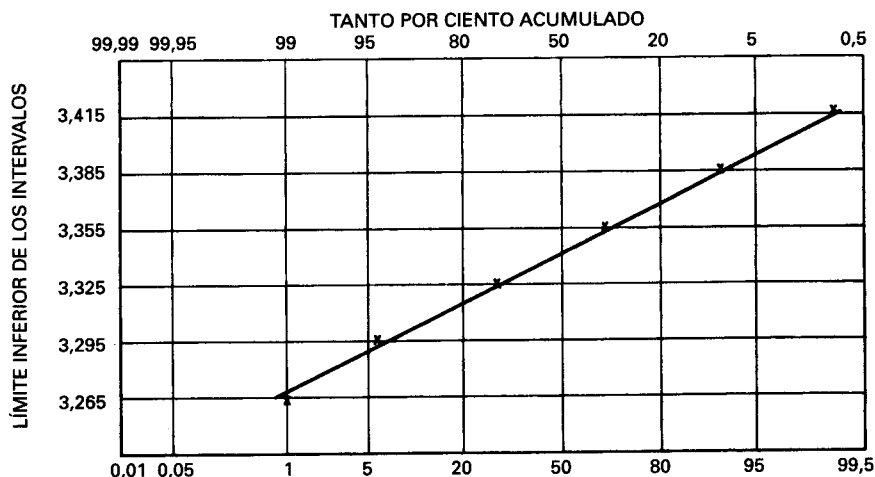


FIGURA 44.15 Gráfico de probabilidad acumulada de la Tabla 44.19.

Modelo que proporciona una distribución logarítmica normal (multiplicación o porcentaje de efectos). Las variables logarítmico normales aparecen cuando los efectos son porcentajes multiplicativos, lo que es común en biología y en muchas otras aplicaciones. Por ejemplo, si un porcentaje aleatorio de los artículos de un almacén se deterioran en cada periodo de tiempo, el porcentaje de deteriorados después de un número elevado de periodos de tiempo (10 o más) sigue la distribución logarítmica normal. (Esto se deduce del teorema central del límite considerado al estudiar la distribución normal, ya que el logaritmo de un producto es la suma de los logaritmos de los factores del producto).

Predicciones con la distribución logarítmica normal. Como en las distribuciones normales, las predicciones requieren dos estimaciones. Para detalles, véanse Cohen y Whitten (1981). Obsérvese que la distribución logarítmica normal tiene asimetría positiva y se emplea como modelo de distribución de duraciones de vida, tiempos de reacción, distribución de ingresos y otras variables económicas.

Con frecuencia nos interesan la media, la desviación típica y las probabilidades de una variable logarítmico normal Y ; estos parámetros pueden estimarse fácilmente para la variable Z (el logaritmo de $Y = e^Z$), lo que no nos resuelve el problema en la variable Y , ya que si Y es el tiempo de vida de un sistema, lo que se desea estimar es la vida media del sistema y no la media del logaritmo de Y . Esta es la razón por la que se han desarrollado métodos especiales para esta distribución.

Distribuciones mezcladas. La variable Y se dice que tiene una *distribución mezclada* si Y proviene de una fuente i durante un tanto por ciento $100p_i$ del tiempo ($i = 1, 2, \dots$).

Modelo que proporciona una distribución mezclada. Cuando se mezcla la producción de varias fuentes (por ejemplo: la producción de varios proveedores, varias plantas, varias máquinas, varios empleados, etc.), las características de la mezcla resultante tienen distribuciones mezcladas. Si cada una de las componentes que intervienen en la mezcla tiene exactamente la misma distribución, entonces la mezcla también tiene esa distribución. Sin embargo, si las componentes que intervienen en la mezcla tienen diferentes distribuciones, entonces la mezcla tiene una *distribución mezclada*.

VARIABLE ANALIZADA		ESPECIFICACIÓN		ESTIMACIÓN		OOS		Plus		P ₁₂		LCS ₂		LCS ₂		LCS ₂₀₀		R ₀₀	
ANALISTA		INFORME NÚMERO		FECHA		LÍMITES DE CONFIANZA		U		U		L		L		L		L	
1 INTERVALOS Y PUNTOS MEDIOS		2 REGISTRO DE FRECUENCIAS		3 ACUMULADO		4 ACUMULADO		5 ESCALA Z		6 PORCENTAJE POR DEBAJO		7 PORCENTAJE POR ENCIMA		8 ESCALA Z		9		10	
DATOS ORIGINALES		NORMALIZACIÓN		LADO		ACUMULADO		ESCALA Z		PORCENTAJE POR DEBAJO		PORCENTAJE POR ENCIMA		ESCALA Z					
+9																			
+7																			
+6																			
+5																			
+4																			
+3																			
+2																			
+1																			
0																			
-1																			
-2																			
-3																			
-4																			
-5																			
-6																			
-7																			
-8																			
TRANSFORMACIÓN		AMPLITUD DEL INTERVALO		TOTAL		2 X 3		ESCALA Z		PORCENTAJE POR DEBAJO		PORCENTAJE POR ENCIMA		ESCALA Z					
		1 σ 3 m VERTICAL																	
		1 σ 1 Z HORIZONTAL																	

FIGURA 44.16 Hoja de análisis de una distribución normal.

Ajuste de distribuciones mezcladas. Según puede verse en la Figura 44.7, las distribuciones que venimos considerando son unimodales (lo que significa que sólo tienen un pico). Cuando se ven dos o más picos en el histograma, se puede sospechar que una mezcla subyace en los datos. En muchos casos esto lleva a un estudio de las entradas a la mezcla, que a veces lleva a averiguar un problema en una de ellas por no ser homogéneo el producto que proporciona.

En otros casos, las entradas a la mezcla no pueden separarse (o no es deseable separarlas), e incluso se puede ajustar la función de densidad de Y como $p_1 f(Z_1) + p_2 f(Z_2) + \dots + p_k f(Z_k)$ para algún valor de k mayor o igual a 2. Aquí la suma de las p_i es 1 (100 por ciento de la mezcla, y con frecuencia se sabe que las variables Z_i son normales. Para ajustar la distribución de Y se deben seleccionar $k - 1$ valores de p (pues todos ellos suman 1, por lo que el último está determinado por los anteriores), k medias y k varianzas. Este procedimiento necesita la utilización de moderno software, como el programa LABONE. Como un ejemplo, considérense los datos de la Tabla 44.20. El histograma de estos datos muestra que puede hacer una mezcla (de dos distribuciones, ya que hay dos picos). A simple vista, esas dos distribuciones parecen ser normales. Con la utilización del programa LABONE Expert Statistical Programs (ESP), podemos encontrar con facilidad una mezcla de distribuciones normales.

La distribución multinormal. Las distribuciones continuas de probabilidad estudiadas hasta ahora (uniforme, exponencial, Weibull, normal, logarítmica normal y mixta) hacen referencia a situaciones *univariantes*, esto es, que sólo nos interesa una característica de los elementos producidos o considerados (por ejemplo el tiempo de vida). Si adicionalmente hay otras características que son de interés (como el peso o la talla), entramos en una situación *multivariante* (en el ejemplo sería *trivariante*). Cuando cada una de esas características sigue una distribución normal, se tiene que la distribución multinormal es la apropiada para su descripción conjunta. La distribución multinormal es la más utilizada de las distribuciones continuas multivariantes.

Modelo que proporciona una distribución multinormal. El mismo proceso aditivo que lleva a una distribución normal univariante proporciona una distribución normal multivariante cuando se mide más de una variable en cada realización.

Predicciones con distribuciones normales. Las predicciones con distribuciones multinormales requieren apoyo de paquetes informáticos, cuyos detalles y ejemplos están discutidos en Siotani et al. (1985).

La distribución lambda generalizada y extendida. La distribución uniparamétrica lambda fue propuesta por J. Tukey en 1960 y generalizada por J. S. Ramberg y B. Schmeiser

TABLA 44.20 Datos para análisis de una mezcla

3,37	3,34	3,48	3,32	3,33	3,38	3,34	3,31	3,43	3,34
3,29	3,46	3,30	3,31	3,43	3,34	3,34	3,46	3,39	3,34
3,45	3,36	3,30	3,42	3,33	3,35	3,45	3,34	3,32	3,48
3,32	3,37	3,44	3,38	3,36	3,47	3,36	3,31	3,43	3,30
3,35	3,43	3,38	3,37	3,54	3,32	3,36	3,42	3,29	3,35
3,48	3,39	3,34	3,42	3,30	3,39	3,46	3,40	3,32	3,43
3,29	3,41	3,37	3,36	3,41	3,47	3,36	3,37	3,43	3,36
3,31	3,43	3,35	3,34	3,45	3,34	3,31	3,46	3,37	3,35
3,50	3,35	3,37	3,42	3,35	3,36	3,48	3,35	3,31	3,44
3,35	3,36	3,49	3,31	3,31	3,40	3,35	3,33	3,45	3,31

en 1974, y desarrollada y tabulada por Ramberg et al. (1979). Esta distribución puede ajustar una amplia variedad de formas de curvas, pudiendo ajustar cualquier media y cualquier varianza; sin embargo, no es capaz de ajustar muchas combinaciones de asimetría y curtosis. Es, pues, útil cuando es capaz de ajustar también la simetría y la curtosis, pero no lo es cuando no es capaz de ajustarlas. Recientemente, Karian et al. (1996) han construido una extensión denominada *distribución lambda generalizada y extendida* (EGLD, por las iniciales del inglés), que puede ajustar los valores de la media, varianza, asimetría y curtosis; las tablas para las aplicaciones se encuentran en Dudewicz y Karian (1996). Por tanto, los beneficios de esta familia empírica de distribuciones están disponibles para todos los conjuntos de datos univariantes. Estos métodos han sido extendidos a distribuciones lambda generalizadas bivariantes por Karian y Dudewicz (1999).

Selección de una distribución continua. La selección de la distribución continua que debe utilizarse para ajustar unos datos se hace o por el conocimiento de la situación subyacente o ajustando el modelo de distribución elegida al histograma de datos (lo que se suele hacer con la ayuda de los papeles probabilísticos de las distribuciones usuales de probabilidad). En cualquier caso, un test del modelo seleccionado es deseable para comprobar su validez.

Selección de modelos por conocimiento de la realidad. En muchos casos se conoce (o se asume) que el modelo que nos lleva a una de las distribuciones que hemos discutido subyace debajo de una situación práctica. Por ejemplo, si la distribución de la vida de un equipo en el pasado siempre se ha ajustado por una distribución de Weibull (aunque los parámetros del modelo hayan cambiado con el paso del tiempo de un estudio a otro), se comenzará suponiendo que ahora también nuestros datos se ajustan por una distribución de Weibull.

Tests de validez del ajuste por una distribución (gráficos de probabilidad, tests para distribuciones específicas). En la práctica se asume un tipo de distribución evaluando un conjunto de datos. Con frecuencia es suficiente evaluar la forma del histograma o la exactitud con que el gráfico en papel probabilístico se ajusta a una línea recta. Estos métodos requieren conocimientos y sentido común estadístico (por ejemplo, ¿cuánto deben aproximarse los puntos a una recta?). Dado que la muestra nunca se ajusta perfectamente al modelo, se aconseja utilizar tests cuantitativos con los gráficos de probabilidad (véase Iman 1982). Conviene ser desconfiado de los datos que proporcionan un ajuste «perfecto». Los tests de «Bondad del ajuste» (véase Test de hipótesis, más adelante en ese capítulo) evalúan la hipótesis de ajuste de unos datos por una distribución con criterios cuantitativos.

Ajuste de distribuciones empíricas de probabilidades. Si no hay razón suficiente para sugerir uno de los modelos específicos discutidos anteriormente, o si son rechazados (por ejemplo un ajuste muy deficiente en el papel probabilístico), una alternativa es ajustar con un modelo empírico. Tales modelos pueden adaptarse a un amplio rango de formas de distribuciones, incluyendo muchos de los modelos específicos discutidos antes. Una de las familias más ampliamente utilizadas ha sido la *distribución lambda generalizada* (GLD). Sin embargo, como se discutió antes, la nueva *distribución lambda generalizada y extendida* (EGLD) aumenta sus posibilidades y debe ser utilizada en lugar de la GLD; con frecuencia las dos dan el mismo resultado, pero cuando la GLD tiene dificultades, la EGLD puede ajustarse a los momentos de la muestra de la población.

Como un ejemplo, la Tabla 44.21 nos da datos (sacados de la p. 219 de Hahn y Shapiro 1967) de los coeficientes de fricción de un metal en 250 ensayos. Utilizando los procedimientos y las tablas dadas contenidas en Ramberg et al. (1979), se puede obtener una función de probabilidad.

TABLA 44.21 Datos de coeficientes de fricción

Recorrido	Frecuencia
Menos que 0,015	1
0,015-0,020	9
0,020-0,025	30
0,025-0,030	44
0,030-0,035	58
0,035-0,040	45
0,040-0,045	29
0,045-0,050	17
0,050-0,055	9
0,055-0,060	4
Más que 0,060	4
Total	250

Como una prueba de la bondad del ajuste, se recomienda que la función de densidad de probabilidad se dibuje en el mismo gráfico que el histograma para hacer una evaluación visual del ajuste (que se puede complementar con un test chi cuadrado si se desea), lo cual se puede ver en la Figura 44.17, y se ve que el ajuste es excelente (conclusión a la que también se llega con el test chi cuadrado).

Métodos de muestreo y remuestreo (Bootstrap Methods). Los métodos de muestreo y remuestreo sugieren ajustar los datos por un modelo, como uno de los suministrados por la distribución lambda generalizada y extendida (ECLD), y asumiendo que el ajuste verifica el test de validación, utilizar los métodos de muestreo y remuestreo (véase más adelante en este capítulo el Método generalizado de muestreo y remuestreo).

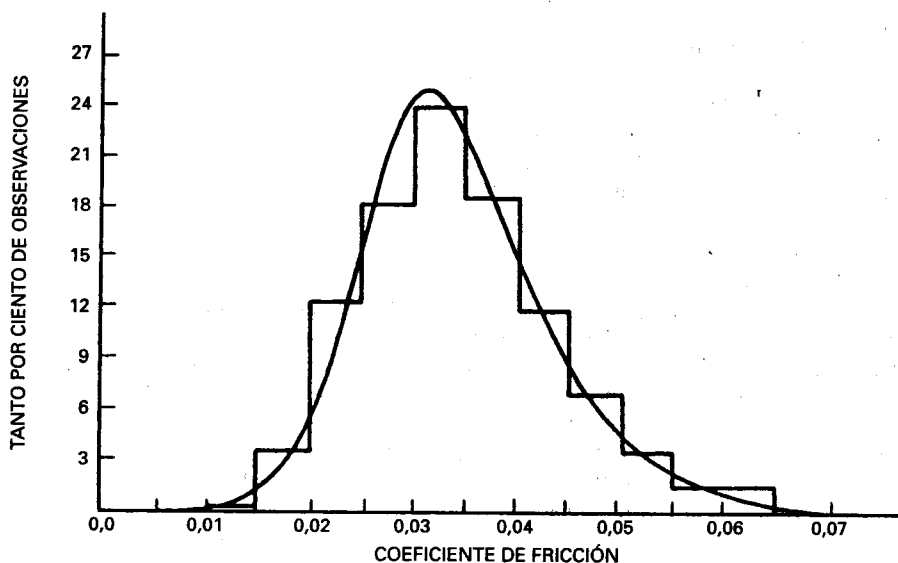


FIGURA 44.17 Histograma de frecuencias relativas del coeficiente de fricción y distribución ajustada.

ESTIMACIÓN ESTADÍSTICA

El objeto de la estimación estadística es realizar inferencia de los parámetros de una población a partir de los datos de una muestra. Por ejemplo, si tenemos una muestra aleatoria de 100 elementos extraídos de un lote muy numeroso, la información que tengamos de la muestra vamos a utilizarla para extraer información de la proporción p de defectos del lote. Esta inferencia se hace con un número (*estimación puntual*) o con un par de números (*estimación por un intervalo*); hay varios tipos de estimación de intervalos, dependiendo de nuestros propósitos. Si encontramos que 15 de los 100 elementos de la muestra son defectuosos, podemos estimar que p es igual a $15/100 = 0,15$ (estimación puntual); la estimación por intervalo consiste en establecer que tenemos un 95 por ciento de confianza en que p está comprendido entre 0,08 y 0,22 (estimación de un intervalo de confianza). Por tanto, un *intervalo de confianza* establece unos límites para el parámetro desconocido, en este caso la proporción p . Los *intervalos de predicción* y los *intervalos de confianza* son otros dos tipos de intervalos que necesitaremos con frecuencia. Sea X el número de defectos en una futura muestra; un intervalo de predicción pone límites a X , tales como

$$P[L_1 \leq X \leq U_1] = 0,95$$

En este ejemplo, un *intervalo de predicción* establecería que X debería estar entre 5 y 25; éstos serían los límites entre los que con un 95 por ciento de seguridad se podría garantizar que estaría el número de defectos de una futura muestra de 100 elementos extraída aleatoriamente del lote. Un *intervalo de tolerancia* establece límites (L, U) tales que con un 95 por ciento de seguridad se puede establecer que al menos un 99 por ciento de la población estará incluida entre esos límites. En este ejemplo, la población son todos los lotes de 100 elementos que se puedan extraer del mismo proceso; tenemos un 95 por ciento de seguridad de que como mínimo un 99 por ciento de los lotes tendrán una proporción de defectos entre $L = 0,05$ y $U = 0,25$. Estas consideraciones son discutidas con detalle a continuación.

Estimación por puntos. Habitualmente, la estimación por puntos nos da el centro de un intervalo estimado. En muchos casos es preferible dar el intervalo estimado, pues nos indica la incertidumbre asociada con la estimación. Si, por ejemplo, observamos que el 15 por ciento de los elementos extraídos al azar de un gran lote son defectuosos, se estima la proporción de elementos defectuosos en el lote igual a $15/100 = 0,15$. Análogamente, si se observan tres piezas defectuosas en una muestra de 20 elementos, se estima la proporción de defectos en $3/20 = 0,15$. Sin embargo, en el primer caso el intervalo estimado (con un 95 por ciento de confianza) nos indicaría que p estaría entre 0,08 y 0,22, en tanto que en el segundo caso el intervalo estimado (con un 95 por ciento de confianza) nos indicaría que p estaría entre 0,00 y 0,31. En cualquier caso, si tuviésemos que estimar la proporción de defectos en el lote por un único número, este número sería 0,15; sin embargo, la incertidumbre en la estimación es tanto mayor cuanto menor sea el tamaño de la muestra (pues hasta un 31 por ciento de la población puede ser defectuosa, en tanto que con una muestra mayor, como la del primer ejemplo, sólo un 22 por ciento de la población podría ser defectuosa). La obtención de la estimación puntual se da en los apartados siguientes por el centro de los intervalos obtenidos.

Estimación por intervalos de confianza. La *estimación* es el proceso de analizar el resultado de una muestra para predecir el valor del correspondiente parámetro de la población. Por ejemplo, supongamos que 12 aislantes de una muestra tienen una resistencia media ante un impacto de $4,952 \text{ N} \cdot \text{m}$. Si esta muestra es representativa del proceso, ¿cuál es la estimación de la resistencia media ante un impacto de la población completa de aislantes?

1. La *estimación puntual* es un valor único utilizado para estimar el parámetro de la población. Por ejemplo, $4,952 \text{ N} \cdot \text{m}$ es el punto que estima la resistencia media de la población.

2. El *intervalo de confianza* es un intervalo de valores que incluye (con una probabilidad preasignada llamada *nivel de confianza*) el verdadero valor del parámetro de la población. Los *límites de confianza* son los límites superior e inferior del intervalo de confianza. El nivel de confianza es la proporción de veces en que la afirmación acerca del parámetro de la población es correcta tras muchas repeticiones del proceso.

Duncan (1974) da una discusión completa de los límites de confianza. Aquí explicaremos el concepto después de los cálculos.

Si la media de la población es μ , entonces la probabilidad de que la media de la muestra esté comprendida entre

$$\mu \pm 1,96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

es igual a 0,95:

$$P\left(\mu - 1,96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \bar{X} \leq \mu + 1,96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right) = 0,95$$

Esto es algebraicamente equivalente a decir que la media de la muestra más 1,96 desviaciones típicas de la media es mayor o igual a μ , y que la media de la muestra menos 1,96 desviaciones típicas de la media es menor o igual a μ :

$$P\left(\mu \leq \bar{X} + 1,96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \text{ y } \bar{X} - 1,96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu\right) = 0,95$$

o

$$P\left(\bar{X} - 1,96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + 1,96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right) = 0,95$$

Por tanto, el intervalo para μ con un intervalo de confianza del 95 por ciento es $\bar{X} \pm 1,96 (\sigma/\sqrt{n})$. Antes de que se tome la muestra, este intervalo tiene un 95 por ciento de probabilidad de incluir la media μ de la población. En general, así se expresa que hay un 95 por ciento de «confianza» de que los límites obtenidos a partir de la muestra contengan el verdadero valor de la población.

Si en la muestra de 12 aislantes se tiene que $\sigma = 0,25$, entonces los límites de confianza para la media de la población al 95 por ciento (se podría añadir al 95 por ciento de nivel de confianza) son:

$$\bar{X} \pm 1,96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = 4,952 \pm 1,96 \frac{(0,25)}{\sqrt{12}} = 4,811 \text{ y } 5,093$$

Esto significa que hay un 95 por ciento de confianza de que μ esté entre 4,811 y 5,093. El 95 por ciento indica el nivel de confianza (los niveles de confianza que normalmente se utilizan en la práctica son 90, 95 o 99 por ciento, y algunos estadísticos les llaman los «números benditos»), y 4,811 y 5,093 son los extremos del intervalo de confianza. El nivel de confianza está asociado con una deducción basada en valores de una muestra y nos mide la proporción de veces que la deducción es cierta al repetir muchas veces el proceso. Los límites de confianza son límites que incluyen el verdadero valor con un grado de confianza determinado a priori (que es el nivel de confianza).

La Tabla 44.22 resume las fórmulas de los límites de confianza para muchos parámetros comunes. Los ejemplos siguientes ilustran algunas de esas fórmulas.

TABLA 44.22 Resumen de los límites de confianza de fórmulas y gráficos

Parámetros	Fórmulas
1. Media de una población normal (desviación típica conocida)	$\bar{X} \pm K_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ donde $\bar{X}$ = media muestral K = coeficiente de distribución normal (véase Apéndice II, Tabla B) σ = desviación típica de la población n = tamaño de la muestra
2. Media de una población normal (desviación típica desconocida)	$\bar{X} \pm t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}}$ donde t = coeficiente dado por la distribución de Student (con $n - 1$ grados de libertad) (véase Apéndice II, Tabla G) s = estimación de σ
3. Desviación típica de una población normal a. Utilizando la desviación típica muestral b. Utilizando el recorrido muestral	Límite superior de confianza = $B_U s$ Límite inferior de confianza = $B_L s$ donde B_U y B_L son los factores numéricos dados en Natrella (1963, p. T-34), Dixon y Massey (1969, p. 140)
4. Proporción de defectos en la población utilizando atributos (fracción de defectos en la muestra)	Véase Apéndice II, gráfico N
5. Proporción de defectos en la población utilizando variables ($\bar{X}$ y s muestral)	Véase Kirkpatrick (1970)
6. Diferencia entre las medias de dos poblaciones normales (desviaciones típicas σ_1 y σ_2 conocidas)	$(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) \pm K_{\alpha/2} \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}$ donde K es el coeficiente dado por la distribución normal (véase Apéndice II, Tabla B)
7. Diferencia entre las medias de dos poblaciones ($\sigma_1 = \sigma_2$, pero desconocidas)	$(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) \pm t_{\alpha/2} \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \times \sqrt{\frac{\Sigma (X - \bar{X}_1)^2 + \Sigma (X - \bar{X}_2)^2}{n_1 + n_2 - 2}}$ donde t = coeficiente de la distribución de Student (con $n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad) (véase Apéndice II, Tabla G)
8. Diferencia entre las medias de dos poblaciones normales (σ_1 y σ_2 desconocidas)	$(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) \pm t_{\alpha/2}^* \sqrt{\frac{\Sigma (X - \bar{X}_1)^2}{n_1(n_1 - 1)} + \frac{\Sigma (X - \bar{X}_2)^2}{n_2(n_2 - 1)}}$ donde t^* = coeficiente de la distribución de Student (con número de grados de libertad el mínimo de $n_1 - 1$ y $n_2 - 1$)
9. Tiempo medio entre fallos (basado en una distribución exponencial del tiempo entre fallos)	Límite superior de confianza = $2T/\chi_{\alpha/2}^2$ Límite inferior de confianza = $2T/\chi_{1-\alpha/2}^2$ donde T = tiempo total de la prueba y $DF = 2r$, donde r es un número preasignado de fallos y donde χ^2 = coeficiente dado por la distribución chi cuadrado (véase Apéndice II, Tabla L)
10. Fiabilidad (basada en la distribución de Weibull)	Véanse Thoman, Bain y Antle (1970)
11. Disponibilidad (basada en una distribución exponencial del tiempo entre fallos y una distribución logarítmico normal del tiempo de reparación)	Véanse Gray y Lewis (1967)

Ejemplo: Sesenta y un artículos de latón tienen una dureza media de 54,62 y una desviación típica estimada de 5,34. Determinar los límites de confianza de la media al 95 por ciento.

Solución:

$$\begin{aligned}\text{Límites de confianza} &= \bar{X} \pm t \frac{s}{\sqrt{n}} \\ &= 54,62 \pm 2,00 \frac{5,34}{\sqrt{61}} \\ &= 53,25 \text{ y } 55,99\end{aligned}$$

Hay un 95 por 100 de confianza en que la dureza media de los artículos de la población está entre 53,25 y 55,99.

Ejemplo: Un sistema de radar ha estado trabajando durante 1.200 horas, durante las cuales han ocurrido ocho fallos. ¿Cuáles son límites de confianza al 90 por ciento para el tiempo medio entre dos fallos del sistema?

Solución:

$$\begin{aligned}\text{Media estimada } m &= \frac{1200}{8} = 150 \text{ h} \\ \text{Límite superior de confianza} &= \frac{2(1200)}{7,962} = 301,4 \\ \text{Límite inferior de confianza} &= \frac{2(1200)}{26,296} = 91,3\end{aligned}$$

Hay un 90 por ciento de confianza de que el tiempo medio entre fallos se sitúe entre 91,3 y 301,4 horas. [Epstein (1960) discute varios casos de estimaciones a partir de un test de datos de duración de vida de ciertos elementos].

Ha aparecido cierta confusión en la aplicación del término *nivel de confianza* en los índices de fiabilidad como en el tiempo medio entre fallos. Utilizando un ejemplo diferente, supongamos que se lee la siguiente condición de fiabilidad: «El tiempo medio entre fallos (TMEF) debe ser como mínimo 100 horas, con un nivel de confianza del 90 por ciento». Esto significa que:

1. El mínimo TMEF debe ser 100 horas.
2. En el producto deben realizarse tests fiables para demostrar con un 90 por ciento de confianza que las 100 horas de TMEF se obtienen.
3. Los datos del test deben ser analizados para calcular el TMEF observado y el límite inferior de confianza al 90 por ciento del TMEF.
4. El límite inferior de confianza debe ser ≥ 100 horas.

El término *nivel de confianza* está muy relacionado, desde el punto de vista estadístico, con un programa de comprobación. Obsérvese que el tiempo medio entre fallos debe ser *mayor que* 100 si el límite de confianza inferior es ≥ 100 . Nivel de confianza significa que la realización de muchos tests de comprobación demostraría, con validez estadística, que el requerimiento se satisface. El nivel de confianza *no tiene nada que ver* con una opinión cualitativa respecto a satisfacer el requerimiento pedido. También, el nivel de confianza *no tiene nada que ver* con la disminución de la exigencia pedida; es decir, que 100 horas de TMEF al 90 por ciento de confianza no significa que 100 horas es lo deseable, pero que $0,9 \times 100 = 90$

horas es aceptable. Estos serios errores han ocurrido. Cuando este término se utiliza se debe comprobar, y no sólo simplemente asumir, que se tiene de él una clara comprensión.

Determinación del tamaño de muestra requerido para obtener una precisión exigida en una estimación. Si aumenta el número de pruebas, o de elementos en una muestra, aumenta la precisión de la estimación que se obtiene. El aumento de precisión no varía linealmente con el número de pruebas; duplicar el número de pruebas no duplica la precisión (ni siquiera aproximadamente). Además, si la muestra se selecciona aleatoriamente y si el tamaño de la muestra es menor del 10 por ciento del tamaño de la población, entonces la precisión depende, fundamentalmente, del tamaño absoluto de la muestra más que del tamaño de la muestra expresado como un tanto por ciento del tamaño de la población. Así pues, una muestra cuyo tamaño sea el 1 por ciento de una población de 100.000 elementos, puede proporcionar más precisión que una muestra que conste de un 10 por ciento de los individuos de una población de 1.000 elementos (véase Hahn 1972).

El costo de realizar pruebas adicionales debe ser evaluado frente al valor que añade el aumento de la precisión. Los límites de confianza nos pueden ayudar en la determinación del programa de pruebas requerido para estimar una característica del producto con una determinada precisión. Supongamos que se desea estimar la vida media de una batería. Se desea que la estimación no difiera en más de 2 horas de la verdadera vida media, cualquiera que sea el valor de esa vida media. Se conoce que la variabilidad está dada por $\sigma = 10,0$. Se desea un nivel de confianza del 95 por ciento en la estimación obtenida. La semiamplitud del intervalo de confianza es 2 horas, por lo que

$$2,0 = \frac{(1,96)(10)}{\sqrt{n}} \quad n = 96$$

Una muestra de 96 baterías nos proporcionaría una media que no distaría más de 2 horas de la vida media verdadera (con un 95 por ciento de confianza). Resumamos el tipo de información que se necesita: (1) la amplitud deseada del intervalo de confianza (que es la precisión deseada en la estimación); (2) el nivel de confianza deseado, y (3) la variabilidad de la característica que se investiga. El número de pruebas que se requiere no se puede determinar hasta que ingeniería no proporcione estas informaciones.

La Tabla 44.23 resume las fórmulas y gráficos útiles en la determinación del tamaño de muestra requerido para estimar un parámetro de la población con una precisión específica. Los siguientes ejemplos ilustran algunas de estas fórmulas.

Ejemplo: Se debe seleccionar una muestra para estimar la longitud media de las piezas de una población. Parece razonable admitir que la longitud de las piezas se distribuye normalmente. No está disponible una estimación de la desviación típica, pero el conocimiento del proceso sugiere que «casi toda» la producción está entre 2,009 y 2,027. En una primera aproximación, la desviación típica se puede estimar por el cociente $(2,027 - 2,009)/6 = 0,003$. Es deseable que la estimación de μ no diste más de 0,001 del verdadero valor de μ y que la estimación se realice con un nivel de confianza del 95 por ciento. Remitiendo al Gráfico S del Apéndice II, se tiene $E/s = 0,001/0,003 = 0,33$, y el tamaño de muestra requerido es alrededor de 37. Es instructivo calcular n para otros valores de E y s (véase la Tabla 44.24). Este *análisis de sensibilidad* nos es útil en la evaluación del costo de pruebas adicionales frente al aumento de precisión obtenido.

Ejemplo: Se desea estimar la desviación típica de una población con un error inferior al 20 por ciento del verdadero valor y con un nivel de confianza del 95 por ciento. Con el Gráfico T del Apéndice II se obtiene que los grados de libertad requeridos son alrededor de 46, por lo que el tamaño de la muestra es $46 + 1 = 47$.

TABLA 44.23 Resumen de tamaños de muestra en fórmulas y gráficos

Parámetros	Fórmulas
1. Media de una población normal (σ conocido)	$n = \frac{K_{\alpha/2}^2 \sigma^2}{E^2}$ donde K = coeficiente de la distribución normal E = máximo error permitido en la estimación (precisión deseada)
2. Media de una población normal (σ estimado)	Véase Apéndice II, Gráfico S
3. Desviación típica de una población normal	Véase Apéndice II, Gráfico T
4. Proporción defectuosa en una población	$n = p(1-p) \left(\frac{K_{\alpha/2}}{E} \right)^2$ donde p = estimación de la proporción defectuosa de una población. Si no hay disponible estimación de p, se asume el «peor caso» de $p = 0,5$

Intervalos de predicción. Se utiliza predicción de intervalos cuando lo que se desea no es una estimación de una característica de la población, sino la predicción del intervalo en el que encontraremos el valor estudiado al realizar una extracción de un nuevo elemento de la población en un futuro. Así, en el ejemplo, de las 61 piezas de latón con una dureza media de 54,62 y una desviación típica de 5,34, se encontró que los límites de confianza de la media al 95 por ciento eran

$$\bar{X} + t \sqrt{\frac{s}{n}} = 53,25 \text{ y } 55,99$$

Ahora nos preguntamos: ¿Qué límites nos proporcionará una seguridad del 95 por ciento de que entre ellos estará la dureza del próximo elemento extraído aleatoriamente de la población? El intervalo apropiado aquí es

$$\begin{aligned} \bar{X} + ts \sqrt{1 + \frac{1}{n}} &= 54,62 \pm (2,00)(5,34)(1,0082) \\ &= 43,85 \text{ y } 65,39 \end{aligned}$$

Para más consideraciones y tablas, véase Hahn (1970a, 1970b).

TABLA 44.24 Valores de n en función de E y s

Máximo error de E	Desviación típica s		
	0,002	0,003	0,004
0,0008	27	56	98
0,0010	18	37	64
0,0020	7	12	18

Intervalos de tolerancia. Los *límites de tolerancia estadística* son similares a la *capacidad de proceso*; es decir, nos muestran los límites prácticos de la variabilidad del proceso (véase el Capítulo 22, «Operaciones») y por tanto aportan una contribución valiosa en la determinación de los límites de tolerancia en ingeniería (que especifican los límites permitidos para la aceptación del producto). Los métodos para el cálculo de los límites de tolerancia estadística son de dos tipos: los que asumen una distribución normal y los que no requieren que se asuma nada respecto al tipo de distribución. La Tabla 44.25 resume estos métodos.

La Tabla 44.26 muestra los datos que se utilizarán para ilustrar estos métodos. Cinco muestras de cuatro elementos cada una se han cogido registrando una dimensión exterior de un cátodo. Se han elegido un nivel de confianza del 95 por ciento y un porcentaje de población del 99 por ciento.

Utilizando el método 1 y la desviación típica s , los límites de tolerancia estadística son

$$\bar{X} \pm ks = 1,00287 \pm 3,615(0,00034) = 1,00164 \text{ y } 1,00410$$

Utilizando el método 2 y el recorrido R de todos los datos (20 datos en este ejemplo)) los límites son

$$\bar{X} \pm K_1 \bar{R} = 1,00287 \pm 1,005(0,00134) = 1,00152 \text{ y } 1,00422$$

Utilizando el método 3 y la media de los recorridos R de cada muestra se obtienen los límites

$$\bar{X} \pm K_2 \bar{R} = 1,00287 \pm 1,783(0,00078) = 1,00148 \text{ y } 1,00426$$

Estos métodos asumen que la característica estudiada está normalmente distribuida. El método 4 está «libre de hipótesis respecto a la distribución» y sólo presupone que la distribución es continua y que los elementos de la muestra se han obtenido aleatoriamente (hipótesis que se supone en todos los métodos). Los límites de tolerancia estadística en este método son simplemente las observaciones extremas de todos los datos de todas las muestras, es decir, 1,00231 y 1,00365. La Tabla W del Apéndice II indica que al menos el 78,4 por ciento de la población estará entre esos límites. (Obsérvese que la Tabla X del Apéndice II suministra el tamaño de muestra requerido para que entre sus valores extremos se encuentre el 99 por ciento de la población).

Cuando es razonable asumir que la distribución es normal, se prefiere el método 1, pues suele proporcionar el intervalo de límites más estrecho para el estudio de la variación. Los métodos 2 y 3 son aproximaciones aceptables. Si la normalidad no se puede admitir, entonces el método apropiado es el 4 con el costo de necesitar un tamaño de muestra mayor. En la práctica es aconsejable obtener una parte de la muestra para evaluar la hipótesis de normalidad. Si puede asumirse la hipótesis de normalidad, se utiliza la muestra parcial para determinar los límites de tolerancia estadística. En caso contrario, se deberá coger la muestra completa y aplicar el método «libre de hipótesis respecto a la distribución» (método 4) para determinar dichos límites.

Los intervalos de tolerancia se han desarrollado también para otros casos, como en la distribución exponencial. Ranganathan y Kale (1983) han determinado intervalos robustos ante la presencia de un dato «extraño» (*outlier*, en inglés) en las observaciones. Su Capítulo 5 incluye un ejemplo con datos sobre fiabilidad del sistema de aire acondicionado en un avión a reacción Boeing 727.

En todos los métodos precedentes intervienen dos probabilidades, que son el nivel de confianza γ y la probabilidad P de estar entre los límites. Esto puede ser confuso, pero se necesitan estas dos probabilidades para obtener una conclusión matemáticamente correcta respecto a los límites. Una aproximación utiliza la media de la muestra $\bar{X}$ y la desviación típica s , a las que considera como estimaciones altamente fiables de μ y σ . Si se asume la normalidad, los límites de tolerancia estadística al 99 por ciento son proporcionados por

$$\bar{X} \pm 2,58s$$

donde el valor 2,58 se obtiene de la tabla de la distribución normal (Tabla B del Apéndice II):

$$\begin{aligned}\bar{X} \pm 2,58 &= 1,00287 \pm 2,58 (0,000274) \\ &= 1,00216 \text{ y } 1,00358\end{aligned}$$

TABLA 44.25 Métodos de cálculo de límites estadísticos de tolerancias

Método	Distribución asumida	Fórmula para los límites	Búsqueda de valores del factor
1. Obtener la media $\bar{X}$ y la desviación típica s de una muestra de n elementos	Normal	Límites bilaterales: $\bar{X} \pm ks$ Límites unilaterales: $\bar{X} + ks$ o $\bar{X} - ks$	Apéndice II, Tabla V Apéndice II, Tabla V
2. Obtener la media $\bar{X}$ y el recorrido R de una muestra de n elementos	Normal	Límites bilaterales: $\bar{X} \pm K_1 R$	Apéndice II, Tabla U
3. Obtener la media de las medias $\bar{\bar{X}}$ y el recorrido medio $\bar{R}$ de N muestras de n elementos cada muestra	Normal	Límites bilaterales: $\bar{\bar{X}} \pm K_2 \bar{R}$	Bingham (1962, p. 37)
4. Definir el porcentaje P de población que debe estar incluido entre los límites de tolerancia. Determinar en una muestra de n elementos los valores mayor y menor	Ninguna	Límites bilaterales: La probabilidad de que por lo menos un $P\%$ de la población esté entre los valores extremos es γ Límites unilaterales: La probabilidad de que por lo menos un $P\%$ de la población sea menor que el mayor valor de la muestra (o mayor que el menor valor de la muestra)	Apéndice II, Tabla W Natrella (1963, p. T-76)

TABLA 44.26 Datos de dimensiones de cátodos

Ejemplo 1	Ejemplo 2	Ejemplo 3	Ejemplo 4	Ejemplo 5	
1,00263	1,00306	1,00293	1,00291	1,00310	$\bar{X} = 1,00287$ $s = 0,00034$ (desviación típica de 20 observaciones alrededor de $\bar{X}$)
1,00298	1,00328	1,00343	1,00247	1,00281	
1,00293	1,00274	1,00239	1,00268	1,00256	
1,00285	1,00303	1,00274	1,00365	1,00231	
$\bar{X}$ 1,00285	1,00303	1,00287	1,00293	1,00269	$\bar{R} = 0,00078$
R 0,00035	0,00054	0,00140	0,00118	0,00079	$R = 0,00134$

Estos límites indican que el 99 por ciento de la población está entre 1,00217 y 1,00357. Otra aproximación coloca los límites en $\bar{X} \pm 3s$. En el mejor de los casos, son sólo aproximaciones, dado que $\bar{X}$ y s no son exactamente iguales a μ y σ . Bingham (1962) discute la aproximación $\bar{X} \pm 3s$ (el cálculo de los límites de confianza puede indicar la magnitud del posible error).

Otra aproximación que simplifica las consideraciones de tipo probabilístico utiliza el teorema de la desigualdad de Chebyshev, que vale para cualquier distribución continua. El teorema establece que la probabilidad de obtener un valor que se desvíe de la media μ en más de k desviaciones típicas es menor que $1/k^2$. Para obtener los límites que incluyan el 99 por ciento se resuelve

$$0,01 = \frac{1}{k^2}$$

que da

$$k = 10$$

Los límites al 99 por ciento se calcularán por $\bar{X} \pm 10s$. Estos límites son independientes de cualquier hipótesis respecto a la distribución, y la predicción que establecen es muy sencilla: al menos el 99 por ciento de la población está entre $\bar{X} \pm 10s$. Sin embargo, el multiplicar por 10 es muy conservativo, resultando un intervalo entre esos límites mucho más ancho que por cualquiera de los otros métodos.

Los métodos enumerados en la Tabla 44.25 no dan ninguna previsión del restante $100(1-P)$ por ciento entre la cola superior e inferior de la distribución. Owen y Frawley (1971) dan un procedimiento y tablas para establecer límites que controlen el porcentaje situado fuera de cada uno de los dos límites.

Los límites de tolerancia estadística se confunden a menudo con otros límites utilizados en estadística e ingeniería. La Tabla 44.27 resume la diferencia entre los cinco tipos de límites. Hahn (1970a, 1970b) da una excelente discusión con ejemplos y tablas que ilustran las diferencias entre varios tipos de límites. Véase también Harter (1983), en «Límites de tolerancia».

Límites de tolerancia de dimensiones que interaccionan. Las dimensiones que interaccionan son las que están correlacionadas o se juntan con otras dimensiones para originar un resultado final. El establecimiento de límites de tolerancia de tales dimensiones se discute en los próximos párrafos. El establecimiento de los límites de tolerancia de dimensiones que no interaccionan se realiza con los métodos presentados en este capítulo al considerar los límites de tolerancia estadística.

TABLA 44.27 Distinción entre límites

Nombre de los límites	Significado
Límites de tolerancia	Dados por ingeniería de diseño como los valores máximo y mínimo admisibles para que el producto trabaje correctamente.
Límites de tolerancia estadísticos	Calculados con los datos del proceso para definir la variación del proceso. Contienen una proporción especificada de la población.
Límites de predicción	Calculados con los datos del proceso para definir un intervalo que contendrá k futuras observaciones.
Límites de confianza	Calculados con los datos del proceso para definir un intervalo en cuyo interior está un parámetro de la población.
Límites de control	Calculados con los datos del proceso para definir los límites de variación aleatoria alrededor de algún valor central.

Métodos convencionales que relacionan tolerancias de dimensiones que interaccionan. Consideremos el conjunto mecánico simple considerado en la Figura 44.18. Las longitudes de las componentes A , B y C son dimensiones que interaccionan, ya que determinan la longitud total del conjunto.

El método convencional de expresar la interacción de las dimensiones es la simple adición. Para el ejemplo de la Figura 44.18,

Valor nominal del resultado = valor nominal_A + valor nominal_B + valor nominal_C

Tolerancia T del resultado = $T_A + T_B + T_C$

Valor nominal de la longitud del conjunto = $1,000 + 0,500 + 2,000 = 3,500$

Tolerancia de la longitud del conjunto = $0,0010 + 0,0005 + 0,0020 = \pm 0,0035$

El método supone un 100 por ciento de intercambiabilidad de los componentes que forman el conjunto. Si se han determinado las tolerancias de los componentes, entonces la tolerancia del conjunto vendrá determinada por la adición aritmética.

El método de sumar las tolerancias de las componentes es matemáticamente correcto, pero es muchas veces demasiado conservativo. Supongamos que se espera que alrededor de un 1 por ciento de las piezas de la componente A queden por debajo de su límite inferior de tolerancia, y supongamos lo mismo para las componentes B y C . Si se selecciona al azar un componente A , se tiene, en media, una posibilidad entre 100 de que quede en la cola inferior, y lo mismo para las componentes B y C . El punto clave es este: si las piezas se eligen al azar y si las componentes son fabricadas independientemente, entonces la probabilidad de que el conjunto tenga las tres componentes simultáneamente por debajo del límite inferior de tolerancia es

$$\frac{1}{100} \times \frac{1}{100} \times \frac{1}{100} = \frac{1}{1.000.000}$$

Hay sólo alrededor de una posibilidad entre un millón de que todos los componentes sean demasiado pequeños, originando un conjunto pequeño. Por tanto, el establecimiento de tolerancias del conjunto basadas en la fórmula simple de la adición es conservativa en cuanto que no considera la probabilidad extremadamente baja de que un conjunto contenga todas sus componentes de longitud pequeña (o todas grandes).

Métodos estadísticos para relacionar tolerancias en dimensiones que interaccionan. Este método establece para el ejemplo de la Figura 44.18:

Valor nominal del resultado = valor nominal_A + valor nominal_B + valor nominal_C

Tolerancia T del resultado = $\sqrt{T_A^2 + T_B^2 + T_C^2}$

Entonces:

Valor nominal de la longitud del conjunto = $1,000 + 0,500 + 2,000 = 3,500$

Tolerancia del conjunto = $\sqrt{(0,001)^2 + (0,0005)^2 + (0,002)^2} = \pm 0,0023$

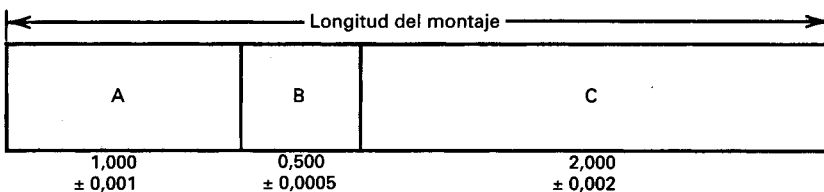


FIGURA 44.18 Montaje mecánico.

TABLA 44.28 Comparación de los métodos estadísticos y convencionales

Componente	Estadístico		Convencional
	Alternativa 1	Alternativa 2	
A	$\pm 0,002$	$\pm 0,001$	$\pm 0,0010$
B	$\pm 0,002$	$\pm 0,001$	$\pm 0,0005$
C	$\pm 0,002$	$\pm 0,003$	$\pm 0,0020$

Prácticamente todos (pero no el 100 por ciento) de los conjuntos estarían entre $3,5000 \pm 0,0023$. Esto da un intervalo más estrecho que $3,5000 \pm 0,0035$ (el resultado del método aritmético).

En la práctica, el problema se plantea al revés, es decir, dando el resultado final (esto es, especificaciones para la longitud del conjunto) y teniendo que deducir las tolerancias de las componentes. Supongamos que la tolerancia deseada del conjunto sea $\pm 0,0035$. En la Tabla 44.28 se dan dos conjuntos posibles de tolerancias de las componentes que al utilizar la fórmula cuadrática proporcionan una tolerancia del conjunto igual a $\pm 0,0035$. También muestra las tolerancias de las componentes utilizando la fórmula convencional.

La ventaja de la fórmula cuadrática es permitir mayores tolerancias en las componentes. Con la alternativa 1, se duplica la tolerancia de la componente A, se cuatuplica la tolerancia de la componente B y la tolerancia de la componente C permanece la misma que la de la componente original cuando se utilizó el método aditivo. Si se elige la alternativa 2, se obtienen significativos incrementos en las tolerancias de las componentes similares a los de la alternativa 1. Esta fórmula, pues, admite mayores tolerancias en las componentes sin cambios en el proceso de producción y sin alterar la tolerancia del conjunto. Obsérvese que la *mayor tolerancia individual* es la que tiene el mayor efecto en la tolerancia total del conjunto.

La principal desventaja de la fórmula cuadrática es que presupone ciertas hipótesis, que incluso aunque se verifiquen, se obtendrá un pequeño porcentaje (teóricamente alrededor del 0,27 por ciento) de conjuntos mecánicos que no cumplirán los límites dados por la fórmula. Las hipótesis son:

1. Las dimensiones de las componentes son independientes y la elección de las componentes que constituyen cada conjunto es aleatoria.
2. La dimensión de cada componente sigue la distribución normal. Alguna desviación de esta hipótesis es admisible.
3. La media de cada componente debe ser igual al valor nominal establecido en la especificación. Para el conjunto del ejemplo, los valores medios de las dimensiones de las componentes A, B y C deben ser 1,000, 0,500 y 2,000, respectivamente. De otra forma, no se obtendría el valor nominal de 3,500 para el conjunto, y los límites de tolerancia centrados alrededor de 3,500 no serían realistas. Por tanto, es muy importante controlar el valor *medio* cuando las dimensiones interaccionan. Esto significa que se necesitan las técnicas de control cuando se utilizan medidas de variables mucho más que cuando se utilizan mediciones del tipo «pasa o no pasa».

Un resumen de los dos métodos de obtención de tolerancias se da en la Tabla 44.29.

La fórmula de la tolerancia estadística se aplica tanto a conjuntos compuestos de componentes separados como a varias dimensiones que interaccionan dentro de un sistema físico. Además, el resultado de dimensiones que interaccionan puede ser una dimensión externa (la longitud de un conjunto) o un resultado interno (la separación entre un eje y el orificio de su alojamiento).

TABLA 44.29 Comparación de las tolerancias estadísticas y convencionales

Factor	Convencional	Estadística
Riesgo de no poder intercambiar elementos	Ningún riesgo; los elementos se pueden intercambiar 100 %.	Pequeño porcentaje de resultados finales fuera de los límites (pueden corregirse con montaje selectivo).
Utilización del intervalo de tolerancia completo	Método conservativo; las tolerancias en las dimensiones que interaccionan son menores de lo necesario.	Permite mayores tolerancias en las dimensiones que interaccionan.
Técnicas especiales de control de procesos	Ninguna.	La media de cada una de las dimensiones que interaccionan debe ser controlada por mediciones variables.
Hipótesis estadísticas	Ninguna.	Las dimensiones que interaccionan deben ser independientes y cada una debe estar normalmente distribuida.
Tamaño del lote	Cualquier tamaño.	El tamaño del lote debe ser moderadamente grande (para asegurar un efecto de equilibrio entre las dimensiones extremas que interaccionan).

Más aplicaciones de la tolerancia estadística. Es fácil engañarse concluyendo que el método de tolerancias estadísticas no es más que un cambio de la expresión de tolerancias en forma de límites en cada componente a otra expresión que da:

1. Los límites superior e inferior de la media $\bar{X}$ del conjunto de componentes.
2. Un límite superior de la dispersión del conjunto de componentes.

El cambio es mucho más profundo que una variación simple en la forma de especificación. Afecta al ciclo productivo completo (planificación, producción, inspección, control de calidad, servicios, etc. Es, efectivamente, *una nueva filosofía del ciclo productivo*.

El primer ejemplo publicado de una *aplicación a gran escala* de las tolerancias estadísticas parece ser el del sistema coaxial L-3 (un sistema de transmisión de banda ancha para teléfonos múltiples o canales de televisión). Dodge et al. (1953) discuten la aplicación.

El plan general fue:

1. Averiguar las características clave de calidad para cada componente del sistema.
2. Determinar la precisión del proceso de medición para poder separar la variabilidad del proceso de medida de la variabilidad del proceso y del producto.
3. Recoger datos de la capacidad del proceso para las características clave para ayudar a establecer unas tolerancias realistas.

Lo anterior fue el paso previo a:

4. Establecimiento de tolerancias para las características clave de calidad en la forma dual de un máximo para la desviación típica σ y límites para la media $\bar{X}$. Los límites para la X se establecen en $\pm 1/3 \sigma$ alrededor del nominal.
5. Establecer procedimientos de control.

Se reconoció que los límites de σ y de $\bar{X}$ requerían una explicación adicional si el objetivo en diseño debía ser ejecutado en producción. Con esta finalidad, se establecieron tres formas de aceptación de producto:

1. *Gráficos de control.* Los gráficos de control de Shewhart para $\bar{X}$ y σ pueden ser utilizados para la aceptación de producto, siempre que se establezca la regla de aceptación (siete subgrupos consecutivos de cinco piezas cada uno, todos con su $\bar{X}$ y σ dentro de los límites de control) y con tal de que los posteriores controles estadísticos se mantengan (basados en los resultados de los gráficos de control, además de la ausencia de cambios importantes en el proceso).
2. *Control de partidas.* Está basado en el examen mediante medición de variables de una muestra de (normalmente) 50 piezas, con los límites de $\bar{X}$ y σ correspondientes a una muestra de 50 elementos. Cada partida se acepta o se rechaza por sus propias mediciones.
3. *Clasificación al pormenor.* El producto que no consigue la cualificación bajo los controles 1 o 2 se mide al por menor. Las unidades que resultan conformes se clasifican en una de las tres clases de variables. El embalaje se hace seleccionando las unidades de tal manera que cada paquete contiene una variedad de producto que se atiene a la intención del diseño tanto para $\bar{X}$ como para σ .

Grant y Leavenworth (1980) analizaron tolerancias estadísticas, incluyendo una aplicación a ejes y orificios. La compañía Western Electric (1982), en su *Statistical Quality Control Handbook* (pp. 122-127), presenta ejemplos y discute las hipótesis. Peters (1970) discute las tolerancias estadísticas, incluyendo un método para reconocer diferencias de costos entre componentes. Choksi (1971) discute el uso de la simulación para determinar el óptimo de las tolerancias.

El concepto se puede aplicar a varias variables que interaccionan por una relación de ingeniería. No es necesario que la naturaleza de la relación sea aditiva (ejemplo del conjunto) o sustractiva (ejemplo del eje y el orificio). La fórmula se puede adaptar para predecir la variación de los resultados que son el producto y/o la división de varias variables. Mouradian (1966) discute estas aplicaciones.

Estimación bayesiana. La estimación bayesiana se puede utilizar cuando el parámetro que debe ser estimado se puede considerar como una variable aleatoria de la que conocemos su distribución. Por ejemplo, en la inspección por muestreo, la proporción p de defectos en un lote puede ser una variable aleatoria a la que se le puede ajustar una distribución por nuestro muestreo de inspección a lo largo del tiempo. Si eso es así, entonces en el futuro se puede utilizar esta información para suministrar el control de la calidad con menos muestreo (véanse Lenz y Rendtel 1984).

Cuando no es posible acumular información respecto a un proceso estable, algunos han propuesto la utilización de nuestros «sentimientos» respecto al parámetro para elegir una distribución estadística para él y entonces proceder como si el parámetro fuese una variable aleatoria con esa distribución. Esto ha sido llamado la *aproximación probabilística personal*, y los que la utilizan se llaman *bayesianos*. Algunos de los que proponen esta aproximación dicen que es el único método que una persona sensible debería utilizar, lo que ha sido causa de agrios debates y malos deseos. Mientras que una persona en una posición directiva lo puede encontrar como una manera razonable de expresar cuantitativamente sus ideas, mi punto de vista es que en muchos casos esto será un camino no científico de incorporar prejuicios en el proceso de decisión, del que puede resultar cuantiosos costos. Esta aproximación tiene utilidad en la teoría general de decisión estadística (véase el Capítulo 12 de Dudewicz 1976), pero allí es utilizada para generar un conjunto de reglas de decisión que contienen buenas reglas, y no únicamente una regla basada en «sentimientos» propios. La aproximación bayesiana debe ser considerada cuando la información puede ser almacenada en el tiempo en un proceso estable.

Intervalos con amplitud y precisión fijada. Normalmente, los intervalos considerados hasta ahora o tienen amplitud aleatoria (por ejemplo, las partes 7 y 8 de la Tabla 44.22) o exigen que se conozcan tales parámetros como varianzas (por ejemplo, la parte 6 de la Tabla 44.22). Si se pueden tomar observaciones en dos etapas, entonces se pueden controlar tanto la amplitud como la confianza. Vamos a ilustrarlo para dos medias normales cuando no se conocen las varianzas (y no conocemos si son iguales). Aquí podemos proceder en dos etapas como sigue:

- Obtener una muestra de n_0 observaciones para cada una de las $k = 2$ poblaciones (es deseable que n_0 sea como mínimo 10).
- Determinar el tamaño total de la muestra para la población i como

$$n_i = \max [n_0 + 1, (ws_i)^2] \quad \text{con } w = h_{n_0} (2, (1 + P^*)2)/d$$

donde h es dado por la Tabla 44.30; d es la deseada semiamplitud; $k = 2$ poblaciones, y P^* es la confianza deseada.

Tomar $n_1 - n_0$ más observaciones de la población 1 y $n_2 - n_0$ más observaciones de la población 2.

Calcular las medias de las muestras $\bar{X}_1$ de las n_1 observaciones, y $\bar{X}_2$ de las n_2 observaciones y el intervalo es $\bar{X}_1 - \bar{X}_2 \pm d$ (es decir, tenemos un 100 P^* por ciento de seguridad de que la diferencia de las medias de las poblaciones dista menos de d unidades de la diferencia de las medias de las muestras). Para un ejemplo de los cálculos requeridos, véase más adelante el Ejemplo de la selección del mejor.

TESTS DE HIPÓTESIS ESTADÍSTICAS

Una *hipótesis estadística* es una afirmación sobre una población, con frecuencia sobre un parámetro de la población. Los *tests de hipótesis* (también llamados *tests de significación*) se diseñaron para que los experimentadores no buscasen causas para explicar variabilidad en datos que realmente se debiese a variabilidad aleatoria (y este tipo de variabilidad no necesita ninguna causa para explicarla). Los tests de hipótesis estadísticas son una versión actual del agudo principio medieval de Occam de que «no se deben multiplicar causas sin razón justificada» (William de Occam fue un filósofo franciscano inglés que murió alrededor de 1349). Por ejemplo, si un proceso tiene un peso medio de 14,90 libras por unidad producida, se hace un cambio para incrementar el peso medio por artículo producido, y después de hacer el cambio se coge una muestra de diez artículos, cuyo peso medio es de 15,10 libras, esto no significa que el peso medio de los artículos del proceso haya aumentado: podría ocurrir que hubiese permanecido constante (o incluso que hubiese descendido) y que lo que estamos observando es debido a la variabilidad aleatoria del proceso. Hacer correctas inferencias frente a tales posibilidades es la esencia del test de hipótesis.

Conceptos básicos, tipos de errores. El término *hipótesis* se utiliza aquí como una afirmación hecha sobre la población. Normalmente se trata de afirmaciones relativas a algún valor numérico de algún parámetro de la población. Por ejemplo, una hipótesis puede establecer que la vida media de una población de baterías es 30,0, lo que se escribe como $H: \mu_0 = 30,0$. Esta afirmación puede o no ser correcta. Un *test de hipótesis* es un test de validez de la afirmación que se realiza con el análisis de una muestra de datos.

Hay dos razones por las que se deben evaluar cuidadosamente los resultados de una muestra. En primer lugar, porque hay muchas otras muestras que por el simple azar podrían haber sido extraídas de la población. En segundo lugar, debido a que los resultados de la muestra seleccionada pueden ser compatibles con diferentes hipótesis. Estos puntos nos llevan al reconocimiento de dos tipos de error que se pueden cometer al evaluar una hipótesis:

TABLA 44.30 Coeficientes $h = h_{n_0}(k, P^*)$ para la resolución de los tests en dos etapas, intervalos de confianza y obtención del mejor*

k	P*	n ₀												
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30
2	0,75	2,00	1,37	1,21	1,14	1,10	1,07	1,05	1,04	1,03	1,00	0,99	0,98	0,98
	0,80	2,75	1,76	1,54	1,44	1,38	1,35	1,32	1,30	1,29	1,25	1,24	1,23	1,22
	0,85	3,93	2,27	1,94	1,80	1,72	1,68	1,64	1,62	1,60	1,55	1,53	1,51	1,51
	0,90	6,16	3,04	2,50	2,29	2,18	2,11	2,06	2,02	2,00	1,93	1,90	1,88	1,87
	0,95	12,63	4,57	3,50	3,11	2,91	2,79	2,71	2,66	2,61	2,50	2,45	2,42	2,41
	0,975	25,42	6,54	4,59	3,94	3,63	3,45	3,33	3,24	3,18	3,02	2,95	2,91	2,88
	0,99	63,7	10,28	6,31	5,14	4,60	4,30	4,11	3,98	3,89	3,64	3,54	3,48	3,45
3	0,75	3,52	2,15	1,86	1,74	1,67	1,63	1,60	1,57	1,56	1,51	1,49	1,48	1,47
	0,80	4,59	2,59	2,20	2,04	1,95	1,89	1,85	1,83	1,80	1,75	1,72	1,71	1,70
	0,85	6,31	3,17	2,62	2,40	2,28	2,21	2,16	2,13	2,10	2,03	1,99	1,98	1,96
	0,90	9,64	4,05	3,22	2,90	2,73	2,63	2,57	2,52	2,48	2,39	2,34	2,32	2,30
	0,95	19,40	5,86	4,29	3,75	3,48	3,32	3,21	3,14	3,08	2,94	2,87	2,84	2,81
	0,975	38,7	8,25	5,50	4,63	4,22	3,98	3,82	3,72	3,64	3,43	3,35	3,30	3,27
	0,99	96,2	12,83	7,44	5,91	5,23	4,86	4,62	4,46	4,34	4,04	3,92	3,85	3,81
4	0,75	4,77	2,66	2,25	2,08	1,99	1,93	1,89	1,86	1,84	1,78	1,75	1,74	1,73
	0,80	6,16	3,13	2,59	2,38	2,26	2,19	2,14	2,11	2,08	2,01	1,98	1,96	1,95
	0,85	8,41	3,77	3,03	2,75	2,60	2,51	2,45	2,41	2,37	2,28	2,24	2,22	2,21
	0,90	12,80	4,75	3,66	3,26	3,06	2,93	2,85	2,80	2,75	2,63	2,58	2,55	2,54
	0,95	25,76	6,80	4,80	4,14	3,81	3,62	3,50	3,41	3,34	3,17	3,10	3,06	3,03
	0,975	51,4	9,53	6,10	5,05	4,57	4,29	4,11	3,99	3,90	3,67	3,57	3,51	3,48
	0,99	128	14,79	8,21	6,40	5,62	5,19	4,92	4,74	4,60	4,27	4,13	4,05	4,01
5	0,75	5,95	3,05	2,53	2,32	2,21	2,14	2,09	2,06	2,03	1,96	1,93	1,91	1,90
	0,80	7,65	3,56	2,89	2,63	2,49	2,40	2,35	2,30	2,27	2,19	2,15	2,13	2,12
	0,85	10,43	4,25	3,34	3,00	2,83	2,72	2,65	2,60	2,56	2,46	2,41	2,39	2,37
	0,90	15,90	5,32	4,00	3,53	3,29	3,15	3,05	2,99	2,94	2,81	2,75	2,72	2,69
	0,95	32,04	7,58	5,20	4,42	4,05	3,84	3,70	3,60	3,53	3,34	3,26	3,21	3,18
	0,975	64,1	10,61	6,58	5,37	4,83	4,52	4,32	4,18	4,08	3,83	3,72	3,66	3,62
	0,99	160	16,47	8,82	6,78	5,90	5,43	5,13	4,93	4,79	4,43	4,28	4,20	4,14
6	0,75	7,10	3,39	2,76	2,52	2,38	2,30	2,25	2,21	2,18	2,10	2,06	2,04	2,03
	0,80	9,12	3,93	3,13	2,82	2,66	2,57	2,50	2,45	2,42	2,32	2,28	2,26	2,24
	0,85	12,43	4,66	3,60	3,21	3,01	2,89	2,81	2,75	2,70	2,59	2,54	2,51	2,49
	0,90	18,96	5,82	4,28	3,74	3,47	3,31	3,21	3,13	3,08	2,93	2,87	2,84	2,81
	0,95	38,29	8,26	5,53	4,66	4,25	4,01	3,86	3,75	3,67	3,46	3,38	3,33	3,30
	0,975	76,7	11,56	6,97	5,64	5,03	4,69	4,48	4,33	4,22	3,95	3,83	3,77	3,73
	0,99	192	17,97	9,34	7,09	6,13	5,62	5,30	5,09	4,93	4,55	4,39	4,30	4,25
7	0,75	8,23	3,68	2,96	2,67	2,53	2,44	2,37	2,33	2,30	2,21	2,17	2,14	2,13
	0,80	10,58	4,25	3,33	2,99	2,81	2,70	2,63	2,58	2,54	2,43	2,38	2,36	2,34
	0,85	14,42	5,03	3,81	3,37	3,15	3,02	2,93	2,87	2,82	2,70	2,64	2,61	2,59
	0,90	22,01	6,27	4,51	3,92	3,62	3,45	3,33	3,25	3,19	3,04	2,97	2,93	2,91
	0,95	44,53	8,88	5,81	4,85	4,41	4,15	3,98	3,87	3,79	3,57	3,47	3,42	3,39
	0,975	89,3	12,43	7,32	5,86	5,20	4,84	4,61	4,45	4,34	4,05	3,93	3,86	3,82
	0,99	2,23	19,34	9,79	7,35	6,32	5,78	5,44	5,21	5,05	4,64	4,48	4,39	4,33
8	0,75	9,36	3,95	3,13	2,81	2,65	2,55	2,48	2,43	2,40	2,30	2,25	2,23	2,21
	0,80	12,02	4,55	3,51	3,13	2,93	2,81	2,73	2,68	2,63	2,52	2,47	2,44	2,42
	0,85	16,40	5,37	4,01	3,52	3,28	3,13	3,04	2,97	2,92	2,78	2,72	2,69	2,67
	0,90	25,05	6,68	4,72	4,07	3,75	3,56	3,44	3,35	3,29	3,12	3,05	3,01	2,98
	0,95	50,76	9,45	6,06	5,03	4,54	4,27	4,09	3,97	3,88	3,65	3,55	3,50	3,46
	0,975	101,9	13,24	7,63	6,05	5,35	4,97	4,72	4,56	4,44	4,13	4,00	3,93	3,89
	0,99	2,56	20,62	10,20	7,58	6,49	5,91	5,56	5,32	5,15	4,73	4,55	4,46	4,40
9	0,75	10,49	4,20	3,28	2,93	2,75	2,64	2,57	2,52	2,48	2,37	2,33	2,30	2,28
	0,80	13,47	4,82	3,67	3,25	3,04	2,91	2,82	2,76	2,72	2,60	2,54	2,51	2,49
	0,85	18,37	5,68	4,18	3,65	3,39	3,23	3,13	3,06	3,00	2,86	2,80	2,76	2,74
	0,90	28,08	7,06	4,91	4,21	3,86	3,66	3,53	3,44	3,37	3,20	3,12	3,08	3,05
	0,95	57,0	9,99	6,29	5,18	4,66	4,37	4,19	4,06	3,96	3,72	3,62	3,56	3,53
	0,975	114,5	13,99	7,91	6,22	5,48	5,08	4,82	4,65	4,52	4,20	4,07	4,00	3,95
	0,99	287	21,8	10,58	7,79	6,64	6,03	5,66	5,41	5,23	4,80	4,62	4,53	4,46

k	P^*	n_0												
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30
10	0,75	11,60	4,43	3,42	3,04	2,85	2,73	2,65	2,60	2,55	2,44	2,39	2,36	2,35
	0,80	14,90	5,08	3,82	3,36	3,13	3,00	2,90	2,84	2,79	2,66	2,60	2,57	2,55
	0,85	20,34	5,98	4,33	3,77	3,48	3,32	3,21	3,13	3,08	2,92	2,86	2,82	2,80
	0,90	31,12	7,41	5,09	4,33	3,96	3,75	3,62	3,52	3,45	3,26	3,18	3,14	3,11
	0,95	63,2	10,49	6,50	5,32	4,77	4,47	4,27	4,14	4,04	3,79	3,68	3,62	3,58
	0,975	127,1	14,70	8,17	6,38	5,60	5,17	4,91	4,73	4,60	4,26	4,13	4,05	4,01
	0,99	318	22,9	10,92	7,98	6,77	6,14	5,75	5,49	5,31	4,86	4,68	4,58	4,51
11	0,75	12,72	4,64	3,54	3,14	2,93	2,81	2,72	2,66	2,62	2,50	2,45	2,42	2,40
	0,80	16,34	5,32	3,95	3,46	3,22	3,07	2,98	2,91	2,86	2,72	2,66	2,63	2,61
	0,85	22,31	6,25	4,48	3,87	3,57	3,40	3,28	3,20	3,14	2,98	2,91	2,87	2,85
	0,90	34,15	7,75	5,25	4,44	4,06	3,83	3,69	3,59	3,51	3,32	3,24	3,19	3,16
	0,95	69,4	10,97	6,70	5,44	4,87	4,55	4,35	4,21	4,10	3,84	3,73	3,67	3,63
	0,975	139,7	15,38	8,41	6,52	5,71	5,26	4,99	4,80	4,66	4,32	4,18	4,10	4,05
	0,99	350	24,0	11,25	8,16	6,90	6,24	5,84	5,57	5,38	4,91	4,73	4,62	4,56
12	0,75	13,84	4,85	3,66	3,23	3,01	2,88	2,79	2,73	2,68	2,55	2,50	2,47	2,45
	0,80	17,77	5,54	4,07	3,56	3,30	3,14	3,04	2,97	2,92	2,77	2,71	2,68	2,66
	0,85	24,27	6,52	4,61	3,97	3,65	3,47	3,35	3,26	3,20	3,03	2,96	2,92	2,90
	0,90	37,17	8,07	5,40	4,54	4,14	3,91	3,76	3,65	3,57	3,37	3,28	3,24	3,21
	0,95	75,6	11,42	6,88	5,56	4,96	4,63	4,42	4,27	4,16	3,89	3,78	3,72	3,68
	0,975	152,3	16,02	8,63	6,66	5,08	5,34	5,06	4,86	4,72	4,37	4,23	4,15	4,10
	0,99	382	25,0	11,55	8,32	7,01	6,32	5,91	5,64	5,44	4,96	4,77	4,67	4,60
13	0,75	14,95	5,04	3,77	3,31	3,08	2,94	2,85	2,78	2,73	2,60	2,54	2,51	2,49
	0,80	19,21	5,76	4,19	3,64	3,37	3,21	3,10	3,03	2,97	2,82	2,76	2,72	2,70
	0,85	26,24	6,77	4,74	4,06	4,73	3,53	3,41	3,32	3,25	3,08	3,01	2,97	2,94
	0,90	40,20	8,38	5,54	4,64	4,22	3,97	3,82	3,71	3,63	3,42	3,33	3,28	3,25
	0,95	81,8	11,86	7,05	5,67	5,05	4,70	4,48	4,33	4,22	3,94	3,82	3,76	3,72
	0,975	164,8	16,64	8,85	6,78	5,90	5,42	5,12	4,92	4,78	4,42	4,27	4,19	4,14
	0,99	413	26,0	11,84	8,47	7,11	6,41	5,98	5,70	5,50	5,01	4,81	4,71	4,64
14	0,75	16,06	5,23	3,87	3,39	3,15	3,00	2,90	2,83	2,78	2,65	2,59	2,55	2,53
	0,80	20,64	5,97	4,30	3,72	3,44	3,27	3,16	3,08	3,02	2,86	2,80	2,76	2,74
	0,85	28,20	7,01	4,86	4,14	3,80	3,60	3,46	3,37	3,30	3,12	3,05	3,01	2,98
	0,90	43,23	8,67	5,67	4,73	4,29	4,04	3,87	3,76	3,68	3,46	3,37	3,32	3,29
	0,95	88,1	12,27	7,22	5,77	5,12	4,76	4,54	4,38	4,27	3,98	3,86	3,80	3,75
	0,975	177,4	17,24	9,05	6,90	5,98	5,49	5,18	4,98	4,83	4,46	4,31	4,22	4,17
	0,99	445	27,0	12,11	8,61	7,21	6,48	6,05	5,76	5,55	5,05	4,85	4,74	4,68
15	0,75	17,17	5,41	3,97	3,46	3,21	3,05	2,95	2,88	2,83	2,69	2,63	2,59	2,57
	0,80	22,07	6,17	4,40	3,80	3,50	3,32	3,21	3,13	3,07	2,91	2,84	2,80	2,77
	0,85	30,17	7,24	4,97	4,22	3,86	3,65	3,52	3,42	3,35	3,16	3,09	3,01	3,01
	0,90	46,25	8,96	5,80	4,82	4,36	4,09	3,93	3,81	3,72	3,50	3,41	3,35	3,32
	0,95	94,3	12,68	7,37	5,87	5,20	4,83	4,59	4,43	4,32	4,02	3,90	3,83	3,79
	0,975	190,0	17,81	9,24	7,01	6,06	5,55	5,24	5,03	4,88	4,50	4,34	4,26	4,20
	0,99	476	27,9	12,37	8,75	7,30	6,55	6,11	5,81	5,60	5,09	4,88	4,78	4,71
16	0,75	18,28	5,58	4,06	3,53	3,26	3,11	3,00	2,93	2,87	2,72	2,66	2,63	2,60
	0,80	23,50	6,36	4,50	3,87	3,56	3,37	3,26	3,17	3,11	2,94	2,87	2,83	2,81
	0,85	32,13	7,46	5,07	4,29	3,92	3,70	3,56	3,47	3,39	3,20	3,12	3,07	3,05
	0,90	49,28	9,23	5,92	4,90	4,42	4,15	3,97	3,85	3,77	3,54	3,44	3,39	3,35
	0,95	100,5	13,07	7,52	5,96	5,27	4,88	4,64	4,48	4,36	4,06	3,93	3,86	3,82
	0,975	202,6	18,37	9,42	7,11	6,14	5,62	5,29	5,08	4,92	4,53	4,38	4,29	4,24
	0,99	508	28,8	12,62	8,88	7,39	6,62	6,16	5,86	5,65	5,12	4,92	4,81	4,74
17	0,75	19,40	5,74	4,15	3,59	3,32	3,15	3,05	2,97	2,91	2,76	2,69	2,66	2,63
	0,80	24,93	6,55	4,59	3,94	3,61	3,42	3,30	3,21	3,15	2,98	2,90	2,86	2,84
	0,85	34,09	7,68	5,17	4,37	3,98	3,75	3,61	3,51	3,43	3,24	3,15	3,11	3,08
	0,90	52,30	9,50	6,03	4,97	4,48	4,20	4,02	3,90	3,81	3,57	3,47	3,42	3,38
	0,95	106,7	13,45	7,66	6,04	5,33	4,94	4,69	4,52	4,40	4,09	3,96	3,89	3,85
	0,975	215,3	18,90	9,60	7,21	6,21	5,67	5,34	5,12	4,96	4,57	4,41	4,32	4,27
	0,99	542	29,6	12,86	9,00	7,47	6,68	6,22	5,91	5,69	5,16	4,95	4,84	4,76

(Continúa)

TABLA 44.30 Coeficientes $h = h_{n_0}(k, P^*)$ para la resolución de los tests en dos etapas, intervalos de confianza y obtención del mejor* (Continuación)

k	P*	n ₀												
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30
18	0,75	20,51	5,90	4,23	3,66	3,37	3,20	3,09	3,01	2,95	2,79	2,72	2,69	2,66
	0,80	26,36	6,73	4,68	4,00	3,67	3,47	3,34	3,25	3,19	3,01	2,93	2,89	2,87
	0,85	36,05	7,89	5,27	4,43	4,03	3,80	3,65	3,55	3,47	3,27	3,18	3,14	3,10
	0,90	55,3	9,76	6,14	5,04	4,54	4,25	4,06	3,94	3,84	3,60	3,50	3,45	3,41
	0,95	112,9	13,81	7,80	6,13	5,39	4,99	4,73	4,56	4,44	4,12	3,99	3,92	3,87
	0,975	227,7	19,43	9,77	7,31	6,28	5,73	5,39	5,16	5,00	4,60	4,43	4,35	4,29
	0,99	571	30,5	13,09	9,12	7,55	6,74	6,27	5,95	5,73	5,19	4,98	4,86	4,79
19	0,75	21,61	6,06	4,32	3,71	3,42	3,24	3,13	3,04	2,98	2,82	2,75	2,71	2,69
	0,80	27,79	6,91	4,77	4,06	3,72	3,51	3,38	3,29	3,22	3,04	2,96	2,92	2,89
	0,85	38,01	8,09	5,37	4,50	4,08	3,85	3,69	3,59	3,51	3,30	3,21	3,16	3,13
	0,90	58,4	10,01	6,25	5,11	4,59	4,29	4,10	3,97	3,88	3,63	3,53	3,47	3,44
	0,95	119,1	14,17	7,93	6,20	5,45	5,04	4,78	4,60	4,47	4,15	4,02	3,95	3,90
	0,975	240,2	19,94	9,93	7,40	6,34	5,78	5,43	5,20	5,04	4,63	4,46	4,37	4,32
	0,99	604	31,3	13,31	9,23	7,62	6,80	6,31	5,99	5,77	5,22	5,00	4,89	4,81
20	0,75	22,72	6,21	4,39	3,77	3,46	3,28	3,16	3,08	3,02	2,85	2,78	2,74	2,72
	0,80	29,22	7,08	4,85	4,12	3,76	3,56	3,42	3,32	3,26	3,07	2,99	2,95	2,92
	0,85	39,98	8,29	5,46	4,56	4,13	3,89	3,73	3,62	3,54	3,33	3,24	3,19	3,16
	0,90	61,4	10,25	6,35	5,18	4,64	4,34	4,14	4,01	3,91	3,66	3,56	3,50	3,46
	0,95	125,3	14,52	8,05	6,28	5,51	5,08	4,82	4,64	4,51	4,18	4,04	3,97	3,92
	0,975	252,9	20,43	10,09	7,49	6,40	5,83	5,48	5,24	5,07	4,66	4,49	4,40	4,34
	0,99	635	32,1	13,52	9,34	7,69	6,86	6,36	6,03	5,80	5,25	5,03	4,91	4,84
21	0,75	23,83	6,36	4,47	3,82	3,51	3,32	3,20	3,11	3,05	2,88	2,81	2,77	2,74
	0,80	30,65	7,24	4,93	4,17	3,81	3,59	3,45	3,36	3,29	3,10	3,02	2,97	2,94
	0,85	41,94	8,48	5,54	4,62	4,18	3,93	3,77	3,65	3,57	3,35	3,26	3,21	3,18
	0,90	64,4	10,49	6,44	5,24	4,69	4,38	4,18	4,04	3,94	3,69	3,58	3,52	3,48
	0,95	131,5	14,86	8,17	6,35	5,56	5,13	4,86	4,67	4,54	4,21	4,07	3,99	3,95
	0,975	265,7	20,92	10,24	7,57	6,46	5,88	5,52	5,28	5,11	4,68	4,51	4,42	4,36
	0,99	667	32,8	13,72	9,44	7,76	6,91	6,40	6,07	5,84	5,27	5,05	4,93	4,86
22	0,75	24,94	6,50	4,54	3,88	3,55	3,36	3,23	3,15	3,08	2,91	2,83	2,79	2,76
	0,80	32,08	7,40	5,01	4,23	3,85	3,63	3,49	3,39	3,32	3,12	3,04	2,99	2,96
	0,85	43,90	8,67	5,63	4,67	4,22	3,97	3,80	3,69	3,60	3,38	3,29	3,24	3,20
	0,90	67,4	10,72	6,54	5,30	4,74	4,42	4,22	4,08	3,98	3,71	3,60	3,54	3,51
	0,95	137,7	15,19	8,29	6,42	5,61	5,17	4,89	4,71	4,57	4,23	4,09	4,02	3,97
	0,975	278	21,39	10,39	7,65	6,52	5,92	5,56	5,31	5,14	4,71	4,53	4,44	4,38
	0,99	700	33,6	13,93	9,54	7,83	6,96	6,44	6,11	5,87	5,30	5,07	4,95	4,88
23	0,75	26,05	6,64	4,61	3,92	3,59	3,39	3,27	3,18	3,11	2,93	2,85	2,81	2,78
	0,80	33,51	7,56	5,08	4,28	3,89	3,67	3,52	3,42	3,34	3,15	3,06	3,02	2,99
	0,85	45,86	8,85	5,71	4,73	4,27	4,00	3,83	3,72	3,63	3,41	3,31	3,26	3,22
	0,90	70,4	10,95	6,63	5,36	4,78	4,46	4,25	4,11	4,00	3,74	3,63	3,57	3,53
	0,95	143,9	15,51	8,40	6,49	5,66	5,21	4,93	4,74	4,60	4,26	4,11	4,04	3,99
	0,975	291	21,85	10,53	7,73	6,57	5,96	5,59	5,35	5,17	4,73	4,56	4,46	4,40
	0,99	730	34,3	14,12	9,63	7,89	7,01	6,48	6,14	5,90	5,32	5,10	4,97	4,90
24	0,75	27,16	6,78	4,68	3,97	3,63	3,43	3,30	3,20	3,14	2,95	2,88	2,83	2,81
	0,80	34,93	7,72	5,15	4,33	3,93	3,70	3,55	3,45	3,37	3,17	3,08	3,04	3,01
	0,85	47,82	9,03	5,78	4,78	4,31	4,04	3,87	3,75	3,66	3,43	3,33	3,28	3,24
	0,90	73,5	11,17	6,72	5,42	4,82	4,49	4,28	4,14	4,03	3,76	3,65	3,59	3,55
	0,95	150,1	15,83	8,51	6,55	5,71	5,25	4,96	4,77	4,63	4,28	4,14	4,06	4,01
	0,975	303	22,30	10,67	7,80	6,63	6,01	5,63	5,38	5,20	4,76	4,58	4,48	4,42
	0,99	762	35,1	14,31	9,73	7,95	7,05	6,52	6,18	5,93	5,37	5,12	4,29	4,92
25	0,75	28,27	6,91	4,74	4,02	3,67	3,46	3,33	3,23	3,16	2,98	2,90	2,85	2,83
	0,80	36,36	7,87	5,22	4,38	3,97	3,74	3,58	3,48	3,40	3,19	3,11	3,06	3,03
	0,85	49,78	9,21	5,86	4,83	4,35	4,07	3,90	3,77	3,68	3,45	3,35	3,30	3,26
	0,90	76,5	11,38	6,80	5,47	4,87	4,53	4,31	4,17	4,06	3,78	3,67	3,61	3,57
	0,95	156,3	16,14	8,62	6,62	5,75	5,28	4,99	3,80	4,66	4,30	4,16	4,08	4,03
	0,975	316	22,74	10,80	7,88	6,68	6,05	5,66	5,41	5,23	4,78	4,60	4,50	4,44
	0,99	794	35,8	14,49	9,82	8,01	7,10	6,56	6,21	5,96	5,37	5,14	5,01	4,94

* Los datos se han tomado de la Tabla 4 en las pp. 17-23 de «New Tables for Multiple Comparisons with a Control (Unknown Variances)», de E. J. Dudewicz, J. S. Ramberg y H. J. Chen, *Biometrische Zeitschrift*, vol. 17 (1975), pp. 13-26. Reproducida con la autorización de Akademie-Verlag, Berlin.

1. *Rechazar* una hipótesis que es *cierta*. Esto se llama *error de tipo I*; su probabilidad se llama *nivel de significación* y se representa por α .
2. *Aceptar* la hipótesis cuando es *falsa*. Esto se llama *error de tipo II*; su probabilidad se representa habitualmente por β (aunque algunos autores la llaman $1 - \beta$).

Estas probabilidades de error pueden ser controladas a valores convenidos.

El error de tipo I se muestra gráficamente en la Figura 44.19 para la hipótesis $H: \mu_0 = 30,0$. El área entre las líneas verticales representa la *zona de aceptación* para el test de hipótesis: si el resultado de la muestra se sitúa en la región de aceptación, se acepta la hipótesis. En caso contrario, se rechaza. Obsérvese que hay una porción pequeña de la curva que se sitúa fuera de la región de aceptación. Esta porción (α) representa la probabilidad de obtener una muestra cuyo resultado se sitúe fuera de la zona de aceptación, incluso aunque la hipótesis sea correcta.

Supongamos que se ha decidido que el error de tipo I no debe exceder el 5 por ciento. Esta es la probabilidad de rechazar la hipótesis cuando, en realidad, la vida media es 30,0. La región de aceptación se obtiene calculando cuáles son los valores de vida media muestrales que sólo tienen una probabilidad del 5 por ciento de ser excedidos (superior o inferiormente) cuando la verdadera vida media de la población es 30,0. Además, supongamos que se coge una muestra de $n = 4$ medidas y que $\sigma = 10,0$.

Recuérdese que la curva representa una población de medias de muestras, ya que la decisión se va a tomar según el valor de la media de una muestra. Las medias de las muestras varían menos que las medidas individuales, de acuerdo con la relación $\sigma_{\bar{x}} = \sigma/\sqrt{n}$.

Además, la distribución de las medias de las muestras es aproximadamente normal incluso si la distribución de las medidas individuales (de la que provienen las medias) no es normal [véanse Grant y Leavenworth (1972, pp. 69-71)]. Esta aproximación es tanto mejor cuanto mayor es n , pero es una aproximación aceptable incluso para un valor de n tan bajo como 4.

La Tabla B del Apéndice II muestra que las medias de las muestras que distan más de 1,96 desviaciones típicas de 30,0, supuesto que sea la media de la población, son un 2,5 por ciento del total de la población de posibles medias muestrales por cada cola. Entonces, bajo la hipótesis de que $\mu_0 = 30,0$, el 95 por ciento de las medias de las muestras estaría entre los valores $30,0 \pm 1,96\sigma_{\bar{x}}$, por lo que

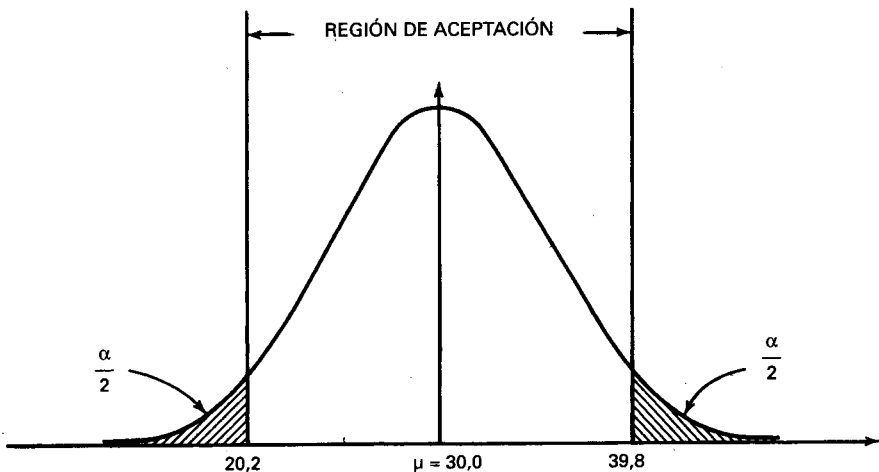


FIGURA 44.19 Región de aceptación para $H: \mu_0 = 30,0$.

$$\text{Límite superior} = 30,0 + 1,96 \frac{10}{\sqrt{4}} = 39,8$$

$$\text{Límite inferior} = 30,0 - 1,96 \frac{10}{\sqrt{4}} = 20,2$$

La zona de aceptación está, pues, definida entre 20,2 y 39,8. Si la media de una muestra aleatoria de cuatro baterías está en el interior de esta zona, se acepta la hipótesis. Si la media se encuentra fuera de la zona de aceptación, se rechaza la hipótesis. Esta regla de decisión provoca un error de tipo I de 0,05.

El error de tipo II o error β , que es la probabilidad de aceptar la hipótesis cuando es falsa, está mostrado en la Figura 44.20 por el área sombreada. Obsérvese que es posible que el resultado de una muestra esté dentro de la zona de aceptación, incluso en el caso de que la media de la población sea diferente de la media establecida en la hipótesis. El valor de β depende del verdadero valor de la media de la población (y también de n , σ y α). Esto es representado por la *curva operativa característica (OC)*.

El problema ahora es construir una curva operativa característica que evalúe la magnitud del error de tipo II (β). Dado que β es la probabilidad de *aceptar* la hipótesis inicial ($\mu_0 = 30,0$) cuando es *falsa*, se debe calcular la probabilidad de que la media de una muestra se sitúe entre 20,2 y 39,8 cuando la verdadera media de la población sea diferente de 30,0. Esto se ha calculado para muchos valores de la verdadera media, y el resultado se muestra en la Figura 44.21. [Esta curva no debe confundirse con la de una distribución normal de medidas. En algunos casos la forma es similar, pero los significados de una curva OC y de una curva de densidad de probabilidades son completamente diferentes; Juran y Gryna (1980, pp. 410-412) dan los cálculos detallados; también Dudewicz (1976, pp. 272-275)]. Por tanto, la curva OC es un gráfico de la probabilidad de aceptación de la hipótesis inicial en función del verdadero valor del parámetro de la población (y de los valores dados de n , σ y α).

Utilización de la curva operativa característica en la selección de la región de aceptación. La región de aceptación se determina dividiendo el 5 por ciento de error α permitido en dos partes iguales (véase Figura 44.19). Esto se llama un *test bilateral o de dos colas*. También se puede colocar el 5 por ciento en la cola derecha o en la cola izquierda de la curva de distribución (Fig. 44.22). Estos test son *unilaterales o de una cola*.

Las curvas operativas características para tests con una zona de aceptación unilateral se pueden construir utilizando el mismo esquema que para las zonas bilaterales. En ambos tipos de tests el error es el mismo, no sucediendo así con el error que varía de unos a otros tipos de tests (véase la Figura 9.2-2 en la p. 275 de Dudewicz 1976).

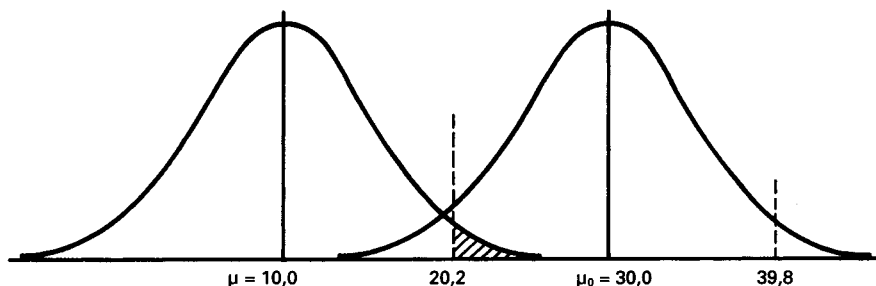


FIGURA 44.20 Error de tipo II o error β .

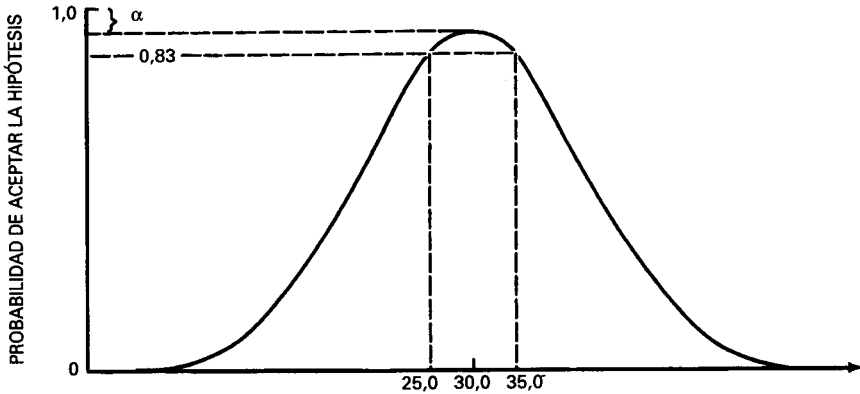


FIGURA 44.21 Curva operativa característica.

En algunos problemas se dispone de información que indica que si la verdadera media de la población no es igual al valor indicado en la hipótesis, entonces está en uno de los lados de la hipótesis, es decir, o bien es mayor o bien es menor. Por ejemplo, un nuevo material de supuesta mayor resistencia media deberá tener una resistencia media mayor o igual que la del material actual. Esta información nos ayudará en la selección de un test unilateral o bilateral para hacer el β tan pequeño como sea posible. Las siguientes directrices están basadas en el análisis de las curvas OC:

Utilizar un test unilateral con todo el riesgo en la cola derecha si (1) se sabe que (si μ_0 no es cierta) la verdadera media es $>\mu_0$, o (2) valores de media de la población $<\mu_0$ son aceptables y sólo estamos interesados en detectar una población con media $>\mu_0$.

Utilizar un test unilateral con todo el riesgo en la cola izquierda si (1) se sabe que (si μ_0 no es cierta) la verdadera media es $<\mu_0$, o (2) valores de media de la población $>\mu_0$ son aceptables y sólo estamos interesados en detectar una población con media $<\mu_0$.

Utilizar un test bilateral si (1) no hay ningún conocimiento a priori de la localización de la verdadera media de la población, o (2) estamos interesados en descubrir la verdadera media de la población $< >$ que la μ_0 establecida en la hipótesis inicial. (Con un test bilateral, la hipótesis se establece a veces como la hipótesis original $H_0: \mu_0 = 30,0$ frente a la hipótesis alternativa $H_1: \mu_0 \neq 30,0$. Con un test unilateral, $H_0: \mu_0 = 30,0$ frente a la $H_1: \mu_1 < 30,0$ si α se sitúa en la cola izquierda, o $H_1: \mu_1 > 30,0$ si α se sitúa en la cola derecha).

Cada test de hipótesis tiene una curva OC. Duncan (1974) y Natrella (1963) son buenas referencias para curvas OC. [Algunas referencias presentan las curvas de «potencia», pero potencia significa simplemente $1 - (\text{la probabilidad de aceptación}) = 1 - \beta$].

Con esta introducción, nuestra discusión procederá ahora a considerar las etapas para hacer el test de una hipótesis.

Test de una hipótesis con tamaño de muestra fijado inicialmente. Lo ideal es definir a priori los errores de tipo I y II y determinar el tamaño de muestra requerido (véase la discusión posterior de Determinación del tamaño de muestra requerido para hacer el test de una hipótesis). Si se fija inicialmente el tamaño de la muestra por limitaciones de costo o de tiempo, entonces se da el error de tipo I deseado y se sigue este procedimiento:

1. Establecer la hipótesis.
2. Elegir el error de tipo I. Los valores habituales son 0,01, 0,05 o 0,10.

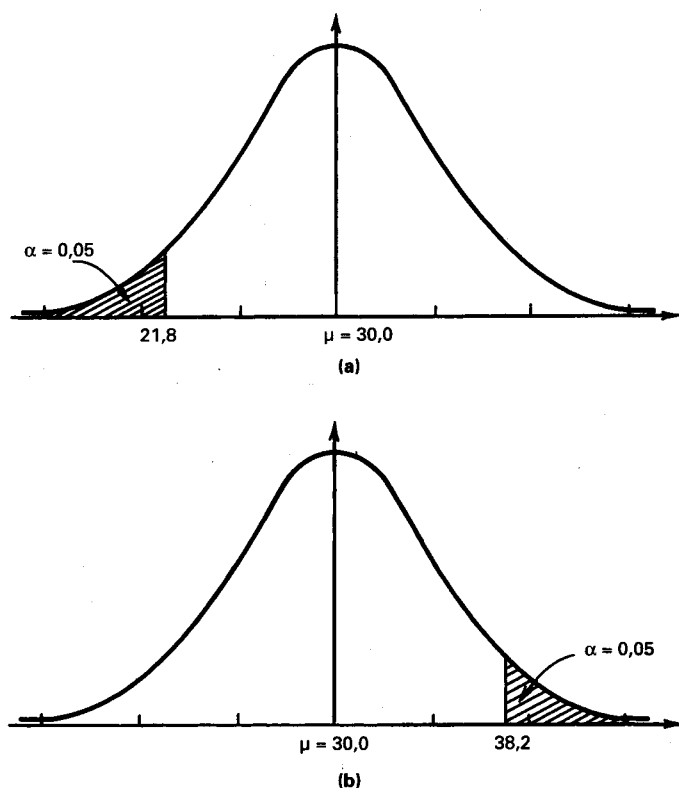


FIGURA 44.22 (a) Error total del 5 por ciento en la cola izquierda.
(b) Error total del 5 por ciento en la cola derecha.

3. Elegir el test estadístico para comprobar la hipótesis.
4. Determinar la región de aceptación para el test, es decir, el intervalo de valores del test estadístico que llevará a aceptar la hipótesis.
5. Obtener la muestra de observaciones, calcular el test estadístico y comparar el valor con la región de aceptación para aceptar o rechazar la hipótesis.
6. Extraer la conclusión de ingeniería.

En el caso de un tamaño de muestra fijo, «aceptar» la hipótesis significa que no hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis. Sin embargo, esto no significa que la hipótesis sea cierta (véase el párrafo anterior de introducción de Test de hipótesis estadísticas y el que se da más adelante de Extracción de conclusiones de tests de hipótesis). Por esta razón, con frecuencia se utiliza la terminología «insuficiente para rechazar» con preferencia a «aceptar».

La Tabla 44.31 resume algunos tests de hipótesis comunes. [Estos tests son citados habitualmente en la literatura y utilizados en la práctica. Muchos de ellos presuponen una distribución normal, Harter y Dubey (1967) definen tests para la media y la varianza suponiendo una distribución de Weibull, que realmente cubre una familia de distribuciones]. El procedimiento es ilustrado a través de los ejemplos siguientes. Más ejemplos y elaboración de procedimientos son dados en Dixon y Massey (1969), Johnson y Leone (1964), Duncan (1974), Dudewicz (1976) y Natrella (1963). La Tabla 44.31 da unas referencias adicionales para ciertos tests. Para tests no paramétricos, véase especialmente Gibbons (1997).

TABLA 44.31 Resumen de la tabla de tests de hipótesis

Test estadístico y su distribución	Hipótesis	Observaciones
Test 1. La media de la población es igual a μ_0 ($H: \mu = \mu_0$)		
(a) $U = \frac{\bar{X} - \mu_0}{\sigma/\sqrt{n}}$ Distribución normal (Apéndice II, Tabla B)	X puede tener cualquier distribución, pero debe ser continua y tener sólo una moda.	La desviación típica de la población es conocida.
(b) $t = \frac{\bar{X} - \mu_0}{s/\sqrt{n}}$ Distribución t con $n - 1$ grados de libertad (Apéndice II, Tabla G)	X tiene la distribución normal.	La desviación típica de la población se estima por la desviación típica s de la muestra.
(c) $\tau_1 = \frac{\bar{X} - \mu_0}{R}$ Distribución τ_1 (Apéndice II, Tabla H)	X tiene la distribución normal.	La dispersión de la población se estima por el rango de la muestra.
(d) r = frecuencia del signo que menos veces se presenta en un test bilateral (o número de signos positivos o negativos en un test unilateral) Distribución r (Apéndice II, Tabla I)	Cualquier distribución continua y simétrica.	Los datos se analizan por los signos de $(X_i - \mu_0)$ (Se trata de un test de signos; véase Gibbons, 1997, p. 112).

(Continúa)

TABLA 44.31 Resumen de la tabla de tests de hipótesis (*Continuación*)

Test estadístico y su distribución	Hipótesis	Observaciones
Test 2. Las medias de dos poblaciones son iguales ($H: \mu_1 = \mu_2$)		
(a) $U = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\sigma_1^2/n_1 + \sigma_2^2/n_2}}$ Distribución normal (Apéndice II, Tabla B)	X_1 y X_2 pueden tener cualquier distribución pero debe ser continua y tener sólo una moda. Si las poblaciones no se distribuyen normalmente, los tamaños n_1 y n_2 de las muestras deben ser grandes para que la distribución de U sea aproximadamente normal.	Las desviaciones típicas de las poblaciones son conocidas.
(b) $t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \sqrt{\frac{[(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2]}{n_1 + n_2 - 2}}}$ Distribución t con $n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad (Apéndice II, Tabla G)	$\sigma_1 = \sigma_2$. X_1 y X_2 tienen la distribución normal.	Las desviaciones típicas de las poblaciones se estiman por las desviaciones típicas s_1 y s_2 de las muestras.
(c) $\tau_d = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{0,5 (R_1 + R_2)}$ Distribución τ_d (Apéndice II, Tabla J)	X_1 y X_2 tienen la distribución normal.	Las dispersiones de las poblaciones se estiman por los rangos de las muestras.
(d) $t' = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{s_1^2/n_1 + s_2^2/n_2}}$ Distribución t con $\min(n_1 - 1, n_2 - 1) =$ grados de libertad (Apéndice II, Tabla G)	X_1 y X_2 tienen la distribución normal.	Las desviaciones típicas de las poblaciones se estiman por las desviaciones típicas s_1 y s_2 de las muestras (no se hace ninguna hipótesis de que $\sigma_1 = \sigma_2$).

$$(e) \quad t = \frac{\bar{d}}{s_d \sqrt{n}}$$

Poblaciones normalmente distribuidas.

Los datos se cogen a n pares, y se calcula la diferencia d entre cada par.Distribución t con grados de libertad = número de pares -1 (Apéndice II, Tabla G)(f) r = frecuencia del signo que menos veces se presenta en un test bilateral (o número de signos positivos o negativos en un test unilateral)Distribución r (Apéndice II, Tabla I) n_1 y n_2 mayores o iguales a 6.
Las poblaciones deben ser continuas y simétricas; las dos observaciones en cada par deben haber sido obtenidas en condiciones similares.Los datos se analizan por los signos de $(X_1 - X_2)$. (Se trata de un test de signos).
Distribución de r (Apéndice II, Tabla I).**Test 3. Dos características de un producto tienen medias poblacionales dadas ($H: \mu_X = \mu_{X_0}$ y $\mu_Y = \mu_{Y_0}$) (Johnson y Leone 1964)**

$$T^2 = \frac{s_Y^2}{s_X^2 s_Y^2 - s_{XY}^2} (X - \mu_{X_0})^2 - \frac{2s_{XY}}{s_X^2 s_Y^2 - s_{XY}^2} \cdot$$

Distribución normal bivalente.

Las desviaciones típicas de las poblaciones se estiman por s_X y s_Y (T^2 se llama la T^2 de Hotelling).

$$(X - \mu_{X_0})(Y - \mu_{Y_0}) + \frac{s^2 x}{s_X^2 s_Y^2 - s_{XY}^2} (Y - \mu_{Y_0})^2$$

$$\text{donde } s_{XY} = \frac{n \Sigma (XY) - \Sigma X \Sigma Y}{n(n-1)}$$

$$\text{donde el valor crítico de } T^2 = \frac{2(n-1)F}{n-2}$$

y donde la distribución F tiene $GL_1 = 2$; $GL_2 = n-2$ (Apéndice II, Tabla K).

(Continúa)

TABLA 44.31 Resumen de la tabla de tests de hipótesis (*Continuación*)

Test estadístico y su distribución	Hipótesis	Observaciones
Test 4. La desviación típica de una población es igual a σ_0 ($H: \sigma = \sigma_0$)		
$\chi^2 = \frac{(n-1)s^2}{\sigma_0^2}$ Distribución chi-cuadrado con $GL = n-1$ (Apéndice II, Tabla L)	La población está normalmente distribuida.	La desviación típica de la población se estima por la de la muestra s .
Test 5. Las desviaciones típicas de dos poblaciones son iguales ($H: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$)		
(a) $F = \frac{s_1^2}{s_2^2}$ Distribución F con $GL_1 = n_1 - 1$ y $GL_2 = n_2 - 1$ (Apéndice II, Tabla L).	Las poblaciones están normalmente distribuidas.	Las desviaciones típicas de las poblaciones se estiman por las de las muestras s_1 y s_2 .
(b) $F' = \frac{R_1}{R_2}$ Distribución F' (Apéndice II, Tabla M)	Cualquier distribución, pero X_1 y X_2 deben ser continuas.	Las dispersiones de las poblaciones se estiman por sus recoridos muestrales.
Test 6. La proporción de una población con cierta característica es p_0 ($H: p = p_0$)		
(a) $U = \frac{X - np_0}{\sqrt{np_0(1-p_0)}}$ Distribución normal (Apéndice II, Tabla B)	$n \geq 100$. Sólo para tamaños de muestra grandes.	La proporción en la población se estima por la proporción en la muestra.
(b) Determinación de límites de confianza (Apéndice II, Tabla N) y observación de si p_0 está entre los límites		La proporción de la población se estima por la proporción de la muestra (útil cuando $n < 100$).
Test 7. Las proporciones en dos poblaciones son iguales ($H: p_1 = p_2$)		
$U = \frac{X_1/n_1 - X_2/n_2}{\sqrt{\hat{p}(1-\hat{p})(1/n_1 + 1/n_2)}} \quad \text{donde } \hat{p} = \frac{X_1 + X_2}{n_1 + n_2}$ Distribución normal (Apéndice II, Tabla B)	$np > 5$ para cada población. Los tamaños de las muestras n_1 y n_2 deben ser grandes para que la distribución muestral de U sea aproximadamente normal.	Las proporciones en la población se estiman por las proporciones en las muestras.

Test 8. La proporción de decisiones correctas en una evaluación sensorial es p_0 ($H: p = p_0$)

(a) $U = \frac{X/n - 0,50}{\sqrt{0,25/n}}$	$p = 0,5, n$ debe ser > 30 .	Identificar cuál de dos muestras es la misma que la muestra de control inicialmente presentada (Es un test «duo-trío»).
Distribución normal (Apéndice II, Tabla B)		
(b) $U = \frac{X/n - 0,33}{\sqrt{0,22/n}}$	$p = 0,33, n$ debe ser > 30 .	Identificar cuál de tres muestras es diferente de las otras dos (Es un test «triangular»).
Distribución normal (Apéndice II, Tabla B)		

Test 9. Las muestras proceden de poblaciones con la misma distribución [$H: F(X_1) = F(X_2)$, donde $F(X)$ es la función de distribución] (Johnson y Leone 1964)

(a) Evaluar la igualdad de medias por T' = suma de rangos en la muestra pequeña Distribución de T' (Apéndice II, Tabla O)	Cualquier distribución; si $n_1 > 8$ y $n_2 > 8$, la distribución del estadístico T' se aproxima a la normal.	Los datos se evalúan ordenando las observaciones combinadas de las dos muestras (1 para la pequeña, 2 para la siguiente pequeña, etc.). Entonces calcular la suma de los rangos en la muestra pequeña. El rechazo de la hipótesis lleva a que las medias son diferentes (Esto es un test de «sumar rangos»).
(b) Evaluar la igualdad de desviaciones típicas por T' = suma de rangos en muestra pequeña Distribución de T' (Apéndice II, Tabla O)	Cualquier distribución; si $n_1 > 8$ y $n_2 > 8$, la distribución del estadístico T' se aproxima mucho a la normal.	Los datos se evalúan ordenando las observaciones combinadas de las dos muestras (1 para la pequeña, 2 para la siguiente pequeña, etc.). Entonces calcular la suma de los rangos en la muestra pequeña. El rechazo de la hipótesis significa que las desviaciones típicas son diferentes (Esto es un test de «sumar rangos»).

(Continúa)

TABLA 44.31 Resumen de la tabla de tests de hipótesis (Continuación)

Test estadístico y su distribución	Hipótesis	Observaciones
Test 10. Las observaciones en la muestra se han extraído aleatoriamente de una misma población (Bennett y Franklin 1954; Dixon y Massey 1969)		
(a) u = número de rachas Distribución de rachas (Apéndice II, Tabla P)	$n_1 \geq 10, n_2 \geq 10.$	Los datos se evalúan por el número de rachas encima o debajo de la media (Es un test de «rachas»).
(b) $M = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (X_{i+1} - \bar{X})^2}{\sum (X_i - \bar{X})^2}$ $U = \frac{1 - M/2}{\sqrt{(n-2) / [(n-1)(n+1)]}}$	1. $n \geq 4$ 2. Población normal.	Los datos se evalúan por las diferencias entre sucesivas observaciones ($X_{i+1} - X_i$) (Es el test M del «cuadrado medio de las diferencias sucesivas»).
Distribución normal (Apéndice II, Tabla B)		
Test 11. Una observación pertenece a la misma población que las demás observaciones en la muestra (Dixon y Massey 1969; Grubbs 1969)		
Se deben evaluar X_1 y X_2 si no son desechables las observaciones extremas en cada dirección	X se distribuye normalmente. La media de la población y la desviación típicas son desconocidas.	La evaluación de los datos se hace ordenándolos por orden de magnitud y comparando la distancia de un extremo de la observación a las demás observaciones respecto a una medida de variabilidad [Es un test de valores atípicos (<i>outlier test</i>)].
n	r	
$3 \leq n \leq 7$	$r_{10} = \frac{X_2 - X_1}{X_n - X_1}$	
$8 \leq n \leq 10$	$r_{11} = \frac{X_2 - X_1}{X_{n-1} - X_1}$	
$11 \leq n \leq 13$	$r_{21} = \frac{X_3 - X_1}{X_{n-1} - X_1}$	
$14 \leq n \leq 25$	$r_{22} = \frac{X_3 - X_1}{X_{n-2} - X_1}$	
Distribución r (Apéndice II, Tabla Q)		

Test 12. Una muestra de datos proviene de una población con una función de probabilidad determinada

- (a) D = Máxima desviación del porcentaje de frecuencia acumulada en la muestra respecto al porcentaje de frecuencia acumulada en la distribución (Gibbons 1997, Tabla C)

La distribución debe ser continua.

La distribución de frecuencias acumuladas de los datos se representan en un papel probabilístico. Se evalúa la máxima desviación respecto a una línea recta. Este test se aplica en particular cuando $n < 30$ (Es el «test de buen ajuste de Kolmogorov-Smirnov»).

(b) $\chi^2 = \sum \frac{(f_a - f_e)^2}{f_e}$

$n > 30$ y preferible > 100 .

Los datos se evalúan construyendo una distribución de frecuencias. Las frecuencias teóricas (deducidas de la distribución asumida) se calculan para cada intervalo. Entonces se comparan las frecuencias reales (f_r) y las frecuencias teóricas (f_i). Este test se utiliza en distribuciones continuas y discretas. Si alguna frecuencia teórica es menor que 5, se junta el intervalo con alguno de los adyacentes (este es el test χ^2 de bondad del ajuste).

Distribución	GL
Normal	Número de intervalos -3
Exponencial	Número de intervalos -2
Weibull	Número de intervalos -4
Poisson	Número de intervalos -2
Binomial	Número de intervalos -2

Los test estadísticos para todas las distribuciones siguen la distribución chi cuadrado (Apéndice II, Tabla L)

Ejemplo: Las pruebas hechas a ocho motores experimentales prueban que con un litro de cierta clase de gasóleo funcionan, respectivamente, durante 28, 26, 31, 29, 25, 27, 28 y 27 minutos, respectivamente. La especificación propuesta establece que los motores deben funcionar como mínimo una media de 30 minutos. ¿Cumple el nuevo motor este requerimiento? Trabajar con un 5 por ciento de nivel de significación.

Solución: Utilizando el Test 1b de la Tabla 44.31,

$$H_0: \mu = 30,0$$

$$H_1: \mu < 30,0$$

Test estadístico:

$$t_1 = \frac{\bar{X} - \mu_0}{s/\sqrt{n}}$$

Zona de aceptación:

$$\text{Grados de libertad DF} = 8 - 1 = 7$$

$$t \geq -1,895$$

La deducción matemática de los *grados de libertad* está más allá de los objetivos de este manual, pero el concepto subyacente se puede indicar. Los *grados de libertad* dan una medida de la fiabilidad de la estimación de la verdadera desviación típica de una población utilizando la desviación típica de una muestra. Cuando la verdadera desviación típica es conocida, $DF = \infty$. En general, DF es el número de medidas utilizadas para determinar la desviación típica de la muestra menos el número de constantes estimadas a partir de los datos para calcular la desviación típica. En el ejemplo, era necesario estimar sólo una constante (la media muestral) para poder calcular la desviación típica, por tanto $DF = 8 - 1$.

Análisis:

$$\begin{aligned} \bar{X} &= 27,6 & s &= 1,86 \\ t &= \frac{27,6 - 30,0}{\frac{1,86}{\sqrt{8}}} = -3,65 \end{aligned}$$

Conclusión: Rechazar la hipótesis. No hay suficiente evidencia para concluir que la máquina pueda cumplir la especificación.

Ejemplo: Resolver el ejemplo previo utilizando el recorrido en lugar de la desviación típica.

Solución: Utilizando el Test 1c de la Tabla 44.31,

$$H_0: \mu = 30,0$$

$$H_1: \mu < 30,0$$

Test estadístico:

$$\tau_1 = \frac{\bar{X} - \mu_0}{R}$$

Región de aceptación:

$$\tau_1 \geq -0,230$$

Análisis:

$$\tau_1 = \frac{27,6 - 30,0}{6} = -0,40$$

Conclusión: Rechazar la hipótesis. Hay suficiente evidencia para concluir que la máquina no cumple el requerimiento.

Ejemplo: Resolver el ejemplo previo utilizando el test de los signos.

Solución: Utilizando el Test 1d de la Tabla 44.31,

$$H_0: \mu = 30$$

$$H_1: \mu < 30$$

Test estadístico: Número de signos positivos de r .

Región de aceptación:

$$r > 1 \text{ (test unilateral)}$$

Análisis:

X	$X - \mu_0$	
28	—	
26	—	
31	+	
29	—	$r = 1$
25	—	
27	—	
28	—	
27	—	

Conclusión: Rechazar la hipótesis. Hay suficiente evidencia para concluir que la máquina no cumple el requerimiento.

Ejemplo: Se hacen cinco fabricaciones de caucho de cada una de las dos fórmulas y se prueba su resistencia a la tracción con los siguientes resultados:

Fórmula 1	Fórmula 2
3.067	3.200
2.730	2.777
2.840	2.623
2.913	3.044
2.789	2.834

Comprobar la hipótesis de que la resistencia media es la misma para las dos fórmulas, suponiendo un nivel de significación del 5 por ciento.

Solución: En primer lugar, con el Test 5a de la Tabla 44.31 se prueba la hipótesis de igualdad de varianzas. Su resultado lo utilizaremos para decidir cuándo se debe utilizar el Test 2b o 2d para evaluar la pregunta respecto a la resistencia media.

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

$$H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$$

Test estadístico:

$$DF_1 = 5 - 1 = 4 \quad DF_2 = 5 - 1 = 4$$

$$F = \frac{(s_1)^2}{(s_2)^2}$$

Región de aceptación:

$$\frac{1}{9,60} \leq F \leq 9,60$$

Análisis:

$$s_1^2 = 16.923,7$$

$$s_2^2 = 51.713,3$$

$$F = \frac{16.923,7}{51.713,3} = 0,33$$

Conclusión: Aceptar la hipótesis. Este resultado lo utilizamos para poder suponer la hipótesis de igualdad de varianzas en el siguiente test de hipótesis. Ahora, utilizando el Test 2b,

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

Test estadístico:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \sqrt{\frac{[(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2]}{n_1 + n_2 - 2}}}$$

Región de aceptación:

$$DF = 5 + 5 - 2 = 8$$

$$-2,306 \leq t \leq +2,306$$

Análisis:

$$t = \frac{2867,8 - 2895,6}{\sqrt{\frac{1}{5} + \frac{1}{5}} \sqrt{\frac{(5-1) 16.923,7 + (5-1) 51.713,3}{5+5-2}}} = -0,2373$$

Conclusión: Aceptar la hipótesis. No hay suficiente evidencia para concluir que las fórmulas difieren en resistencia media.

Ejemplo: Resolver el ejemplo previo utilizando recorridos en lugar de desviaciones típicas.

Solución: En primer lugar, con el Test 5b de la Tabla 44.31 se prueba la hipótesis de igualdad de varianzas.

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

$$H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$$

Test estadístico:

$$F' = \frac{R_1}{R_2}$$

Región de aceptación:

$$0,32 < F' < 3,2$$

Análisis:

$$R_1 = 3.067 - 2.730 = 337$$

$$R_2 = 3.200 - 2.623 = 577$$

$$F' = \frac{337}{577} = 0,58$$

Conclusión: Aceptar la hipótesis. Este resultado lo utilizamos para poder suponer la hipótesis de igualdad de varianzas en el siguiente test de hipótesis. Ahora, utilizando el Test 2c,

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \quad H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

Test estadístico:

$$\tau_d = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{0,5(R_1 + R_2)}$$

Región de aceptación:

$$-0,493 \leq \tau_d \leq +0,493$$

$$R_1 = 3.067 - 2.730 = 337$$

$$R_2 = 3.200 - 2.623 = 577$$

Análisis:

$$\tau_d = \frac{2.867,8 - 2.895,6}{0,5(337 + 577)} = -0,061$$

Conclusión: Aceptar la hipótesis. No hay suficiente evidencia para concluir que las fórmulas difieren en resistencia media.

Test de una hipótesis con tamaño de muestra no fijado inicialmente. Como se indicó antes en el test de una hipótesis, cuando el tamaño de muestra está fijado inicialmente, al dar los errores de tipo I y tipo II, se determina en función de esos errores el tamaño de la muestra. Por tanto, si el tamaño de la muestra se fija a priori, sólo es posible controlar el error de tipo I (y no el error de tipo II). Se pueden controlar ambos errores si el tamaño de la muestra no se fija inicialmente, según se verá ahora en el ejemplo de comprobar si las medias de dos poblaciones son iguales ($H_0: \mu_1 = \mu_2$).

Para error de tipo I igual a α y error de tipo II igual a β cuando las medias difieren en valor absoluto en el número positivo δ^* , se procede así:

- Obtener una muestra de n_0 observaciones de cada una de las ($k = 2$) poblaciones (se desea que n_0 sea como mínimo 10, si es posible).

El tamaño total de la muestra de la población i se determina por

$$n_i = \max[n_0 + 1, (ws_i)^2]$$

donde w es la solución de la ecuación (que se resuelve por tanteo)

$$P_{n_0}(-h - \delta^* w) + P_{n_0}(-h + \delta^* w) = \beta$$

donde $h = h_{n_0}(2, 1 - \alpha/2)$ se encuentra en la Tabla 44.30, y $P_{n_0}(t)$ se encuentra en la Tabla 44.32.

- Tomar $n_1 - n_0$ más observaciones de la población 1 y $n_2 - n_0$ más observaciones de la población 2. Rechazar la hipótesis de que las medias son iguales si las medias muestrales (basadas en todos los datos) difieren en más de h/w .

Como ejemplo, supongamos que tenemos una muestra inicial de tamaño $n_0 = 15$ y que los errores admisibles son: el de tipo I, $\alpha = 0,05$, y el de tipo II, $\beta = 0,10$ cuando las medias difieren en $\delta^* = 4,0$. Entonces de la Tabla 44.30 se obtiene que $h = h_{n_0}(2, 1 - \alpha/2) = h_{15}(2, 0,975) = 3,02$. Encontramos el w que resuelve la ecuación

$$P_{15}(-3,02 - 4w) + P_{15}(-3,02 + 4w) = 0,10$$

en dos etapas. Primero encontramos aproximadamente w resolviendo $P_{15}(-3,02 + 4w) = 0,10$ utilizando la Tabla 44.32. Dado que la Tabla 44.32 sólo tiene entradas a partir de 0,4999, transformaremos la ecuación utilizando $P_{n_0}(-v) = 1 - P_{n_0}(-v)$ para todos los valores de v , obteniendo

$$1 - P_{15}(3,02 - 4w) = 0,10 \quad \text{o} \quad P_{15}(3,02 - 4w) = 0,90$$

ya que $P_{15}(1,9) = 0,8968$ y $P_{15}(2,0) = 0,9079$, w estará (en una primera aproximación) entre las soluciones de

$$3,02 - 4w = 1,9 \quad \text{y} \quad 3,02 - 4w = 2,0$$

que son $w = 0,28$ y $w = 0,255$. Probemos el valor $w = 0,255$. Para este valor,

$$P_{15}[-3,02 - (4)(0,225)] + P_{15}[-3,02 + (4)(0,255)] = P_{15}(-1,04) + P_{15}(-2,0) = 1 - P_{15}(4,04) + 1 - P_{15}(2,0) = 1 - 0,9946 + 1 - 0,9079 = 0,0054 + 0,0921 = 0,0975 = 0,10$$

(El proceso de aproximación se puede mejorar, pero para la mayoría de los propósitos prácticos es suficiente con este w). Entonces, si $s_1 = 17,3$, necesitaremos una muestra total de tamaño

$$n_1 = \max\{15 + 1, [(0,255)(17,3)]^2\} = \max(16, 19,46) = 20$$

(como los tamaños de las muestras deben ser enteros, se redondea por exceso). Como ya tenemos 15 observaciones, $20 - 15 = 5$ muestras más se necesitarán de la población 1. Análogamente, si $s_2 = 10,4$, necesitaríamos una muestra total de tamaño

$$n_2 = \max\{15 + 1, [(0,255)(10,4)]^2\} = \max(16, 7,03) = 16$$

Como también tenemos 15 observaciones de la población 2, se necesita $16 - 15 = 1$ observación más de la población 2. Si las medias de esas muestras son $\bar{X}_1$ y $\bar{X}_2$, rechazaremos la hipótesis $\mu_1 = \mu_2$ si las medias de las muestras difieren en más de

$$\frac{h}{w} = \frac{3,02}{0,255} = 11,84$$

Por ejemplo, si $\bar{X}_1 = 38,3$ y $\bar{X}_2 = 50,2$, las medias de las muestras difieren en 11,9, por lo que rechazaremos la hipótesis nula de que las medias son iguales.

Obtención de conclusiones de un test de hipótesis. El beneficio de los tests de hipótesis es la obtención de conclusiones útiles. El significado de «Rechazar la hipótesis» o

TABLA 44.32 Probabilidades $P_{n_0}(t)$ para chequear la igualdad de dos medias en dos situaciones*

t	n_0							
	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999
0,1	0,5158	0,5208	0,5229	0,5241	0,5248	0,5254	0,5257	0,5260
0,2	0,5317	0,5415	0,5457	0,5481	0,5496	0,5506	0,5514	0,5520
0,3	0,5473	0,5620	0,5684	0,5719	0,5742	0,5757	0,5768	0,5777
0,4	0,5628	0,5822	0,5907	0,5954	0,5984	0,6004	0,6019	0,6030
0,5	0,5779	0,6021	0,6126	0,6184	0,6221	0,6246	0,6265	0,6279
0,6	0,5927	0,6215	0,6340	0,6410	0,6453	0,6483	0,6505	0,6521
0,7	0,6071	0,6404	0,6549	0,6629	0,6679	0,6713	0,6738	0,6757
0,8	0,6211	0,6588	0,6751	0,6841	0,6897	0,6936	0,6964	0,6986
0,9	0,6345	0,6765	0,6946	0,7046	0,7108	0,7151	0,7182	0,7206
1,0	0,6475	0,6935	0,7134	0,7242	0,7311	0,7357	0,7391	0,7417
1,1	0,6600	0,7099	0,7313	0,7431	0,7504	0,7554	0,7591	0,7618
1,2	0,6720	0,7255	0,7485	0,7610	0,7688	0,7742	0,7780	0,7810
1,3	0,6834	0,7405	0,7648	0,7781	0,7863	0,7919	0,7960	0,7991
1,4	0,6943	0,7547	0,7803	0,7942	0,8029	0,8087	0,8130	0,8162
1,5	0,7048	0,7681	0,7950	0,8094	0,8184	0,8245	0,8289	0,8322
1,6	0,7147	0,7809	0,8088	0,8238	0,8331	0,8393	0,8439	0,8473
1,7	0,7242	0,7930	0,8218	0,8372	0,8467	0,8532	0,8578	0,8613
1,8	0,7332	0,8044	0,8340	0,8498	0,8595	0,8660	0,8707	0,8742
1,9	0,7418	0,8151	0,8454	0,8615	0,8714	0,8780	0,8827	0,8863
2,0	0,7499	0,8252	0,8561	0,8725	0,8824	0,8891	0,8938	0,8974
2,1	0,7577	0,8347	0,8661	0,8826	0,8926	0,8993	0,9040	0,9075
2,2	0,7651	0,8436	0,8754	0,8920	0,9020	0,9087	0,9134	0,9169
2,3	0,7721	0,8520	0,8841	0,9007	0,9107	0,9173	0,9220	0,9254
2,4	0,7788	0,8599	0,8922	0,9087	0,9187	0,9252	0,9298	0,9332
2,5	0,7852	0,8673	0,8996	0,9162	0,9260	0,9324	0,9369	0,9402
2,6	0,7912	0,8742	0,9066	0,9230	0,9327	0,9390	0,9434	0,9466
2,7	0,7970	0,8807	0,9130	0,9293	0,9388	0,9450	0,9493	0,9524
2,8	0,8025	0,8868	0,9190	0,9350	0,9444	0,9504	0,9546	0,9576
2,9	0,8078	0,8925	0,9245	0,9403	0,9495	0,9553	0,9594	0,9623
3,0	0,8128	0,8979	0,9297	0,9452	0,9541	0,9598	0,9637	0,9665
3,1	0,8176	0,9029	0,9344	0,9497	0,9583	0,9638	0,9676	0,9703
3,2	0,8221	0,9076	0,9388	0,9537	0,9622	0,9675	0,9711	0,9736
3,3	0,8265	0,9121	0,9429	0,9575	0,9657	0,9708	0,9742	0,9766
3,4	0,8307	0,9162	0,9466	0,9609	0,9688	0,9737	0,9770	0,9793
3,5	0,8347	0,9201	0,9501	0,9640	0,9717	0,9764	0,9795	0,9817
3,6	0,8385	0,9238	0,9533	0,9669	0,9743	0,9788	0,9817	0,9838
3,7	0,8422	0,9273	0,9563	0,9695	0,9766	0,9809	0,9837	0,9857
3,8	0,8457	0,9305	0,9591	0,9719	0,9788	0,9829	0,9855	0,9874
3,9	0,8491	0,9336	0,9617	0,9741	0,9807	0,9846	0,9871	0,9889
4,0	0,8524	0,9365	0,9640	0,9761	0,9824	0,9861	0,9885	0,9902
4,1	0,8555	0,9392	0,9662	0,9779	0,9840	0,9875	0,9898	0,9913
4,2	0,8585	0,9417	0,9683	0,9796	0,9854	0,9888	0,9909	0,9923
4,3	0,8614	0,9442	0,9702	0,9812	0,9867	0,9899	0,9919	0,9932
4,4	0,8641	0,9464	0,9720	0,9826	0,9879	0,9909	0,9928	0,9940
4,5	0,8668	0,9486	0,9736	0,9839	0,9890	0,9918	0,9936	0,9947
4,6	0,8694	0,9506	0,9751	0,9851	0,9899	0,9926	0,9943	0,9953
4,7	0,8719	0,9526	0,9765	0,9862	0,9908	0,9933	0,9949	0,9959
4,8	0,8743	0,9544	0,9779	0,9872	0,9916	0,9940	0,9954	0,9964
4,9	0,8766	0,9561	0,9791	0,9881	0,9923	0,9946	0,9959	0,9968
50,0	0,8788	0,9578	0,9803	0,9889	0,9930	0,9951	0,9964	0,9972
5,1	0,8810	0,9593	0,9813	0,9897	0,9935	0,9956	0,9967	0,9975

(Continúa)

TABLA 44.32 Probabilidades $P_{n_0}(t)$ para chequear la igualdad de dos medias en dos situaciones* (*Continuación*)

t	n_0								
	10	11	12	13	14	15	20	25	30
0,0	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999
0,1	0,5262	0,5264	0,5266	0,5267	0,5268	0,5269	0,5272	0,5274	0,5275
0,2	0,5524	0,5528	0,5531	0,5533	0,5535	0,5537	0,5544	0,5547	0,5555
0,3	0,5783	0,5789	0,5793	0,5797	0,5800	0,5803	0,5812	0,5818	0,5822
0,4	0,6039	0,6046	0,6052	0,6057	0,6061	0,6065	0,6077	0,6085	0,6089
0,5	0,6290	0,6299	0,6306	0,6312	0,6317	0,6322	0,6337	0,6346	0,6352
0,6	0,6534	0,6545	0,6554	0,6561	0,6567	0,6572	0,6591	0,6601	0,6608
0,7	0,6772	0,6785	0,6794	0,6803	0,6810	0,6816	0,6837	0,6849	0,6857
0,8	0,7003	0,7016	0,7027	0,7037	0,7045	0,7051	0,7075	0,7089	0,7098
0,9	0,7224	0,7239	0,7252	0,7262	0,7271	0,7278	0,7304	0,7319	0,7329
1,0	0,7437	0,7453	0,7466	0,7478	0,7487	0,7495	0,7523	0,7539	0,7150
1,1	0,7640	0,7657	0,7671	0,7683	0,7693	0,7702	0,7732	0,7749	0,7761
1,2	0,7833	0,7851	0,7866	0,7879	0,7889	0,7899	0,7930	0,7948	0,7961
1,3	0,8015	0,8034	0,8050	0,8063	0,8075	0,8084	0,8117	0,8136	0,8149
1,4	0,8187	0,8207	0,8223	0,8237	0,8249	0,8259	0,8293	0,8313	0,8326
1,5	0,8348	0,8369	0,8386	0,8400	0,8412	0,8422	0,8457	0,8478	0,8491
1,6	0,8499	0,8520	0,8538	0,8552	0,8564	0,8575	0,8611	0,8631	0,8645
1,7	0,8639	0,8661	0,8679	0,8693	0,8706	0,8716	0,8753	0,8774	0,8788
1,8	0,8770	0,8792	0,8809	0,8824	0,8837	0,8847	0,8884	0,8905	0,8919
1,9	0,8890	0,8912	0,8930	0,8945	0,8957	0,8968	0,9004	0,9025	0,9039
2,0	0,9001	0,9023	0,9041	0,9056	0,9068	0,9079	0,9115	0,9136	0,9149
2,1	0,9103	0,9124	0,9142	0,9157	0,9169	0,9180	0,9215	0,9236	0,9249
2,2	0,9196	0,9217	0,9235	0,9249	0,9261	0,9272	0,9307	0,9327	0,9340
2,3	0,9281	0,9302	0,9319	0,9333	0,9345	0,9355	0,9389	0,9409	0,9421
2,4	0,9358	0,9379	0,9395	0,9409	0,9421	0,9430	0,9464	0,9482	0,9495
2,5	0,9428	0,9448	0,9464	0,9478	0,9489	0,9498	0,9530	0,9548	0,9560
2,6	0,9491	0,9511	0,9526	0,9539	0,9550	0,9559	0,9590	0,9607	0,9618
2,7	0,9548	0,9567	0,9582	0,9594	0,9605	0,9614	0,9643	0,9659	0,9670
2,8	0,9599	0,9617	0,9632	0,9644	0,9654	0,9662	0,9690	0,9706	0,9716
2,9	0,9645	0,9663	0,9676	0,9688	0,9697	0,9705	0,9732	0,9746	0,9756
3,0	0,9686	0,9703	0,9716	0,9727	0,9736	0,9743	0,9768	0,9782	0,9791
3,1	0,9723	0,9739	0,9751	0,9761	0,9770	0,9777	0,9800	0,9813	0,9821
3,2	0,9756	0,9771	0,9782	0,9792	0,9800	0,9807	0,9828	0,9841	0,9848
3,3	0,9785	0,9799	0,9810	0,9819	0,9826	0,9833	0,9853	0,9864	0,9871
3,4	0,9811	0,9824	0,9834	0,9843	0,9850	0,9855	0,9874	0,9885	0,9891
3,5	0,9833	0,9846	0,9856	0,9864	0,9870	0,9875	0,9893	0,9902	0,9908
3,6	0,9854	0,9865	0,9874	0,9882	0,9888	0,9893	0,9909	0,9917	0,9923
3,7	0,9871	0,9882	0,9891	0,9898	0,9903	0,9908	0,9923	0,9930	0,9935
3,8	0,9887	0,9897	0,9905	0,9912	0,9917	0,9921	0,9934	0,9941	0,9946
3,9	0,9901	0,9911	0,9918	0,9924	0,9928	0,9932	0,9944	0,9951	0,9955
4,0	0,9913	0,9922	0,9929	0,9934	0,9938	0,9942	0,9953	0,9959	0,9962
4,1	0,9924	0,9932	0,9938	0,9943	0,9947	0,9950	0,9960	0,9966	0,9969
4,2	0,9933	0,9941	0,9947	0,9951	0,9955	0,9958	0,9967	0,9971	0,9974
4,3	0,9942	0,9949	0,9954	0,9958	0,9961	0,9964	0,9972	0,9976	0,9979
4,4	0,9949	0,9955	0,9960	0,9964	0,9967	0,9969	0,9976	0,9980	0,9982
4,5	0,9955	0,9961	0,9966	0,9969	0,9972	0,9974	0,9980	0,9983	0,9985
4,6	0,9961	0,9966	0,9970	0,9973	0,9976	0,9978	0,9983	0,9986	0,9988
4,7	0,9966	0,9971	0,9974	0,9977	0,9979	0,9981	0,9986	0,9989	0,9990
4,8	0,9970	0,9974	0,9978	0,9980	0,9982	0,9984	0,9988	0,9991	0,9992
4,9	0,9974	0,9978	0,9981	0,9983	0,9985	0,9986	0,9990	0,9992	0,9993
5,0	0,9977	0,9981	0,9983	0,9985	0,9987	0,9988	0,9992	0,9993	0,9994
5,1	0,9980	0,9983	0,9986	0,9987	0,9989	0,9990	0,9993	0,9995	0,9995

* Los datos de la tabla se han tomado de la p. 52 de E. J. Dudewicz y S. R. Dalal (1975), «Allocation of Observations in Ranking and Selection With Unequal Variances». *Sankhyā*, vol. 73B, pp. 28-78. Se expresa el agradecimiento al Instituto Matemático Indio por permitir la reproducción de estas tablas.

TABLA 44.33 El significado de una conclusión de un test de hipótesis

	Si la hipótesis se rechaza	Si la hipótesis se acepta
Evidencia idónea en la muestra de observaciones	Suficiente para concluir que la hipótesis es falsa.	No suficiente para concluir que la hipótesis es falsa; la hipótesis es razonable, pero no se ha probado que sea cierta.
Diferencia entre el resultado en la muestra (por ejemplo $\bar{X}$) y el valor de la hipótesis (por ejemplo μ_0)	Poco probable que la diferencia se deba a la variabilidad aleatoria (del muestreo).	Es fácil que la diferencia se deba a la variabilidad aleatoria (del muestreo).
Análogo a culpabilidad o inocencia en un tribunal de justicia	La culpabilidad se establece lejos de una razonable duda de inocencia.	No se declara la culpabilidad cuando hay duda razonable.
Análogo a tener un promedio en béisbol	Si un jugador obtiene 300 de 1.000 tiros, es suficiente para concluir que su promedio es alrededor de 0,3.	Si un jugador obtiene 3 de 10 tiros, no es suficiente para concluir que su promedio es alrededor de 0,3.

«Aceptar la hipótesis» se muestra en la Tabla 44.33, con algunas analogías para explicar sutilezas de sus significados.

Cuando se rechaza una hipótesis, la conclusión práctica es que «el valor del parámetro especificado en la hipótesis no es correcto». Esta conclusión debe obtenerse con convicción fuerte, o dicho con más precisión, con un nivel de confianza del $100(1-\alpha)$ por ciento. La cuestión clave es, pues: ¿qué es una buena estimación del valor de un parámetro de la población? Una buena respuesta a esta pregunta se obtiene calculando los «límites de confianza» del valor obtenido para el parámetro mediante la estimación estadística: Estimación del intervalo de confianza.

La aceptación de una hipótesis no implica la exactitud del valor establecido del parámetro; lo que significa es que dicho valor no es rechazado. No es correcto decir que la hipótesis ha sido probada con un nivel de confianza del $100(1-\alpha)$ por ciento. Otras muchas hipótesis se podrían aceptar para la muestra de observaciones obtenidas, pero sólo una de ellas será la cierta. Por lo tanto, aceptación de una hipótesis *no* significa una alta probabilidad de que la hipótesis considerada sea correcta (supuesto que permanezcan constantes todos los factores de dos muestras salvo su tamaño, cuanto menor sea el tamaño de la muestra, mayor es la probabilidad de aceptación de la hipótesis. Es claro que la menor información suministrada por una muestra de menor tamaño no puede implicar prueba). Por esta razón, hoy en día, la frase «la hipótesis no ha sido rechazada al nivel de confianza α » se utiliza con preferencia a la expresión «la hipótesis ha sido aceptada al nivel α ». Sólo cuando el tamaño de la muestra no ha sido fijado a priori podemos obtener una indicación de que el verdadero valor no difiere del valor de la hipótesis en más de δ^* con un riesgo de error de β .

Respecto a la aceptación de una hipótesis, la pregunta fundamental es: ¿Se puede extraer alguna conclusión del valor del parámetro en la hipótesis? Lo que se puede sugerir son estas dos aproximaciones:

1. Calcular los límites de confianza del valor del parámetro en la muestra (visto antes en Estimación estadística). Estos límites de confianza definen un intervalo en cuyo interior está el verdadero parámetro de la población. Si este intervalo es pequeño, entonces la decisión de aceptar basada en el test de hipótesis significa que el verdadero valor de la población es cercano o igual al establecido en la hipótesis. Entonces es razonable

actuar como si el valor del parámetro especificado en la hipótesis fuese correcto. Si el intervalo de confianza es relativamente ancho, tenemos una fuerte advertencia de que nada se ha probado respecto al valor establecido en la hipótesis y de que el verdadero valor de la población puede ser muy diferente del especificado en la hipótesis.

2. Construir y revisar la curva característica para el test de hipótesis. Define la probabilidad de que otros posibles valores del parámetro puedan haber sido aceptados por el test. El conocimiento de estas probabilidades para valores relativamente próximos al de la hipótesis original puede ayudar a extraer conclusiones respecto a la aceptación de la hipótesis original. Por ejemplo, la Figura 44.21 muestra la curva OC para una hipótesis que dice que la media de la población es 30,0. Nótese que la probabilidad de aceptar la hipótesis cuando la media μ de la población es 30,0 es 0,95 (o $1 - \alpha$). Obsérvese también que si μ es 35,0, entonces la probabilidad de aceptar $\mu = 30,0$ sigue siendo alta (alrededor de 0,83). Si μ fuese 42,0, entonces la probabilidad de aceptar $\mu = 30,0$ sólo es alrededor de 0,33.

Hay que ser muy cuidadosos en la extracción de conclusiones de ingeniería desde resultados estadísticos, particularmente cuando se acepta una hipótesis. [Rutherford (1971) discute un procedimiento de extraer conclusiones que exige la elección entre dos políticas de extraer conclusiones, es decir, la conservadora y la liberal].

Determinación del tamaño de muestra requerido para un test de hipótesis.

Las subsecciones anteriores presuponen que el tamaño de muestra estaba fijado por razones no estadísticas y que el error de tipo I estaba predefinido para el test. El procedimiento ideal pasa por predefinir los errores deseados de tipo I y tipo II y calcular el tamaño de muestra requerido en función de esos dos errores.

El tamaño de muestra requerido depende de (1) los riesgos de muestreo deseados (α y β); (2) el tamaño de la mínima verdadera diferencia que se desea detectar, y (3) la variación en la característica que se desea medir. El tamaño de muestra se puede determinar utilizando la «curva característica» para el test. La Tabla 44.34 resume métodos útiles para determinar el tamaño de muestra requerido para un test bilateral bajo ciertas hipótesis. [Otras fuentes de curvas características están en Duncan (1974) y Natrella (1963)].

Supongamos que fuese importante detectar que la vida media de las baterías antes citadas fuese 35,0. En concreto, se desea tener una probabilidad del 80 por ciento de detectar este cambio ($\beta = 0,2$). Además, si el verdadero valor fuese 30,0 (como se estableció en la hipótesis), deberemos tener sólo un riesgo del 5 por ciento de rechazar la hipótesis ($\alpha = 0,05$). Utilizando el gráfico R del Apéndice II, d se define por

$$d = \frac{\mu - \mu_0}{\sigma} = \frac{35,0 - 30,0}{10} = 0,5$$

La curva, para $d = 0,5$ y $P_a = 0,2$ (el riesgo β), nos indica que se requiere un tamaño de muestra de alrededor de 30.

Duncan (1974) discute el cálculo del tamaño de muestra requerido para satisfacer los errores de tipo I y de tipo II. Sin embargo, en la práctica no se está seguro a veces de los valores deseados para esos errores. La revisión de la curva característica para varios tamaños de muestra puede ayudar a tomar una decisión sobre el tamaño de muestra requerido para reflejar la importancia relativa de ambos errores. Es especialmente importante considerar tanto β como α , pues de lo contrario pueden obtenerse resultados sin sentido. (La extracción aleatoria hasta rechazar la hipótesis H_0 un 100α por ciento de veces produce un test con un nivel de significación α . Esto por sí solo, y sin ninguna consideración de β , es trivial).

Relación con los intervalos de confianza. Los límites de confianza suministran límites entre los que debe estar el parámetro de la población (con una probabilidad especificada).

TABLA 44.34 Resumen de gráficos y tablas de tamaño de muestra

Hipótesis	Gráfico o tabla
1. Media de la población = μ_0 (σ conocida)	Apéndice II, gráfico R.
2. Media de la población = μ_0 (σ estimada por s)	Duncan (1974, p. 539).
3. Medias de dos poblaciones iguales (σ_1 y σ_2 conocidas)	Natrella (1963, pp. T-16, T-17).
4. Medias de dos poblaciones iguales ($\sigma_1 = \sigma_2$ pero estimadas por s_1 y s_2)	Natrella (1963, pp. T-16, T-17).
5. Desviación típica de una población = σ_0	Duncan (1974, p. 324).
6. Igualdad de las desviaciones de dos poblaciones	Duncan (1974, p. 572).

Los test de hipótesis evalúan una afirmación específica respecto a un parámetro de la población. Estos procedimientos están relacionados, y muchos tests de hipótesis se pueden hacer utilizando el cálculo de límites de confianza.

Ejemplo: Una muestra de 12 aislantes tienen una resistencia media de 4,95 pies · libra (6,7149 N · m). La desviación típica de la población se sabe que vale 0,25 pies · libra (0,34 N · m). Se desea hacer un test a la hipótesis de que la media de la población es 5,15 pies · libra (6,9834 N · m).

Solución utilizando tests de hipótesis: La Tabla 44.31 define el test estadístico $1a$ y $U = (\bar{X} - \mu_0) / (\sigma/\sqrt{n})$, y U está normalmente distribuido. Si $\alpha = 0,05$, la región de aceptación es para los valores de U entre $\pm 1,96$. Entonces,

$$\begin{aligned}
 H_0: \mu &= \mu_0 = 5,15 \\
 H_1: \mu &\neq \mu_0 \\
 U &= \frac{4,95 - 5,15}{0,25/\sqrt{12}} = -2,75
 \end{aligned}$$

Como el índice de la muestra está fuera de la región de aceptación, se rechaza la hipótesis. El procedimiento utilizando límites de confianza es:

1. Establecer la hipótesis del valor del parámetro de la población.
2. Obtener una muestra de datos y calcular los límites de confianza del parámetro de la población.
3. Si el valor de la hipótesis está entre los límites de confianza, se acepta la hipótesis. En caso contrario se rechaza.

Solución utilizando límites de confianza: De la Tabla 44.22, parámetro 1, los límites de confianza son

$$\bar{X} \pm K_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Los límites de confianza al 95 por 100 son $4,95 \pm 1,96 (0,25)/\sqrt{12} = 4,81$ y $5,09$. Como el valor de la hipótesis está fuera de los límites de confianza, la hipótesis se rechaza. Es la misma conclusión que se obtuvo utilizando el procedimiento de tests de hipótesis.

Los conceptos de límites de confianza y tests de hipótesis son aproximaciones alternativas a la evaluación de una hipótesis. [Para ciertas hipótesis, estas dos aproximaciones dan errores

de tipo I ligeramente diferentes (véase Barr 1969)]. Como se discutió en Extracción de conclusiones de un test de hipótesis, los límites de confianza añaden valor al procedimiento de tests de hipótesis. Por ejemplo, en el ejemplo precedente, no sólo los límites de confianza nos dicen que μ no es 5,15, sino que además nos dicen que μ está entre 4,81 y 5,09.

Casos estándar. Algunos de los casos prácticos más importantes han sido dados en la Tabla 44.31, concretamente:

Proporción binomial	Tests 6, 8
Dos proporciones binomiales	Test 7
Media de distribución normal	Test 1
Dos medias	Test 2
Media de la normal bivalente	Test 3
Desviación típica de una distribución normal	Test 4
Dos desviaciones típicas	Test 5
Igualdad de dos distribuciones	Test 9
Orden aleatorio de las observaciones	Test 10
Test de valores atípicos (<i>outliers</i>)	Test 11

Muchos de estos problemas pueden resolverse utilizando varios tests. Entonces, el tamaño de la muestra no está prefijado de antemano, sino que basándose en los datos se deciden cuántas observaciones se necesitan. Por ejemplo, si se decide inspeccionar un número de artículos, por ejemplo 100, y rechazar el lote si se encuentran 15 o más defectuosos, es evidente que se puede detener el muestreo en cuanto se encuentra una quincena de defectuosos. Ideas similares nos llevan a ahorrar en el número de observaciones que se necesitan en muchos de los casos estándar listados arriba, lo que es muy importante cuando el muestreo es costoso o emplea mucho tiempo. Para detalles, véase Govindarajulu (1981).

Datos emparejados frente a datos no emparejados. En el Test 2e de la Tabla 44.31 se da un test que es apropiado cuando los datos se cogen en parejas y la diferencia entre los valores de cada par se utiliza como dato. Este procedimiento se utiliza con frecuencia para «eliminar» efectos de variables que se cree tienen consecuencias que no se desean estudiar por el momento.

Por ejemplo, supongamos que hay un efecto debido a uno o a diferentes operarios de una máquina, y deseamos comparar dos tipos de operación de esa máquina, pero no deseamos evaluar la magnitud del efecto de cada operario. Entonces, dejando que cada operario ejecute las dos operaciones y tomando la diferencia, eliminamos el efecto del operario. (En tanto que si un operario ejecuta totalmente un procedimiento y otro operario ejecuta el otro procedimiento, las diferencias observadas pueden ser debidas no a los procedimientos, sino a los operarios).

Como otro ejemplo, en la evaluación del efecto de la publicidad de la competencia frente a la nuestra se utiliza frecuentemente una «división A/B» de la lista de distribución de correo. Es decir, un tipo de publicidad se envía a los números 1, 3, 5... de la lista, mientras que el otro tipo se envía a los números 2, 4, 6... Dado que las listas de distribución están ordenadas por código postal, es de esperar que las direcciones correspondientes a números consecutivos correspondan a personas más similares que las correspondientes a direcciones apartadas. Por tanto, esto es un buen método de obtener datos pareados.

No se utiliza esta técnica de emparejamiento cuando no hay ningún criterio de emparejamiento de los datos. Por ejemplo, es un error parear artículos según su orden en una lista de datos (cuando pueden haber sido clasificados por alguna característica diferente de la que ahora nos interesa eliminar).

Significación estadística frente a significación práctica. Supongamos que estamos utilizando el Test 1a de la Tabla 44.31 para hacer un test sobre si la media es 30, y deseamos

un test bilateral con un nivel de significación 0,05. Entonces rechazaremos la hipótesis H si U está fuera del intervalo $(-1,96, 1,96)$. Si encontramos $U = 3,15$, una manera de expresar el resultado del test es decir que la hipótesis H se rechaza al nivel 0,05.

Otra forma de expresar el resultado del test es encontrar el nivel de significación para el cual el intervalo de aceptación sería $(-3,15, 3,15)$. En la Tabla B del Apéndice II vemos que el nivel de significación es $(2)(0,00082) = 0,00164$, lo que se llama *probabilidad de significación* del test realizado. Es el mínimo nivel de significación al que se rechazaría el test H para los datos observados.

Una ventaja de la probabilidad de significación está en que con su utilización podemos informar de que la probabilidad de significación es 0,00164 sin elegir un nivel de significación. Cualquiera que lea nuestro informe puede utilizar el nivel de significación que considere apropiado: si es menor que 0,00164, no rechazaría la hipótesis; en tanto que si es igual o mayor que 0,00164, rechazaría la hipótesis.

Una desventaja de la probabilidad de significación es que puede ser muy pequeña (lo que induciría a pensar en un resultado «muy significativo») incluso cuando la media verdadera es muy próxima a 30. Por ejemplo, $U = 3,15$ cuando $\bar{X} = 33,15$ y $\sigma/\sqrt{n} = 1,00$; también $U = 3,15$ cuando $\bar{X} = 30,0315$ y $\sigma/\sqrt{n} = 0,01$. En cada caso la probabilidad de significación es 0,00164 (es decir, un 0,164 por ciento). En el primer caso, el intervalo de confianza de la media al 95 por ciento de confianza es $(31,19, 35,11)$; en tanto que en el segundo, el intervalo de confianza es $(30,0119, 30,0511)$. En términos de *significación práctica*, con el segundo es mucho más probable prácticamente detectar diferencias que con el primero. Sin embargo, no hay forma de diferenciar esas dos situaciones utilizando la probabilidad de significación. Por esta razón es recomendable calcular y considerar los intervalos de confianza.

HERRAMIENTAS ESTADÍSTICAS ADICIONALES

Hoy en día se utilizan muchas herramientas estadísticas en control de calidad. El equipo de herramientas estadísticas (véase Tabla 44.1) pone el énfasis en la base estadística de recogida, análisis e interpretación de datos. Las *transformaciones*, discutidas a continuación, son un método utilizado con frecuencia para garantizar que los datos cumplen las hipótesis de los procedimientos estadísticos, en tanto que los *métodos de muestreo de Montecarlo* y los *análisis clúster* (análisis tipológico o de conglomerados) y *discriminante* son métodos potentes cuyo uso en control de calidad está creciendo. Nos permiten, respectivamente, analizar con hipótesis mínimas y considerar características multivariantes. Los *métodos de muestreo y remuestreo* (*métodos bootstrap*) son un intento relativamente reciente de simplificar la modelización y el análisis; en su forma generalizada, lo consiguen con las mínimas desventajas. *Selección del mejor* es un método alternativo (frente al test de hipótesis o a los intervalos de confianza) que debe ser utilizado cuando nuestro objetivo es selección.

Transformación de datos. La mayor parte de la metodología presentada en este capítulo asume que la característica de calidad sigue una distribución de probabilidad conocida. Naturalmente, el análisis y las conclusiones resultantes son estrictamente válidas sólo si la hipótesis sobre la distribución es correcta. En el apartado de Tests de hipótesis se presentó un test de «bondad del ajuste» para evaluar cuantitativamente en un conjunto de datos la validez de su ajuste por una distribución. Desviaciones moderadas de una muestra de observaciones respecto a las hipótesis de una población teórica son razonables por la variabilidad del muestreo. El test de bondad del ajuste determina cuándo la desviación de la muestra respecto a la distribución teórica asumida es probable que pueda ser debida a la variabilidad del muestreo. Si esa desviación es improbable, se concluye que es errónea la distribución teórica asumida.

A veces un conjunto de datos no se ajusta por ninguna de las distribuciones estándar, tal como por ejemplo la distribución normal. Entonces se utilizan métodos estadísticos con «distribuciones libres» para un posterior análisis. Algunos de ellos se citaron en el apartado Tests de hipótesis, y Natrella (1963) y Gibbons (1977) presentan material adicional. Sin embargo, con frecuencia estos métodos requieren tamaños de muestra más grandes que los métodos convencionales para niveles de confianza estadística equivalentes. Algunos otros métodos de análisis son:

1. Examinar los datos para ver si hay una explicación no estadística del poco usual gráfico de su distribución de valores. Por ejemplo, la producción de cada una de varias máquinas, supuestas idénticas, debe distribuirse normalmente. Si las máquinas tienen diferentes medias o desviaciones típicas, entonces la producción combinada tendrá un gráfico de distribución poco usual, como en la distribución de una mezcla ya discutida en este capítulo. En este caso se deben hacer análisis separados para cada máquina.
2. Analizar los datos en términos de medias en lugar de con valores individuales. Como se estableció en Conceptos básicos, tipos de error, las medias de las muestras siguen una distribución normal de probabilidad incluso cuando no se distribuyen normalmente los valores individuales de la población de la que las muestras se extrajeron. Si es suficiente con extraer una conclusión final de la característica estudiada en términos de valor medio, se pueden aplicar las hipótesis de la distribución normal. Sin embargo, las conclusiones se aplicarán sólo al valor medio y no a los valores individuales en la población. (La predicción del porcentaje de una población que está fuera de los límites de ingeniería ilustra una situación en la que el análisis en términos de media no es suficiente, ya que los límites de ingeniería hacen referencia a valores individuales y no a medias).
3. Utilización de las distribuciones de probabilidad de Weibull. La distribución de Weibull es un grupo de distribuciones continuas en que cada una está caracterizada por los valores numéricos de los parámetros de la función de probabilidad de Weibull (por ejemplo, un valor de beta de 1,0 indica una distribución exponencial). Si la representación de un conjunto de datos en un papel de Weibull se aproxima a una línea recta, entonces esa línea recta nos da directamente estimaciones de las probabilidades de la población. El que la forma exacta de la distribución de probabilidad sea normal o exponencial, u otro tipo de distribución resulta ser secundario, dado que la línea recta del gráfico nos da las estimaciones de las probabilidades que necesitamos.
4. Hacer la transformación de la característica original a una nueva característica normalmente distribuida. La Figura 44.23 resume algunas de estas transformaciones matemáticas. Estas transformaciones son útiles para (a) lograr normalidad de resultados de medidas; (b) satisfacer la hipótesis de igualdad de varianzas entre dos poblaciones, requerida en ciertos tests, y (c) satisfacer la hipótesis de aditividad de efectos requerida en ciertos tests. Natrella (1963) discute transformaciones para estos usos. Romeu y Ozturk (1996) dan tests gráficos de normalidad (incluso en casos multivariantes).

Las transformaciones más usuales para lograr normalidad son:

$$\xi_1(X_1) = \sqrt{X_1 - a}$$

$$\xi_2(X_1) = X_1^{1/3}$$

$$\xi_3(X_1) = \log_{10}(X_1)$$

$$\xi_4(X_1) = \arcsen \sqrt{X_1}$$

$$\xi_5(X_1) = \sinh^{-1} \sqrt{X_1}$$

Si una de estas, por ejemplo $\xi(X_1)$, se distribuye normalmente, la media y la varianza de $Y_i = \xi(X_i)$ se puede estimar por

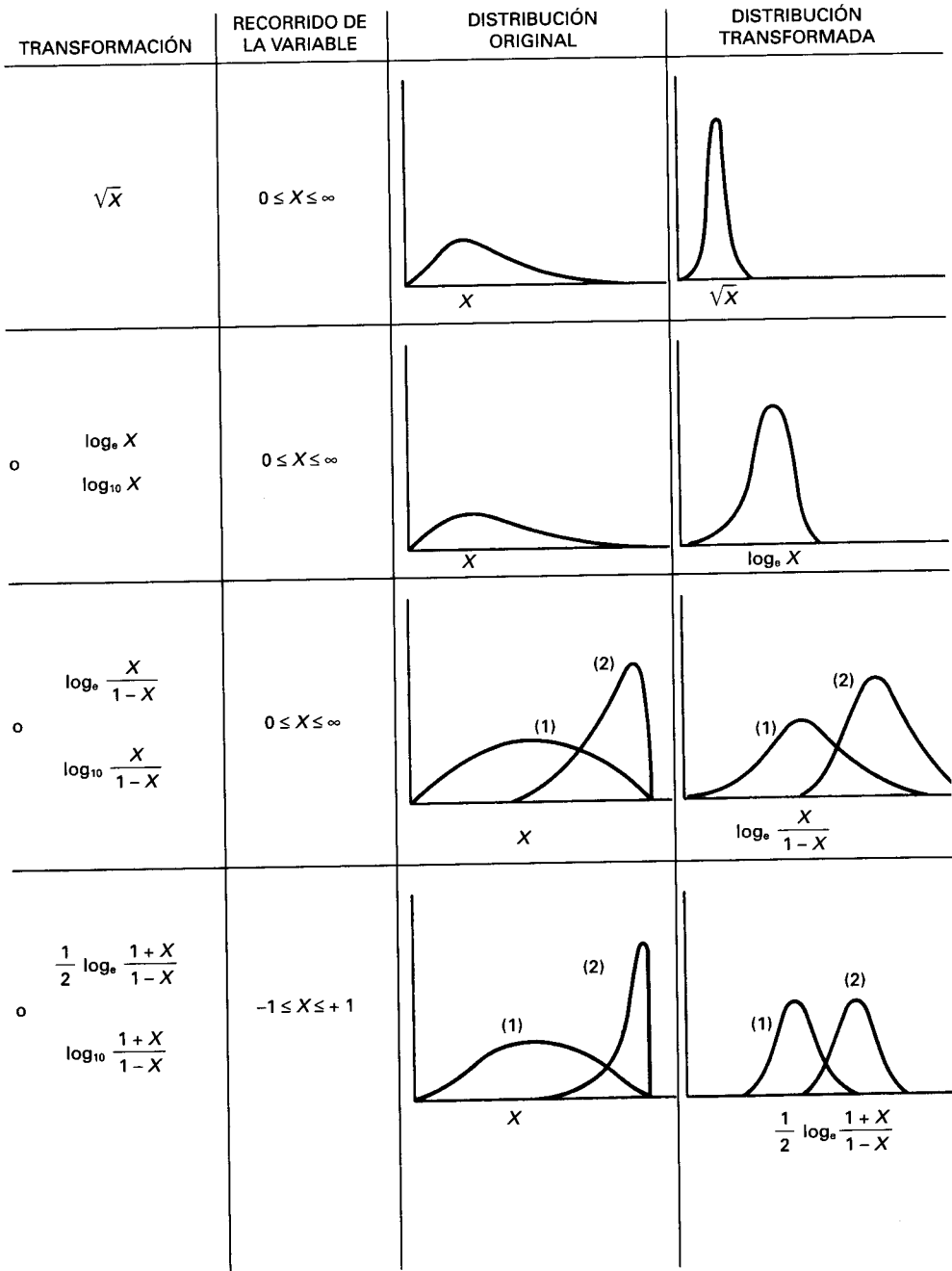


FIGURA 44.23 Resumen de algunas transformaciones.

TABLA 44.35 Transformaciones y estimadores de $E(X_1)^*$

$\xi(X_1)$	Estimador de $E(X_1)$
$\sqrt{X_1 - a}$	$\bar{Y}^2 + a + \left(1 - \frac{1}{n}\right) s_Y^2$

* Para los estimadores en los casos $\log_{10}(X_1)$, $\arcsen \sqrt{X_1}$ y $\sinh^{-1} \sqrt{X_1}$, véase Dudewicz (1983).

$$\bar{Y} = \sum_{j=1}^n \frac{Y_j}{n} \quad S_Y^2 = \sum_{j=1}^n \frac{(Y_j - \bar{Y})^2}{(n-1)}$$

Sin embargo, en la mayoría de los casos no se está interesado en el valor esperado $E\xi(X_1)$ y en la varianza $\text{Var}\xi(X_1)$, sino en la media EX_1 y en $\text{Var}(X_1)$ de la variable original. Utilizando las transformaciones inversas —por ejemplo, estimando EX_1 por $\bar{Y}^2 + a$ en el caso de ξ_1 — obtenemos una estimación sesgada. Buenos estimadores para la media de la variable X se dan en la Tabla 44.35. Buenos estimadores para la varianza de la variable X nos permiten encontrar aproximadamente intervalos con un 95 por ciento de confianza para la media de X ; tales estimaciones se dan en la Tabla 44.36. Por ejemplo, un intervalo con un 95 por ciento de confianza para la media de la variable X cuando se utiliza $\sqrt{X_1 - a}$ es

$$\bar{Y}^2 + a + \left(1 - \frac{1}{n}\right) s_Y^2 \pm 2 \sqrt{\lambda}$$

donde

$$\lambda = \frac{4}{n} s_Y^2 \bar{Y}^2 + s_Y^4 \left\{ \left(1 - \frac{1}{n}\right)^2 - \frac{n-1}{n+1} \left[1 - 2 \left(1 - \frac{1}{n}\right)^2 + 3 \left(1 - \frac{1}{n}\right)^4 \right] \right\}$$

Referencias completas están dadas en Dudewicz (1983), quien también expone procedimientos para tratar casos donde las varianzas son desiguales y los datos son normales. Es una recomendación estándar que se debe investigar la igualdad de las varianzas, incluso cuando los datos son normales. Hasta hace unos años no se ha dispuesto de procedimientos para tratar el caso de varianzas desiguales. Recientemente, Dudewicz y Dalal (1983) han mostrado cómo comparar varios procesos nuevos con un proceso estándar en esta situación; su trabajo también incluye consideraciones de no normalidad y conjuntos de datos (en su Capítulo 5) con particularidades numéricas y gráficos probabilísticos normales en un ejemplo surgido con disolventes.

Métodos de muestreo de Montecarlo. Los métodos de muestreo de Montecarlo han encontrado importantes y crecientes usos en control de calidad. Por ejemplo, Gutt y Gruska

TABLA 44.36 Estimadores de las varianzas de los estimadores de $E(X_1)^*$

$\xi(X_1)$	Estimador de la varianza del estimador de $E(X_1)$
$\sqrt{X_1 - a}$	$\frac{4}{n} s_Y^2 \bar{Y}^2 + s_Y^4 \left\{ \left(1 - \frac{1}{n}\right)^2 - \frac{n-1}{n+1} \left[1 - 2 \left(1 - \frac{1}{n}\right)^2 + 3 \left(1 - \frac{1}{n}\right)^4 \right] \right\}$

* Para los estimadores en los casos $\log_{10}(X_1)$, $\arcsen \sqrt{X_1}$ y $\sinh^{-1} \sqrt{X_1}$, véase Dudewicz (1983).

(1977) los utilizan para predecir problemas de calidad que pueden ser consecuencias de variaciones en procesos de producción o de montaje. El método está basado en ajustar distribuciones a los datos (tal como la distribución GLD discutida antes en Distribuciones continuas de probabilidad) y obtener la muestra de la distribución utilizando números aleatorios (también discutidos previamente), utilizando los datos resultantes para evaluar la actuación del sistema simulado (lo que nos permite optimizar el sistema antes de su construcción o modificación). Otros usos se han dado en optimización (Golden et al. 1984), modelización de posiciones (Golden y Eiselt 1992), elección de rutas para vehículos (Golden 1993), e inventarios para la gerencia (Dudewicz 1997). Por ejemplo, un método de optimización reciente llamado ARSTI que utiliza intervalos aleatorios (Edissonov 1994) da resultados similares en las aplicaciones anteriores. Puesto que se puede aplicar más de un método y luego seleccionar el mejor resultado, sólo se pueden obtener beneficios de la incorporación de nuevos métodos al trabajo propio [lo que en este caso es facilitado por la existencia de un programa FORTRAN para ARSTI dado por Edissonov (1994)].

Métodos de muestreo y remuestreo (Bootstrap Methods). En muchos problemas de control de calidad, las soluciones se han desarrollado suponiendo que se conoce la distribución de probabilidad de la variable que se desea controlar. En la práctica no se suele saber cuál es esta distribución, por lo que se necesita estimarla (véase anteriormente en este capítulo los apartados Selección de una distribución discreta y Selección de una distribución continua). En los *métodos de muestreo y remuestreo* no se estima la distribución de probabilidad de un conjunto de datos como se hizo en el estudio de la resistencia media a la torsión de cinco partidas de caucho fabricadas con la fórmula 1 utilizadas para ilustrar cómo se hace un test de su resistencia media: 3.067, 2.730, 2.840, 2.913 y 2.789. Es decir, no se chequea (por ejemplo) la normalidad de los datos, y sólo si el test falla hasta rechazar, se utilizan procedimientos que suponen una distribución normal de probabilidad. En vez de eso, el método de muestreo y remuestreo toma muestras aleatoriamente y con reemplazamiento a partir de los datos que tenemos y las utiliza para intentar contestar a la pregunta que nos interesa. Si se está interesado, por ejemplo, en obtener un intervalo que con un 90 por ciento de confianza contenga la resistencia media a la torsión obtenida con la fórmula 1, entonces se procede de la siguiente forma: extraer repetidamente muestras de tamaño $n = 5$ de la población básica de datos que dispongamos hasta obtener N muestras (una elección bastante común es $N = 500$; véase la Nota 1 más abajo); para cada muestra se calcula la media, con lo que se obtienen 500 medias, que las representamos por $\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_{500}$; despreciar las 25 medias menores (5 por ciento) y las 25 medias mayores (5 por ciento) de esas 500 medias de muestras, y enúnciese que el esfuerzo medio de torsión está entre el mínimo y el máximo de las restantes 450 medias de las muestras.

El método de muestreo y remuestreo es simple y atractivo; parece proporcionarnos (sin complicaciones estadísticas o matemáticas) soluciones a problemas difíciles, es decir, parece darnos «algo por nada». Dado que nunca se dan comidas gratis, deberemos ser desconfiados. En efecto, el método puede comportarse muy mal si la muestra no es lo suficientemente grande (mucho de la teoría se ha desarrollado suponiendo que el tamaño de la muestra tiende a infinito, es decir, es muy grande). Por ejemplo, supongamos que se desea obtener la máxima pluviosidad en un período de 100 años y que se tienen datos de 5 años. Sacando muestras de estos 5 años jamás se observarán pluviosidades mayores que la máxima de esos cinco. Claramente, el estudio puede conducir a consecuencias erróneas (por ejemplo, podemos recomendar la construcción de un embalse no adecuado). Por tanto, si bien el método de muestreo y remuestreo puede ser útil en muchas situaciones, está lleno de peligros. Una versión más robusta (que nos proporciona los mismos resultados cuando los tamaños de muestra son grandes, pero que no es tan frágil cuando los tamaños de muestra son pequeños) es el método de muestreo y remuestreo generalizado que se discute a continuación.

Los métodos de muestreo y remuestreo fueron utilizados desde 1967, pero no obtuvieron aceptación amplia hasta que, en su denominación inglesa, el nombre *bootstrap method* fue

introducido por B. Efron en 1979. Desde entonces han experimentado una explosión de interés. De alguna forma generalizan el método dado por Quenouille en 1949, que ganó en aceptación al ser rebautizado por J. Tukey en 1958 como el *método de la navaja (jackknife method)*. Historia, referencias y ejemplos de sus fallos (y cómo remediarlos) fueron dados por Dudewicz (1992) [véase también la Sección 15.6 de Dudewicz y Mishra (1988)].

Método generalizado de muestreo y remuestreo (Generalized Bootstrap Method). Fue introducido por Dudewicz (1992) como una generalización del método de muestreo y remuestreo y tiene mejores propiedades en el caso de muestras pequeñas (es decir, pocas observaciones). [Su discusión está en la Sección 6.6 del libro de Karian y Dudewicz (1991)]. Básicamente, con el método generalizado de muestreo y remuestreo se obtienen unas observaciones y se las ajusta por una distribución de probabilidad adecuada de una amplia familia de distribuciones, como la distribución lambda generalizada y extendida (EGLD), previamente considerada en este capítulo, de la que se tomarán aleatoriamente muestras. Por tanto, en el contexto de las cinco partidas de caucho consideradas antes en el apartado de los Métodos de muestreo y remuestreo, se ajustan los cinco datos con una distribución lambda generalizada y extendida (EGLD). Entonces se extraen 500 muestras aleatorias de cinco elementos cada una de la distribución lambda *ajustada* (y no de los cinco datos básicos de los que habíamos partido), y el análisis continúa como en el Método del muestreo y remuestreo considerado previamente. Recientes estudios han probado que este método mejora al del muestreo y remuestreo cuando se parte de pocos puntos (y también si se parte de muchos puntos) [en Sun y Dietland-Müller (1996), por ejemplo, se encuentra una excelente exposición con ejemplos basados en datos reales].

Los métodos de muestreo y remuestreo, especialmente en la forma de muestreo y remuestreo generalizado, sugieren ajustar un modelo a los datos (por ejemplo el modelo de Poisson u otro modelo) y entonces (asumiendo que el ajuste pasa el test, en la forma que consideramos antes en Tests para validación de modelos) se utiliza el modelo en el análisis, que puede ser el muestreo y remuestreo. [El método generalizado de muestreo y remuestreo nos permite considerar la posibilidad de que aparezcan tres o más «manchas» (datos significativamente distintos de los inicialmente considerados) en el futuro, en tanto que el método del muestreo y remuestreo —que no es recomendado— nos dice que la probabilidad de aparición de tres o más datos anómalos en el futuro es cero, pues no se observan tres o más datos anómalos en el conjunto de datos que tenemos].

Nota 1: La literatura estadística recomienda la utilización de como mínimo un número de elementos en cada muestra igual a $N = 200$. Un trabajo reciente de Sun y Müller-Schwarze (1996, pp. 482-483) sugiere que se mejore la exactitud exigiendo como mínimo $N = 500$ elementos en cada muestra. El número de elementos en cada muestra no debe confundirse con el tamaño del conjunto de datos disponible (véase la Nota 2).

Nota 2: Los métodos de muestreo y remuestreo se utilizan mucho para tamaños de muestra pequeños [como, por ejemplo, 9 en Sun y Müller-Schwarze (1996)] por la necesidad de extraer conclusiones fiables partiendo de conjuntos de datos pequeños (con frecuencia obtenidos con considerable esfuerzo y en un largo período de tiempo, por ejemplo 10 años en los datos de Sun y Müller-Schwarze). Recomendando encarecidamente el método generalizado de muestreo y remuestreo en los casos de disponer de menos de 100 datos.

Análisis de conglomerados (clúster) y análisis discriminante. Los *análisis clúster* y *discriminante* son parte de una área estadística llamada *análisis multivariante* (Siotani et al. 1985). Un problema típico donde estos métodos son utilizados en control de calidad es cuando distintas disfunciones en un centro productivo provocan la aparición de productos fuera de las especificaciones de ingeniería. Con frecuencia es difícil determinar las causas de la disfun-

TABLA 44.37 Medidas de dos longitudes (L_1 , L_2) y dos anchuras (W_1 , W_2) de 150 elementos en centímetros (50 de cada uno de los tipos $T = 1, 2, 3$)*

L_1	W_1	L_2	W_2	T
50	33	14	02	1
64	28	56	22	3
65	28	46	15	2
67	31	56	24	3
63	28	51	15	3
46	34	14	03	1
69	31	51	23	3
62	22	45	15	2
59	32	48	18	2
46	36	10	02	1
61	30	46	14	2
60	27	51	16	2
65	30	52	20	3
56	25	39	11	2
65	30	55	18	3
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.

* Para ahorrar espacio sólo se han mostrado las medidas de 15 individuos.

ción en cada caso. Entonces el análisis clúster permite agrupar cierto número de casos en grupos (llamados los clústers) que pueden mostrar causas conectadas mediante factores comunes en los clústers (es decir, este método nos lleva a preguntarnos: «¿Qué es lo que los casos con disfunciones diferentes agrupados en un clúster tienen en común?»).

Como un ejemplo de la potencia del análisis discriminante, Fisher (1936) dio los datos de la Tabla 44.37. [Los datos completos aparecen en Dixon (1983, p. 520)]. Consiste en dos medidas de longitud y dos de anchura en cada una de las piezas de tres variedades diferentes que se encuentran en cierto lugar. Deseamos conocer: ¿con qué fiabilidad se pueden clasificar las variedades por las dos medidas de longitud y las dos de anchura (estas piezas se pueden clasificar por un análisis más minucioso sin ningún error). Después de que estos datos entran en un ordenador, podemos contestar a esta cuestión utilizando el programa 7M del BMDP (Dixon 1983). La codificación del programa se da en la Figura 44.24. La clave de los resultados obtenidos son las denominadas *variables canónicas*, que son las combinaciones lineales entre L_1 , L_2 , W_1 y W_2 que mejor discriminan entre los tres grupos. En este ejemplo, las variables canónicas resultan ser:

$$V_1 = 2,10510 + 0,82938L_1 + 1,53447W_1 - 2,20121L_2 - 2,81046W_2$$

$$V_2 = -6,66174 + 0,02410L_1 + 2,16452W_1 - 0,93192L_2 + 2,83919W_2$$

```
// EXEC BIMED, PROG = BMDP 7M
/problem title is 'fisher data'
/input variables are 5. format is '(4f3.1, f3.0)'
/variable names are L1, W1, L2, W2, t.
grouping is t.
/group codes (5) are 1 to 3.
names (5) are set, ver, vir.
/end
```

FIGURA 44.24 Programa BMDP 7M para análisis de conjunto de datos.

La representación de los pares de valores (V_1 , V_2) para los 150 datos se da en la Figura 44.25, con las tres variedades $T = 1, 2$ y 3 etiquetadas por A, B y C , respectivamente, lo que prueba los excelentes resultados obtenidos. Estos resultados se consideran excelentes porque nos permiten con una alta probabilidad clasificar una futura observación en el grupo correcto. Por ejemplo, si encontramos $V_1 = 7,20$ y $V_2 = 1,00$, estamos casi seguros de que se trata de una pieza de la variedad A . (Este dibujo lo produce el programa 7M).

Discriminación heterocedástica. Los métodos tradicionales de discriminación asumen que se conoce que las varianzas son iguales y no han sido capaces de obtener que la probabilidad de clasificación errónea sea inferior a 0,01. Sin embargo, debido al desarrollo del método de la heterocedasticidad [véase Dudewicz (1995) para una recensión], esto es ahora posible en ciertos casos y se espera que se pueda extender a más casos en los próximos años. En otros casos, el objetivo puede ser estimar el solapamiento (más que discriminar directamente las poblaciones); para estos métodos, véanse Mulekar y Mishra (1997).

Selección del mejor frente al test de hipótesis. Con los tests de hipótesis se puede (por ejemplo con el marco del Test 2 de la Tabla 44.31) evaluar si se puede rechazar la afirmación de que las medias de las dos poblaciones sean iguales. En tanto que esta pregunta es apropiada en

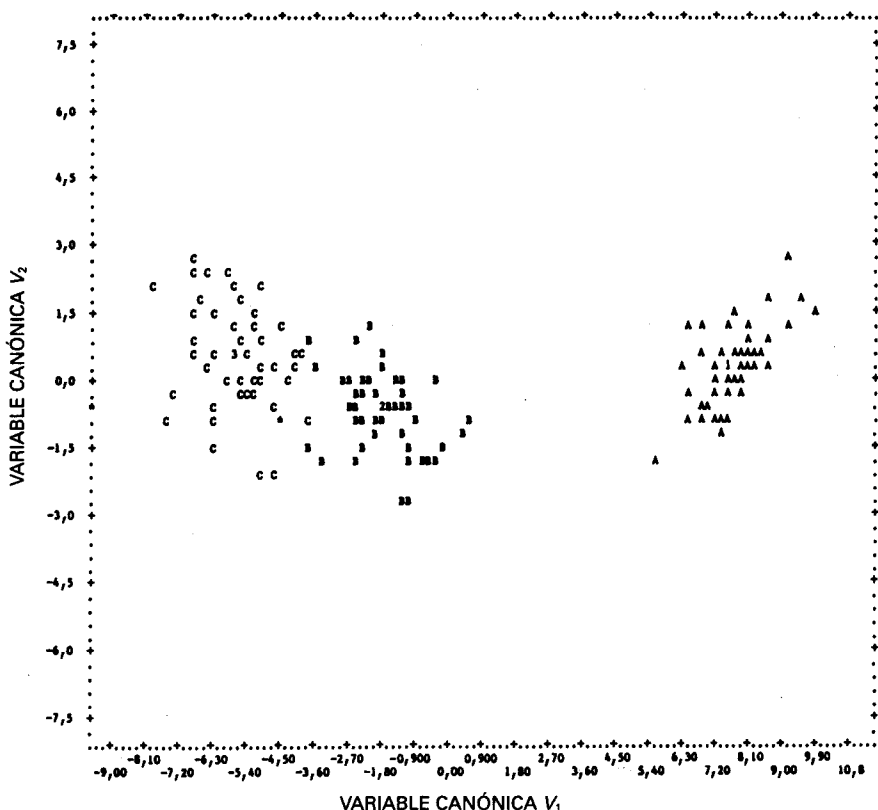


FIGURA 44.25 Gráfico mostrando la discriminación de los grupos (A, B, C) por las «variables canónicas» V_1 y V_2 . El solape entre los grupos se indica con *.

algunas situaciones, hay otras situaciones en que se conoce a priori que se debe seleccionar una u otra de las dos poblaciones y se desea seleccionar la de mayor media (llamada la «mejor» población). Procedimientos para esta situación fueron publicados primero por R. E. Bechhofer en 1954, y desde entonces, alrededor de 500 publicaciones y varios libros han sido dedicados a este problema. [Para una lista clasificada y recensiones, véanse Dudewicz y Koo (1982)].

Ejemplo de selección del mejor: Supongamos que consideramos dos formulaciones de caucho y deseamos seleccionar la que tiene mayor resistencia a la tracción. Fabricamos $n_0 = 5$ lotes con cada fórmula y comprobamos la resistencia a la tracción con los siguientes resultados:

Fórmula 1	Fórmula 2
3.067	3.200
2.730	2.777
2.840	2.623
2.913	3.044
2.789	2.834

Deseamos estar seguros al 95 por ciento de que la resistencia media a la tracción de la formulación seleccionada no dista más de $\delta^* = 120$ unidades de la mejor formulación. Entonces calculamos $s_1^2 = 16.923,7$ y $s_2^2 = 51.713,3$ con las primeras cinco muestras y cogemos más observaciones (ya que al no conocer las varianzas en las primeras muestras no podemos calcular cuántas muestras se necesitan en total). Los tamaños de muestra total necesitados son:

$$\begin{aligned} n_1 &= \max\{n_0 + 1, (s_1 h / \delta^*)^2\} = \max\{5 + 1, [130,09](3,11)/120\}^2\} \\ &= \max(6, 11,4) = 12 \\ n_2 &= \max\{n_0 + 1, (s_2 h / \delta^*)^2\} = \max\{5 + 1, [227,41](3,11)/120\}^2\} \\ &= \max(6, 34,7) = 35 \end{aligned}$$

donde $h = h_{n_0}(k, P^*) = h_5(2, 0,95)$ se obtiene con la Tabla 44.30 (con $k = 2$ debido a que estamos buscando la mejor de dos poblaciones, $P^* = 0,95$ porque deseamos un 95 por ciento de certeza, y $n_0 = 5$ debido a que las primeras muestras constaban de cinco observaciones). Entonces tomamos $n_1 - 5 = 12 - 5 = 7$ observaciones más de la fórmula 1 y $n_2 - 5 = 35 - 5 = 30$ observaciones más de la fórmula 2. Entonces calculamos la media $\bar{X}_1$ de la muestra de las 12 observaciones de la fórmula 1 y la media $\bar{X}_2$ de la muestra de las 35 observaciones de la fórmula 2, seleccionando la fórmula que produce el máximo entre $\bar{X}_1$ y $\bar{X}_2$, afirmando que esa fórmula produce la mayor media (o una media no inferior en 120 unidades de la resistencia media a la tensión de la mejor fórmula). Por ejemplo, si encontramos $\bar{X}_1 = 3.067$ y $\bar{X}_2 = 2.895$, seleccionamos la fórmula 1. Entonces podemos afirmar con una confianza del 95 por ciento que la fórmula 1 es o la mejor fórmula o (en cualquier caso) tiene una resistencia media a la tensión no inferior en 120 unidades a la media de la fórmula mejor (si no es la mejor).

También hay disponibles procedimientos para la selección del mejor entre más de dos poblaciones [véase Sección 6.3 de Karian y Dudewicz (1991)]; esencialmente se utiliza el mismo procedimiento utilizando la k apropiada cuando se busca h en la Tabla 44.30.

ANÁLISIS DE REGRESIÓN Y CORRELACIÓN

Muchos problemas de control de calidad exigen estimar la relación entre dos o más variables. Con frecuencia el interés se centra en encontrar la relación entre una variable particular y un

TABLA 44.38 Vida de la herramienta (Y en minutos) respecto a la velocidad de corte (X en pies por minuto)

Y	X
41	90
43	90
35	90
32	90
22	100
35	100
29	100
18	100
21	105
13	105
18	105
20	105
15	110
11	110
6	110
10	110

conjunto de una o más variables. Por ejemplo, ¿cómo varía la vida de una herramienta con la velocidad de corte? O ¿cómo varía el número de octanos de una gasolina con su porcentaje de pureza?

El *análisis de regresión* es una técnica estadística para la estimación de los parámetros de una ecuación que relaciona una variable particular con un conjunto de variables. (Algunos autores se refieren a esta técnica como técnica de *mínimos cuadrados* o *curva de ajuste*). La ecuación resultante se llama *ecuación de regresión*.

Algunos resultados experimentales del ejemplo de la vida de una herramienta están dados en la Tabla 44.38 [de Johnson y Leone (1964, p. 380)] y están representados en la Figura 44.26. La vida de la herramienta es la *variable de respuesta* (también llamada *variable dependiente* o *variable que se predice*), y la velocidad de corte es la *variable independiente* (también llamada *variable predictora*). En este caso, la variable independiente es controlable; es decir, está fijada por el técnico o por el operario que trabaja con la máquina. En el segundo ejemplo, tanto el número de octanos como el porcentaje de pureza son aleatorios. Los datos de este ejemplo (de Volk en 1956) se dan en la Tabla 44.39 y están repre-

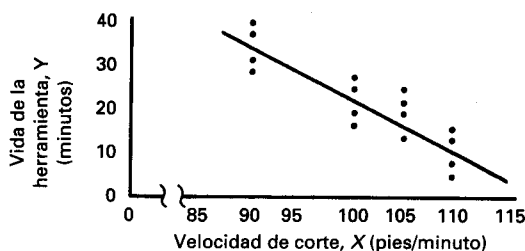
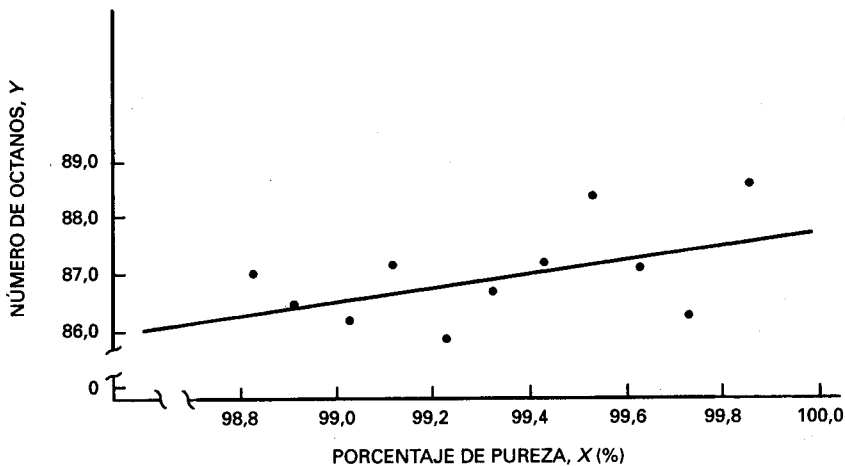
**FIGURA 44.26** Vida de la herramienta (Y) respecto a la velocidad de corte (X).

TABLA 44.39 Número de octanos (Y) respecto al porcentaje de pureza (X)

Y	X
88,6	99,8
86,4	99,7
87,2	99,6
88,4	99,5
87,2	99,4
86,8	99,3
86,1	99,2
87,3	99,1
86,4	99,0
86,6	98,9
87,1	98,8

sentados en la Figura 44.27. Dado que el propósito es predecir el número de octanos, consideramos esta variable como la dependiente, en tanto que el porcentaje de pureza se considera como la variable independiente. (En muchos problemas hay muchas variables independientes, y en algunos casos este conjunto de variables independientes incluye tanto variables aleatorias como controlables).

Los cálculos en un problema de regresión de dos variables se puede hacer muy fácilmente con una calculadora, pero cuando hay muchas variables, la cantidad de cálculos resulta abrumadora. (Incluso en el caso de dos variables, muchos de los programas disponibles no proporcionan cálculos exactos. Se recomienda encarecidamente no hacer programas propios de regresión y que se utilicen paquetes informáticos contrastados, como el SAS, BMDP...). El número de variables no es una restricción en los programas de regresión múltiple cuando se utilizan ordenadores modernos. Para comprender e interpretar los problemas multidimensionales es necesario un conocimiento profundo de los casos de dos y tres variables.

**FIGURA 44.27** Número de octanos respecto al porcentaje de pureza.

Hay muchas razones para construir ecuaciones de regresión, que aunque no afectan a los cálculos, sí que intervienen en la interpretación de los resultados. En algunos casos el análisis de regresión se utiliza para describir la naturaleza de las relaciones de una forma cuantitativa. A menudo los *propósitos* son más específicos. En el primer ejemplo, cuando la velocidad de corte es controlable, el objetivo puede ser encontrar la velocidad de corte que minimiza el desgaste de la herramienta o alguna función de coste basada en el desgaste de la herramienta. La regresión con mínimos cuadrados también se puede utilizar para determinar las variables independientes importantes de un proceso; por ejemplo, si las variables de proceso humedad, presión o temperatura afectan a una característica de calidad del producto como la resistencia.

En otros problemas, cuando la variable independiente no es controlable, el objetivo puede ser predecir el valor de la variable dependiente (o resultado). Esto se puede hacer porque la variable independiente es más fácil de medir que la variable dependiente. O porque la variable independiente está disponible antes que la variable dependiente, y por tanto puede ser deseable predecir el valor de la variable dependiente antes de que se produce el resultado del proceso. En otros casos nos puede permitir reemplazar un test destructivo por un test no destructivo.

La siguiente lista incluye algunos *usos de las ecuaciones de regresión*:

1. Pronóstico y predicción.
2. Descripción cuantitativa de las relaciones entre una variable particular y otro conjunto de variables.
3. Interpolación entre los valores de una función.
4. Determinación de la importancia de las variables independientes.
5. Determinación del óptimo en unas condiciones operativas.
6. Discriminación entre modelos alternativos.
7. Estimación de coeficientes de regresión.

Para cualquiera de los objetivos establecidos, las *etapas básicas en un estudio de regresión* son las del listado para planificación de la experimentación dada al comienzo de este capítulo. Un resumen, específico para las etapas de la regresión, es:

1. Obtener un establecimiento claro de los objetivos del estudio. Determinar qué variable debe ser la variable de respuesta y qué variables deben incluirse como variables independientes. Además se debe obtener una cierta medida de la precisión de los resultados requeridos; no necesariamente en terminología estadística. (Es importante tener una comprensión completa de qué uso se va a hacer de la ecuación de regresión, pues esto puede excluir la utilización de ciertas variables en la ecuación y también puede ayudar a comprender cuánto esfuerzo y dinero puede ser dedicado al proyecto).
- 2, 3. Especificar un conjunto de procedimientos para los datos. Recoger los datos. (El resultado final sólo puede ser tan bueno como los datos en los que está basado. Una planificación cuidadosa de esta etapa es de considerable importancia y puede simplificar el análisis de los datos).
4. Dibujar diagramas de dispersión (gráficos de una variable frente a otra variable) de los datos para obtener información de las relaciones entre las variables; examinar los datos; calcular la ecuación de regresión, y evaluar cómo ajusta a los datos (incluyendo el considerar transformaciones de las variables para obtener un mejor ajuste, o quitar variables de la ecuación si no mejoran la predicción). Dar medidas de la precisión de la ecuación y un procedimiento para utilizar la ecuación. Especificar también procedimientos para actualizar la ecuación y comprobaciones para determinar cuándo es aplicable, incluyendo gráficos de control para los residuos (también gráficos de valores observados frente a valores predichos). (En el Capítulo 45, «Control estadístico del proceso», se discuten los gráficos de control).
- 5, 6, 7. Como en el listado de planificación de la experimentación.

Muchos textos se han escrito sobre la regresión, incluyendo Daniel y Wood (1971) y Draper y Smith (1981). Incluyen programas informáticos y resultados. Dudewicz y Karian (1985) también discuten cuestiones de estructura en detalle. Además de la regresión, otras técnicas han sido inventadas para el análisis multivariante de datos; véanse Kramer y Jensen (1969, 1970) y Siotani et al. (1985) para detalles. (Una de esas técnicas son los análisis discriminante y clúster, ya discutidos en este capítulo).

Nuestra discusión de la regresión comienza con un problema con una sola variable independiente (o predictora) y luego continúa con problemas con más de una variable predictora y una discusión de programas informáticos y de resultados obtenidos, con su interpretación. Muchos textos resaltan aspectos matemáticos avanzados de la regresión, lo que no es necesario para su comprensión práctica, dada la alta calidad del software disponible; por ello no encontramos necesario tales matemáticas, lo que hace que el importante tema de la regresión pueda ser accesible a muchos profesionales de la calidad.

Regresión lineal simple. En muchos problemas se considera sólo una variable independiente X . (La variable dependiente Y suele estar relacionada con otras variables independientes, que se han mantenido constantes durante la experimentación o que sus efectos se han considerado que son mucho menores que los de la variable X). A estos problemas se les refiere como problemas de *regresión lineal simple*.

Representación gráfica de los datos. Una primera etapa en el estudio de las relaciones entre variables es la representación gráfica de los datos (con frecuencia llamada *diagrama de dispersión*). Por convenio, se representa la variable dependiente en el eje vertical y la independiente en el eje horizontal. Un gráfico puede suministrar una gran cantidad de información relativa a las relaciones entre variables y con frecuencia sugiere posibles modelos para los datos. Los datos dibujados en la Figura 44.26 sugieren que Y está linealmente relacionada con X en el rango del experimento. (Si este no fuese el caso, distintas transformaciones de los datos, así como relaciones curvilíneas, se podrían considerar. Con frecuencia las relaciones se «linearizan» tomando logaritmos en una o ambas de las variables).

Un gráfico también puede indicar si alguna de las observaciones son atípicas (*outliers*), es decir, observaciones que se desvían significativamente del resto de datos. (Los valores atípicos se pueden deber a errores de medición o de registro, en cuyo caso deben ser corregidos o eliminados. También pueden ser debidos a cambios del proceso u otras causas, y la investigación de estos cambios o causas puede suministrar más información que el análisis del resto de los datos). No parece que haya datos atípicos en la Figura 44.26.

Una inspección más detenida del gráfico puede dar una indicación de la variabilidad de Y para un valor fijo de X . En el último caso considerado, el método de los mínimos cuadrados ponderados (véase en Draper y Smith 1981) debe ser preferido a la técnica estándar de los mínimos cuadrados que se discute aquí.

El modelo. Después de representar los datos, queremos obtener una ecuación que relacione Y con X . Para hacer esto se debe postular un modelo para los datos. (Hago hincapié en que el modelo propuesto puede ser modificado durante el curso del estudio y que es un punto de partida).

Un posible modelo para los datos de la Figura 44.26 es

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \epsilon$$

donde β_0 y β_1 son, respectivamente, las desconocidas ordenada en el origen y pendiente de la recta de regresión. El modelo asume que Y es una función lineal de X más un término de error aleatorio, denotado por ϵ . Este error aleatorio, llamado *error de la ecuación*, puede ser debido a errores en las medidas de Y y/o a los efectos de variables no incluidas en el modelo. Se supone que los valores de X se miden con error despreciable. Para los datos de la Figu-

ra 44.26, los valores de X fueron fijados; sin embargo, se puede utilizar el mismo modelo cuando los valores de la variable X son aleatorios como en la Figura 44.27.

Estimación de la ecuación de predicción. El objetivo es encontrar las estimaciones (b_0 , b_1) de los parámetros desconocidos (β_0 , β_1) y así obtener la ecuación de predicción

$$\hat{Y} = b_0 + b_1X$$

donde $\hat{Y}$ es el valor predicho de Y para un valor dado de X .

Los mínimos cuadrados nos dan un método de encontrar estimaciones de esos parámetros a partir de un conjunto de N observaciones (Y_1, X_1), ..., (Y_N, X_N). Esta estimación se llama *estimación por mínimos cuadrados*, ya que minimiza la suma de los cuadrados de las desviaciones entre los valores observados y los valores predichos para la variable de respuesta $\Sigma(Y_m - \hat{Y}_m)^2 = \Sigma(Y_m - b_0 - b_1X_m)^2$. Estas ideas se ilustran en la Figura 44.28. (Para una deducción matemática de esta estimación, véase alguno de los textos citados en la introducción).

Si (1) las observaciones son independientes, (2) la varianza de los errores es constante en esas observaciones, y (3) el modelo lineal postulado es correcto, las estimaciones por mínimos cuadrados de b_0 y b_1 son las «mejores estimaciones lineales insesgadas»: entre las posibles estimaciones lineales insesgadas de esos parámetros, la estimación por mínimos cuadrados produce errores con mínima varianza. (Incluso si estas condiciones no se satisfacen, se puede utilizar la técnica de mínimos cuadrados, si bien modificaciones u otros métodos pueden suministrar mejores estimaciones). Obsérvese que no se ha hecho ninguna hipótesis respecto a la distribución del término de error, y en particular no se ha asumido que tenga una distribución normal. No hace falta ninguna hipótesis respecto al error hasta que se construyan intervalos de confianza y tests de hipótesis.

Las estimaciones por mínimos cuadrados de los parámetros del modelo lineal $Y = \beta_0 + \beta_1X + \epsilon$ son:

$$b_1 = \frac{\Sigma(X_m - \bar{X})(Y_m - \bar{Y})}{\Sigma(X_m - \bar{X})^2}$$

$$b_0 = \bar{Y} - b_1\bar{X}$$

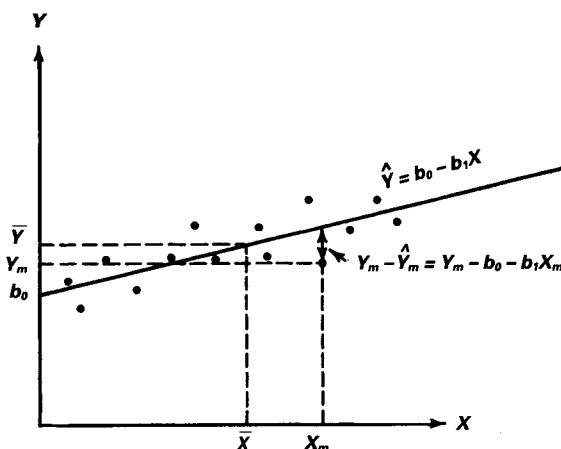


FIGURA 44.28 Mínimos cuadrados.

donde $\bar{X} = \Sigma X_m / N$ e $\bar{Y} = \Sigma Y_m / N$ son simples medias aritméticas. El recorrido de estas sumas es desde $m = 1$ hasta $m = N$. (Salvo que sea necesario, se simplificará la tipografía omitiendo la notación adicional del recorrido de los índices).

Puede verse que b_1 está relacionado con el coeficiente de correlación muestral

$$r = \frac{\Sigma(X_m - \bar{X})(Y_m - \bar{Y})}{\sqrt{\Sigma(X_m - \bar{X})^2 \Sigma(Y_m - \bar{Y})^2}}$$

por

$$b_1 = r \sqrt{\frac{\Sigma(Y_m - \bar{Y})^2}{\Sigma(X_m - \bar{X})^2}}$$

Sin embargo, el concepto de correlación es significativo sólo cuando ambas variables son aleatorias, en tanto que b_1 , la estimación por mínimos cuadrados de la variación de Y por unidad de variación de X , tiene significado tanto para el caso en que X sea una variable aleatoria como cuando sea una variable controlable o fija.

Las sumas, sumas de cuadrados y sumas de productos cruzados para los datos ($N = 16$) dados en la Tabla 44.38 son:

$$\Sigma X_m = 90 + 90 + \dots + 110 = 1.620$$

$$\Sigma Y_m = 41 + 43 + \dots + 10 = 369$$

$$\Sigma X_m^2 = 8.100 + 8.100 + \dots + 12.000 = 164.900$$

$$\Sigma Y_m^2 = 1.681 + 1.849 + \dots + 100 = 10.469$$

$$\Sigma X_m Y_m = 3.690 + 3.870 + \dots + 1.100 = 36.170$$

(Debido a su complejidad, los cálculos de la regresión son muy sensibles a los errores humanos y numéricos. Por ello se necesita un buen software. Los ejemplos numéricos de este capítulo se pueden utilizar tanto para comprobar el conocimiento del software como su exactitud).

Los estadísticos se calculan con las siguientes fórmulas:

$$\bar{X} = \Sigma X_m / N = 101,25 \quad \bar{Y} = \Sigma Y_m / N = 23,06$$

$$\Sigma(X_m - \bar{X})^2 = \Sigma X_m^2 - \frac{(\Sigma X_m)^2}{N} = 164.900 - \frac{(1.620)^2}{16} = 875,00$$

$$\Sigma(Y_m - \bar{Y})^2 = \Sigma Y_m^2 - \frac{(\Sigma Y_m)^2}{N} = 10.469 - \frac{(369)^2}{16} = 1.958,94$$

$$\begin{aligned} \Sigma(X_m - \bar{X})(Y_m - \bar{Y}) &= \Sigma X_m Y_m - \frac{\Sigma X_m \Sigma Y_m}{N} \\ &= 36.170 - \frac{(1.620)(369)}{16} \\ &= -1.191,25 \end{aligned}$$

A partir de estos resultados, las estimaciones por mínimos cuadrados se pueden calcular como

$$b_1 = \frac{-1.191,25}{875} = -1,3614$$

$$b_0 = 23,06 - (-1,3614)(101,25) = 160,9018$$

y por tanto la ecuación de predicción es

$$\hat{Y} = 160,90 - 1,3614X$$

La ecuación de predicción se escribe a veces en diferencias respecto a las medias, es decir, $\hat{Y} = \bar{Y} + b_1(X - \bar{X})$, que en este ejemplo es

$$\hat{Y} = 23,06 - 1,3614(X - 101,25)$$

Análisis de la ecuación de predicción. Después de estimar los coeficientes de la ecuación de predicción, se debe representar la gráfica de la ecuación sobre los datos para observar los grandes errores de cálculo, si los hubiere. Aproximadamente la mitad de los puntos deben estar por encima de la recta y la otra mitad por debajo. Además, la ecuación debe pasar exactamente por el punto $(\bar{X}, \bar{Y})$.

Existen muchos criterios para valorar la adecuación de la ecuación de predicción. Una medida muy utilizada de la adecuación de la ecuación de predicción es la proporción R^2 de varianza explicada. El cálculo de R^2 se consigue descomponiendo en dos partes la suma de los cuadrados de las diferencias $Y_m - \bar{Y}$, una es la suma de los cuadrados debida a la regresión y la otra es la suma de los cuadrados de los residuos:

$$\begin{aligned}\Sigma(Y_m - \bar{Y})^2 &= \text{SC(REG)} + \text{SC(RES)} \\ &= \Sigma(\hat{Y}_m - \bar{Y})^2 + \Sigma(Y_m - \hat{Y}_m)^2 \\ &= b_1 \Sigma(X_m - \bar{X})(Y_m - \bar{Y}) + \Sigma(Y_m - \hat{Y}_m)^2\end{aligned}$$

Por esta relación, la proporción de variación $\Sigma(Y_m - \bar{Y})^2$ explicada por la regresión se calcula así:

$$\begin{aligned}R^2 &= \frac{\text{SC(REG)}}{\Sigma(Y_m - \bar{Y})^2} \\ &= \frac{b_1 \Sigma(X_m - \bar{X})(Y_m - \bar{Y})}{\Sigma(Y_m - \bar{Y})^2} \\ &= \frac{(-1,3614)(-1.191,25)}{1.958,94} = 0,828\end{aligned}$$

En este ejemplo, la ecuación de predicción explica el 82,8 por ciento de la variación de la vida de la herramienta.

Otra interpretación de R^2 (cuando las variables dependiente e independiente son aleatorias) es como el cuadrado del coeficiente de correlación múltiple de la muestra. Cuando sólo hay una variable independiente, entonces R^2 se reduce al cuadrado del coeficiente de correlación muestral r definido antes.

Si bien R^2 es una medida útil de la adecuación de la ecuación de predicción, una estimación de la variabilidad de las Y alrededor de la ecuación de regresión es normalmente una medida más importante. Puede utilizarse tanto la varianza muestral s^2 como su raíz cuadrada s . Se prefiere esta última por tener las mismas unidades que Y . Ambas, así como otros resultados, se pueden obtener con el análisis de varianza (ANOVA) dado en la Tabla 44.40.

TABLA 44.40 Tabla ANOVA (Modelo lineal)

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
1. Debida a la regresión (b_1)	$b_1 \Sigma (X_m - \bar{X})(Y_m - \bar{Y})$	1	CM(REG) = SC(REG)/1
2. Residual	$\Sigma (Y_m - \hat{Y}_m)^2 *$	$N - 2$	CM(RES) = SC(RES)/(N-2)
3. Total corregida respecto a la media	$\Sigma (Y_m - \bar{Y})^2$	$N - 1$	

* Obtenida restando (1) de (3).

La suma total de cuadrados corregida (también llamada respecto a la media) y la suma de cuadrados de la regresión se deducen de los estadísticos y del coeficiente de regresión estimado [algunos autores incluyen la suma total de cuadrados, no corregida, en la tabla ANOVA, dividiéndola en dos partes: la suma corregida de cuadrados y la suma de cuadrados debida a $\bar{Y}$ (o b_0) (véanse Draper y Smith 1981)]. Aunque la suma residual de cuadrados se puede calcular directamente, es más sencillo obtenerla como diferencia entre la suma total de cuadrados corregida y la suma de cuadrados debida a la regresión. Cada una de estas sumas de cuadrados tiene un número de grados de libertad asociado (véase Test de hipótesis cuando el tamaño de la muestra está fijado inicialmente). La suma total de cuadrados corregida tiene $N - 1$ grados de libertad, pues un grado de libertad se utiliza en la estimación de la media. Para este modelo de *una*-variable, hay *un* grado de libertad asociado con la suma de cuadrados de la regresión, dejando $(N - 1) - 1 = N - 2$ grados de libertad asociados con la suma de los cuadrados de los residuos. Los cuadrados medios (CM) se calculan dividiendo las sumas de cuadrados por sus grados de libertad asociados. La estimación de la varianza de Y alrededor de la recta de regresión es $s_e^2 = \text{CM(RES)}$, y el error estándar de esta estimación es $s_e = \sqrt{\text{CM(RES)}}$.

A partir de los cuadrados medios, el estadístico F se calcula por

$$F_{\text{CALC}} = \frac{\text{CM(REG)}}{\text{CM(RES)}}$$

Si (1) los ϵ en el modelo inicial se distribuyen normalmente con varianza constante, (2) las observaciones son independientes, y (3) el modelo lineal postulado es correcto, entonces se puede aplicar un test para determinar si es o no significativa la hipótesis estadística

$$H_0: \beta_1 = 0$$

frente a la hipótesis alternativa

$$H_1: b_1 \neq 0$$

comparando F_{CALC} con la F_{TAB} a un nivel adecuado de significación α . Si la $F_{\text{CALC}} > F_{\text{TAB}}$, concluimos que la regresión es significativa y que la ecuación de predicción es un predictor de Y mejor que $\bar{Y}$. Si bien es difícil comprobar las hipótesis establecidas antes, el test no es demasiado sensible a desviaciones en la distribución de los ϵ de la distribución normal si el número de observaciones es grande. Si los valores de la variable X son aleatorios, este test debe ser interpretado en un sentido condicional, es decir, «dados estos valores de la variable X ...».

Para el ejemplo, la tabla de análisis de varianza (ANOVA) se da en la Tabla 44.41 (véase Capítulo 26, bajo Diseño completamente aleatorio: un factor, k niveles). La regresión es significativa para el nivel de confianza $\alpha = 0,01$ (pues $F_{\text{TAB}} = 8,86$) y $s_e = \sqrt{24,08} = 4,91$.

TABLA 44.41 Ejemplo ANOVA

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F_{CALC}
1. Debida a la regresión	1.621,80	1	1.621,80	67,35
2. Residual	337,14	14	24,08	
3. Total corregida respecto a la media	1958,94	15	 	

Es importante señalar que aunque la regresión sea significativa, la variabilidad no explicada puede ser todavía grande, y la ecuación de predicción puede no tener ningún valor.

Residuos, valores atípicos (outliers), intervalos de confianza y predicción, extrapolación; falta de ajuste. Observaciones repetidas. Si es factible hacer repeticiones, es decir, obtener más de una observación de la variable Y en alguno o algunos valores de la variable X , se puede aplicar un test para obtener la adecuación del modelo. (A veces una estimación del error puro puede estar disponible por fuentes externas al experimento). En este caso, la SC(RES) se divide en dos partes: la debida al error puro, SC(EP), y la debida a la falta de ajuste, SC(FA).

Supongamos que tenemos N_m lecturas $Y_{m1}, Y_{m2}, \dots, Y_{mN_m}$, en X_m , donde $m = 1, 2, \dots, k$. La contribución de la suma de cuadrados debida al error puro en X_m es

$$\sum_{j=1}^{N_m} (\hat{Y}_{mj} - \bar{Y}_m)^2 = \sum_{j=1}^{N_m} Y_{mj}^2 - \frac{\left(\sum_{j=1}^{N_m} Y_{mj} \right)^2}{N_m}$$

y el número de grados de libertad asociado es $N_m - 1$. La SC(EP) es la suma de las k contribuciones, y el número de grados de libertad asociado (GL) es

$$\sum_{m=1}^k (N_m - 1) = \sum_{m=1}^k N_m - k$$

Para el ejemplo dado en la Tabla 44.38,

X_m		SC(EP)	GL
90	$41^2 + 43^2 + 35^2 + 32^2 - (151)^2/4 =$	78,75	3
100	$22^2 + 35^2 + 29^2 + 18^2 - (104)^2/4 =$	170,00	3
105	$21^2 + 13^2 + 18^2 + 20^2 - (72)^2/4 =$	38,00	3
110	$15^2 + 16^2 + 6^2 + 10^2 - (42)^2/4 =$	41,00	3
	Total	327,75	12

La SC(FA) se obtiene restando, pues,

$$SC(FA) = SC(RES) - SC(EP) = 337,14 - 327,75 = 9,39$$

y los grados de libertad de la falta de ajuste se obtienen de forma similar como $14 - 12 = 2$. Los cuadrados medios se obtienen dividiendo la suma de cuadrados por los grados de libertad correspondientes y

$$F_{\text{CALC}} = \frac{CM(FA)}{CM(EP)}$$

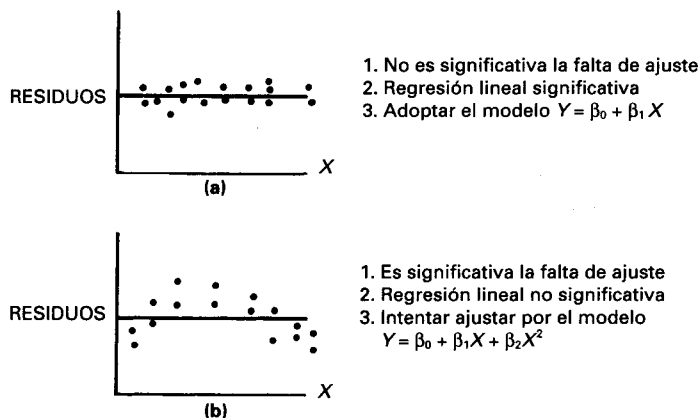


FIGURA 44.29 Residuos y falta de ajuste.

Si la F_{CALC} es mayor que la F tabulada, se deduce que la falta de ajuste es «significativa», y se necesita un modelo mejor o más completo (por ejemplo, $Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2$). La representación gráfica de los residuos ($Y_m - \hat{Y}_m$) como función de X_m suele ser una buena ayuda para sugerir modelos alternativos. Algunos ejemplos se dan en la Figura 44.29 [Daniel y Wood (1971, pp. 19-24) presentan las gráficas de diversas funciones no lineales y dan transformaciones que las «linearizan»]. En cada caso se postuló el modelo $Y = \beta_0 + \beta_1 X$ y se representaron los residuos resultantes.

Cuando F_{CALC} es menor que la F dada en la tabla se acepta el modelo. Esto no significa que otras variables no deban ser consideradas en el modelo, sino que la expresión con la variable X en el modelo es adecuada.

Los cálculos en nuestro ejemplo están resumidos en la Tabla 44.42. La falta de ajuste no es significativa al nivel $\alpha = 0,05$ ($F_{\text{TAB}} = 3,89$). Por tanto, se acepta el modelo postulado, y el cuadrado medio residual se utiliza para estimar la varianza.

Si la repetición de observaciones no es posible, lo que, por ejemplo, sucede cuando X es más aleatoria que controlable, entonces se pueden utilizar los valores de Y correspondientes a valores cercanos de X para obtener una estimación del error puro y, en consecuencia, poder deducir si la falta de ajuste es o no significativa [véanse las pp. 123-125 de Daniel y Wood (1971)].

Intervalos de confianza. Tanto R^2 como s_e^2 son medidas de la fiabilidad o adecuación de una ecuación de predicción. Los intervalos de confianza proporcionan otra medida de la fiabilidad de varias estimaciones. Los intervalos de confianza están basados en la raíz cuadrada

TABLA 44.42 Ejemplo ANOVA

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F_{CALC}
Falta de ajuste	9,39*	2	4,695	0,172
Error puro	327,75	12	27,3125	

* Obtenida por sustracción de SC(EP) y SC(RES).

del cuadrado medio residual. Un intervalo de confianza bilateral $(1-\alpha)$ para la pendiente β_1 está dado por

$$b_1 \pm \frac{ts_e}{\Sigma\sqrt{(X_m - \bar{X})^2}}$$

donde el valor t se obtiene con la Tabla G del Apéndice II, con $N-2$ grados de libertad. Aquí el término del denominador hace el papel que hacía $n^{1/2}$ en la obtención del intervalo de confianza de la media de una población. Por ejemplo, un intervalo de confianza al 95 por ciento de β_1 es

$$-1,36 \pm \frac{(2,145)(4,91)}{\sqrt{875}} = -1,36 \pm 0,356$$

A la expresión $s_e/\sqrt{\Sigma(X_m - \bar{X})^2}$ se le llama con frecuencia el *error estándar del coeficiente de regresión*.

Más importante que el intervalo de confianza para β_1 son los *intervalos de confianza para el valor medio de Y correspondiente a un valor determinado de X* . El intervalo de confianza $(1-\alpha)$ de la media de Y en X (o, de forma equivalente, el intervalo de confianza de $\beta_0 + \beta_1 X$) es

$$b_0 + b_1 X \pm ts_e \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{(X - \bar{X})^2}{\Sigma(X_m - \bar{X})^2}}$$

donde X es el valor en el que se va a construir el intervalo de confianza y t tiene otra vez $N-2$ grados de libertad. (En el caso $X=0$ se obtiene el intervalo de confianza para β_0).

Además de los supuestos antes establecidos, estos intervalos de confianza también requieren (1) que la variable independiente sea más fija que aleatoria y (2) que los errores estén normalmente distribuidos. Sin embargo, si la variable X es aleatoria, todavía se pueden calcular los intervalos de confianza, pero deben interpretarse en un sentido condicional. Los intervalos de confianza no son sensibles al alejamiento de la normalidad si el tamaño de la muestra es razonablemente grande. No sucede así para el próximo intervalo de confianza que vamos a obtener, que es muy sensible a la hipótesis de normalidad. Otras dos posibles alternativas a la estimación por mínimos cuadrados son el *mínimo valor absoluto* y la *estimación de Chebyshev*, que son menos sensibles al alejamiento de la normalidad que la estimación por mínimos cuadrados. Referencias de algoritmos computacionales eficientes, con detallados ejemplos numéricos, aparecen en Dielman y Pfaffenberger (1984).

Además del intervalo de confianza para el valor esperado de Y para un valor de X , podemos necesitar la *estimación de un intervalo de confianza para una observación individual de Y en X* . [Una discusión más completa de los intervalos de confianza se da en Draper y Smith (1981). En Daniel y Wood (1971) se trata completamente esta temática y se da un intervalo de confianza para una observación individual. En Dudewicz (1976, p. 427) aparece un dibujo con un intervalo de confianza para cada valor de X , llamado *banda de predicción*, y sus usos]. En este caso, el intervalo obtenido debe haber considerado la variabilidad de Y alrededor de $\beta_0 + \beta_1 X$, por lo que el resultado es

$$b_0 + b_1 X \pm ts_e \sqrt{1 + \frac{1}{N} + \frac{(X - \bar{X})^2}{\Sigma(X_m - \bar{X})^2}}$$

donde t tiene $N-2$ grados de libertad. Los cálculos de esos intervalos para varios valores de X se dan en la Tabla 44.43.

Regresión múltiple. Si bien hay muchos problemas con una sola variable predictora, con más frecuencia hay muchas variables predictoras. Una generalización de la técnica de míni-

TABLA 44.43 Cálculo de los límites de confianza

X (1)	$b_0 + b_1 X$ (2)	$\frac{(X - \bar{X})^2}{\Sigma(\bar{X}_m - \bar{X})^2}$ (3)	$\sqrt{\frac{1}{N} + (3)}$ (4)	$ts \times (4)$ (5)	Límites de confianza al 90 % de la media de Y en X		$\sqrt{1 + \frac{1}{N} + (3)}$ (8)	$ts \times (8)$ (9)	Límites de predicción al 90 % de Y en X	
					Inferior (2) - (5)	Superior (2) + (5)			Inferior (2) - (9)	Superior (2) + (9)
					(6)	(7)			(10)	(11)
90	38,37	0,14464	0,4551	3,94	34,43	42,31	1,0987	9,50	28,87	47,87
100	24,76	0,00179	0,2535	2,20	22,56	26,56	1,0316	8,92	15,84	33,68
($\bar{X}$) 101,5	($\bar{Y}$) 23,06	0,0	0,2550	2,17	20,89	25,23	1,0308	8,91	14,15	31,97
110	11,15	0,08750	0,3870	3,36	7,79	14,51	1,0724	9,27	1,88	20,42

Nota: Los números entre paréntesis indican la numeración de las columnas. $t_{14, 0,95} = 1,761$.

mos cuadrados, antes expuesta, se puede utilizar para estimar los coeficientes de una ecuación de predicción con varias variables. Este problema se llama *regresión múltiple*.

El modelo general. Para un problema con k variables predictoras, el modelo se puede escribir como

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon$$

donde las betas son parámetros desconocidos y ε es el error aleatorio. Estas variables pueden ser transformaciones de los datos originales. Por ejemplo, en la predicción de la producción de gasolina en función de la densidad y de la tensión de vapor del crudo, Y puede ser el logaritmo de la producción de gasolina, X_1 la densidad del crudo, X_2 la tensión del vapor del crudo y X_3 el producto de la densidad del crudo por la tensión de vapor.

El modelo general consiste en polinomios con una o más variables, como

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_1^2 + \beta_4 X_2^2 + \beta_5 X_1 X_2 + \varepsilon$$

[que se le llama el *modelo cuadrático completo* de Y en función de X_1 y X_2 y es muy utilizado en diseño de experimentos (véanse Dudewicz y Karian (1985)]. La ecuación precedente es todavía un modelo lineal, ya que el término *modelo lineal* significa que el modelo es lineal en las betas. [En Draper y Smith (1981) se puede ver un estudio de modelos no lineales].

Estimación de la ecuación de predicción. El objetivo ahora es encontrar las estimaciones por mínimos cuadrados ($b_0, b_1, \dots, b_k$) de los parámetros desconocidos ($\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$) y obtener la ecuación de predicción

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X_1 + \dots + b_k X_k$$

donde $\hat{Y}$ es el valor predicho para Y en función de valores dados $X_1, \dots, X_k$. Escribiendo $x_i = X_i - \bar{X}_i$ y utilizando el hecho de que

$$b_0 = \bar{Y} - b_1 \bar{X}_1 - \dots - b_k \bar{X}_k$$

la ecuación de predicción se puede escribir en la forma equivalente

$$\hat{Y} = \bar{Y} + b_1 x_1 + \dots + b_k x_k$$

Para simplificar las fórmulas, las observaciones se pueden expresar en desviaciones respecto a las medias muestrales; por ejemplo, para la observación m -ésima $x_{im} = X_{im} - \bar{X}_i$ e $Y_m = Y_m - \bar{Y}$. Entonces la estimación por mínimos cuadrados de los $k + 1$ parámetros del modelo lineal multivariante $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_k X_k$ se puede obtener resolviendo las $k + 1$ ecuaciones lineales:

$$\begin{aligned} b_1 \sum x_1^2 m + b_2 \sum x_{1m} x_{2m} + \dots + b_k \sum x_{1m} x_{km} &= \sum x_{1m} y_m \\ b_1 \sum x_{1m} x_{2m} + b_2 \sum x_{2m}^2 + \dots + b_k \sum x_{2m} x_{km} &= \sum x_{2m} y_m \\ \vdots & \vdots \\ b_1 \sum x_{1m} x_{km} + b_2 \sum x_{2m} x_{km} + \dots + b_k \sum x_{km}^2 &= \sum x_{km} y_m \\ b_0 &= \bar{Y} - b_1 \bar{X}_1 - b_2 \bar{X}_2 - \dots - b_k \bar{X}_k \end{aligned}$$

(Todas las sumas en las ecuaciones anteriores son con respecto a m , que varía desde 1 a N).

La resolución de estas ecuaciones «reducidas a forma normal» es un trabajo tedioso, con tendencia a cometer errores, y que exige la utilización de álgebra matricial. Hay muchos trabajos dedicados a la realización de estos cálculos con exactitud. Para el usuario de software

estadístico moderno y exacto, estos cálculos no tienen importancia directa: el usuario puede confiar que se hacen exactamente y concentrarse en aspectos estadísticos de adecuación del modelo, interpretación y uso.

Examen de la ecuación de predicción. Después de obtener $(b_0, b_1, \dots, b_k)$, se puede construir una tabla ANOVA y evaluar la adecuación de la ecuación de predicción mediante ciertos criterios. La tabla ANOVA, que es una generalización de la obtenida en el caso de una sola variable predictora, está dada en la Tabla 44.44. La tercera fila en la Tabla 44.44 es la misma que en la Tabla 44.40. Obsérvese que las expresiones en la primera fila se reducen a las expresiones de la primera fila de la Tabla 44.40 cuando $k = 1$.

Puesto que hay k variables en el modelo, la suma de los cuadrados de la regresión tiene k grados de libertad. Además, al haberse estimado k coeficientes y una ordenada en el origen, la suma de los cuadrados de los residuos tiene $N - (k + 1) = N - k - 1$ grados de libertad. El estadístico F se calcula como antes —es decir, $F = \text{CM}(\text{REG}) / \text{CM}(\text{RES})$ — y $s_e = \sqrt{\text{SC}(\text{RES}) / (N - k - 1)}$. En este caso, el estadístico F se puede utilizar como test en la hipótesis estadística

$$H_0: \beta_i = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, k)$$

frente a la hipótesis estadística alternativa

$$H_1: \text{Algún } \beta_i \neq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, k)$$

El único cambio respecto a la regresión lineal simple está en el número de grados de libertad utilizados para buscar en la tabla el valor de F_{TAB} (ahora son $k, n - k - 1$; antes eran $1, n - 2$).

La proporción de variación explicada por la ecuación (R^2) se puede obtener de la tabla ANOVA. Obsérvese que R^2 no depende del número de variables en la ecuación, en tanto que s_e^2 sí que depende. De hecho, si se añade una nueva variable al modelo (y se recalcula la estimación por mínimos cuadrados y la tabla ANOVA), el valor de R^2 *no puede disminuir*. Sin embargo, s_e^2 puede aumentar o disminuir, pues depende del número de grados de libertad de los residuos y de la suma de cuadrados de los residuos, que decrece cuando se añade una nueva variable.

Intervalos de confianza. Los intervalos de confianza para β están dados por

$$b_i \pm t s_e \sqrt{c_{ii}}$$

donde t tiene $(N - k - 1)$ grados de libertad, y c_{ii} se define más adelante. Sin embargo, dado que los b_i ($i = 1, \dots, k$) forman n -tuplas de una distribución y que, en general, están correlacio-

TABLA 44.44 Tabla ANOVA (Modelo lineal)

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
1. Debido a la regresión	$b'a^*$	k	$\text{CM}(\text{REG}) = \text{SC}(\text{REG}) / k$
2. Residual	$\Sigma(\bar{Y}_m - \hat{Y}_m)^2$ **	$N - k - 1$	$\text{CM}(\text{RES}) = \text{SC}(\text{RES}) / (N - k - 1)$
3. Total corregido respecto a la media	$\Sigma(Y_m - \bar{Y}_m)^2$	$N - 1$	

* La suma de cuadrados debida a la regresión se puede escribir como $b'a = b_1 \Sigma x_{1m} y_m + b_2 \Sigma x_{2m} y_m + \dots + b_k \Sigma x_{km} y_m$. [Obsérvese que b' es el traspuesto del vector b , es decir, $b' = (b_1, b_2, \dots, b_k)$. Quienes no estén familiarizados con la notación vectorial, pueden imaginar que $b'a$ es una forma abreviada para representar la suma que hemos considerado en esta nota. Dado que los cálculos se hacen con ordenador, no vamos a dar detalles sobre la notación vectorial, que no será necesitada por la mayoría de los lectores].

** Obtenido restando (1) de (3).

nados, se debe tener precaución en la interpretación conjunta de esos intervalos de confianza [véanse, por ejemplo, Draper y Smith (1981)].

Más útil es la obtención de un intervalo de confianza de la ecuación de regresión en el punto $x = (x_1, \dots, x_k)$, donde $x_i = X_i - \bar{X}_i$ viene dado por

$$\bar{Y} + b_1 x_1 + \dots + b_k x_k \pm t s_e \left(\frac{1}{N} + x' C x \right)^{1/2}$$

donde t tiene $N - k - 1$ grados de libertad, y $x' C x$ es la forma cuadrática de las varianzas y covarianzas de los b_i ($i = 1, \dots, k$). (Definiremos C en el próximo párrafo).

De forma similar, un intervalo de confianza para un futuro valor Y en X lo da la fórmula

$$\bar{Y} + b_1 x_1 + \dots + b_k x_k \pm t s_e \left(1 + \frac{1}{N} + x' C x \right)^{1/2}$$

donde t tiene $N - k - 1$ grados de libertad. (Aquí $C = S^{-1}$, donde S es una matriz $k \times k$ cuyo valor en la fila i y en la columna j es $\Sigma x_{im} x_{jm}$. En la práctica, como veremos, los cálculos con matrices los hace el ordenador, y el usuario no necesita preocuparse de ellos —ni siquiera necesita entender los conceptos de *matriz* y de *matriz inversa*).

Un ejemplo: Vamos a ilustrar los métodos discutidos con un ejemplo dado por Mason E. Wescott (ejemplo 5 de *Mimeo Notes*, Mason E. Wescott, Rochester Institute of Technology, Rochester, NY) con $k = 2$ variables predictoras. El problema es relacionar la resistencia a la flexión antes de la cocción del interruptor de la caja de soplado del arco de un circuito eléctrico con la presión hidráulica utilizada en su construcción y la concentración de ácido. Los datos se dan en la Tabla 44.45, con la presión hidráulica y la resistencia a la flexión dadas en unidades de 10 libras/pulgada² y la concentración de ácido dada por la proporción en tanto por ciento respecto a la concentración nominal para 20 observaciones. Las gráficas de cada par de variables de los datos se dan en las Figuras 44.30, 44.31 y 44.32. Los estadísticos, incluyendo sumas, sumas de cuadrados y productos cruzados, tanto para los datos originales como corregidos (restándoles la media aritmética), se dan en la Tabla 44.46.

Las estimaciones son

$$b_2 = 4,162940$$

$$b_1 = 1,571779$$

$$b_0 = \bar{Y} - b_1 \bar{X}_1 - b_2 \bar{X}_2 = 16,27475$$

La matriz C es

$$c_{22} = 0,00048916$$

$$c_{12} (= c_{21}) = -0,000058099$$

$$c_{11} = 0,00029787$$

y por tanto,

$$C = \begin{vmatrix} 297,869 & -58,099 \\ -58,099 & 489,160 \end{vmatrix} \times 10^{-6}$$

Los cálculos de las ecuaciones de predicción conducen a

$$\hat{Y} = 16,277 + 1,572X_1 + 4,163X_2$$

$$\hat{Y} = 641,600 + 1,572(X_1 - 131,400) + 4,163(X_2 - 100,600)$$

(La segunda forma se utilizará en las computaciones siguientes).

TABLA 44.45 Datos de la caja de soplado

Y = Resistencia antes de la cocción en unidades de 10 libras/pulgada ²	X_1 = Presión hidráulica en unidades de 10 libras/pulgada ²	X_2 = Concentración de ácido, como porcentaje de su valor nominal
665	110	116
618	119	104
620	138	94
578	130	86
682	143	110
594	133	87
722	147	114
700	142	106
681	125	107
695	135	106
664	152	98
548	118	86
620	155	87
595	128	96
740	146	120
670	132	108
640	130	104
590	112	91
570	113	92
640	120	100

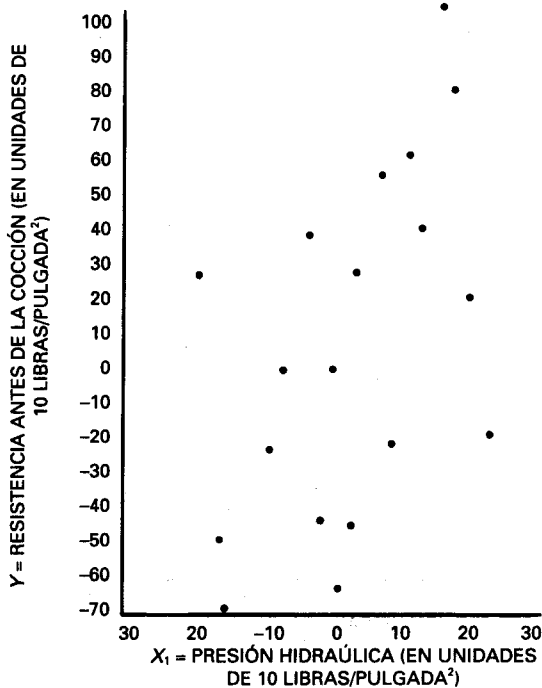


FIGURA 44.30 Resistencia antes de la cocción en relación con la presión hidráulica (desviaciones respecto a las medias).

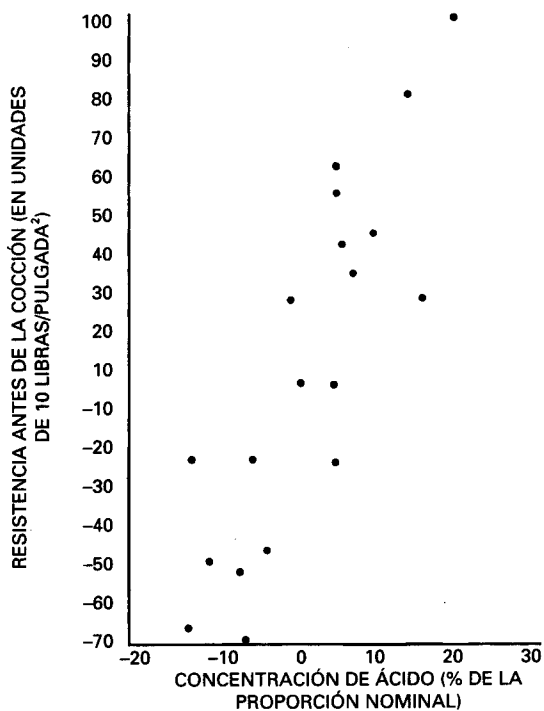


FIGURA 44.31 Resistencia antes de la cocción en relación con la concentración de ácido (desviaciones respecto a los medias).

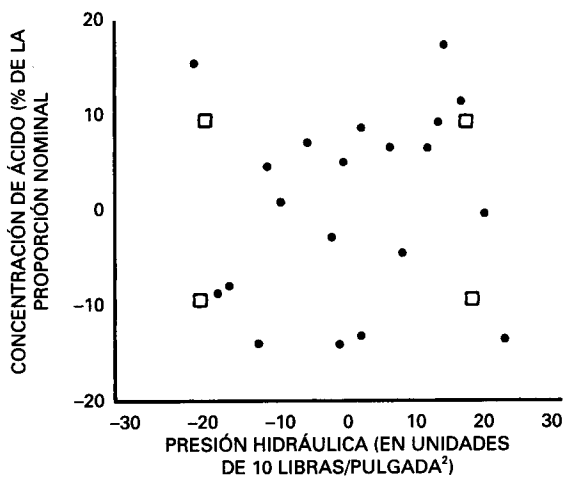


FIGURA 44.32 Concentración de ácido en relación con la presión hidráulica (desviaciones respecto a las medias). Los rectángulos indican puntos en los que el nivel de confianza ha sido ya calculado.

TABLA 44.46 Resumen de estadísticos

$N = 20$		
$\Sigma Y_m = 12.832$	$\Sigma X_{1m} = 2.628$	$\Sigma X_{2m} = 2.012$
$\Sigma Y_m^2 = 8.286.988$	$\Sigma X_{1m}^2 = 348.756$	$\Sigma X_{2m}^2 = 204.500$
$\Sigma X_{1m} Y_m = 1.693.226$	$\Sigma_{2m} Y_m = 1.300.253$	$\Sigma X_{1m} X_{2m} = 264.785$
$\bar{Y} = 641,6$	$\bar{X}_1 = 131,4$	$\bar{X} = 100,6$
S		a
$s_{11} = 3.436,8$	$s_{12} = 408,2^*$	$a_1 = 7.101,2^{**}$
$s_{21} = 408,2$	$s_{22} = 2.092,8$	$a_2 = 9.353,8$

* $s_{12} = \Sigma X_{1m} X_{2m} - (\Sigma X_{1m} \Sigma X_{2m} / N) = 264.785 - [(2.628)(2.012)/20] = 108,2$.

** $a_1 = \Sigma X_{1m} Y_m - (\Sigma X_{1m} \Sigma Y_m / N) = 1.693; 226 - [(2.628)(12.832)/20] = 7.101,2$.

La tabla ANOVA (Tabla 44.47) para el ejemplo se deduce directamente de los estadísticos de la Tabla 44.46 y de la Tabla 44.44. El error cuadrático medio residual es 228,0, y por tanto, la desviación estándar s_e es 15,100.

Intervalos al 95 por ciento de confianza para β_1 y β_2 se obtienen con la expresión

$$1,572 \pm 2,110 \times 15,100 \times \sqrt{297,869} \times 10^{-3} \\ = 1,572 \pm 0,550 = 1,02 \text{ y } 2,12$$

y

$$4,163 \pm 2,110 \times 15,0997 \times \sqrt{489,16} \times 10^{-3} \\ = 4,163 \pm 0,705 = 3,46 \text{ y } 4,87$$

Intervalos de confianza para $\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2$ y para una futura observación Y , en cinco combinaciones de X_1 y X_2 , se dan en la Tabla 44.48. (Los cinco puntos en los que se han calculado los intervalos de confianza también están indicados en la Figura 44.32).

Un excelente ejemplo adicional es dado en el libro de Golden y Wasil (1992, pp. 227-245), en el que se utilizan 37.000 observaciones recogidas por 34 estaciones en la Bahía Chesapeake para desarrollar 10 modelos de regresión de salinidad dinámica. Se discute la calidad de los datos, del modelo construido, de los resultados del modelo y de la validación del modelo.

TABLA 44.47 Ejemplo de ANOVA

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
1. Debido a la regresión	50.100,8*	2	25.050,40
2. Residual	3.876,0**	17	228,0
3. Total corregido respecto a la media	53.976,8	19	

* $(1,571779)(7.101,2) + (4,16294)(9.353,8) = 50.100,825$.

** Por sustracción.

TABLA 44.48 Cálculo de los intervalos de confianza

X_1 (1)	X_2 (2)	$\hat{Y}$ (3)	$(x' C x)$ (4)	$\sqrt{\frac{1}{N} + (4)}$ (5)	$ts \times (5)^{**}$ (6)	95 %, límites de confianza de media de Y en X_1, X_2		$\sqrt{1 + \frac{1}{N} + (4)}$ (9)	$ts \times (9)$ (10)	95 %, límites de predicción sobre Y en X_1, X_2	
						Inferior (3) - (6)	Superior (3) + (6)			Inferior (3) - (10)	Superior (3) + (10)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
111,4	90,6	568,53	0,1457*	0,4424	14,10	554,43	582,63	1,0935	34,69	533,69	603,37
111,4	110,6	651,79	0,1922	0,4921	15,68	636,11	667,47	1,1145	35,51	616,28	687,30
131,4	100,6	641,60	0,0	0,2236	7,12	634,48	648,72	1,0247	32,65	608,95	674,25
151,4	90,6	631,41	0,1922	0,4921	15,68	615,73	647,09	1,1145	35,51	595,90	666,92
151,4	110,6	714,67	0,1457	0,4424	14,10	700,57	728,77	1,0935	34,85	679,82	749,52

Nota: Los números entre paréntesis indican la numeración de las columnas.

* Puesto que $x' = (111,4 - 131,4, 90,6 - 100,6) = (-20, -10)$, entonces

$$x' C x = (-20, -10) \begin{bmatrix} 297,869 & -58,099 \\ -58,099 & 498,160 \end{bmatrix} \times 10^{-6} \begin{bmatrix} -20 \\ -10 \end{bmatrix} = (-5.376,39, -3.819,62) \times 10^{-6} \begin{bmatrix} -20 \\ -10 \end{bmatrix} = 0,1457.$$

** El valor de t_{TAB} con 17 grados de libertad es 2,110, $s = 15.100$.

Programas de ordenador. Por la popularidad universal de la regresión, casi todos los ordenadores tienen uno, y muchos varios, programas de regresión. Esos programas pueden haber sido hechos localmente o pueden haberse obtenido de otras fuentes. En el último caso, normalmente el programa ha sido modificado de manera que se pueda ejecutar en el sistema de ordenadores locales y satisfaga las necesidades de los usuarios locales.

Los estudios de Longley (1967) y Wampler (1970) prueban que el usuario debe tener una *muy clara* preferencia por software tal como el de SAS y BMDP. No se debe suponer que un programa ha sido chequeado por haber hecho un problema con una muestra de datos dada en el manual del programa. Desafortunadamente, muchos de los algoritmos utilizados en estos programas han sido cogidos directamente de las instrucciones de calculadoras de oficina. Frecuentemente estos algoritmos no son suficientemente buenos y pueden producir resultados numéricamente inexactos, incluso trabajando con doble precisión. Por ejemplo, Longley encontró que muchos de esos programas computaban la suma de cuadrados de desviaciones de una variable respecto a su media por la fórmula $\sum X_m^2 - (\sum X_m)^2/N$, con preferencia a la expresión $\sum (X_m - \bar{X})^2$. Como estas cantidades son la base de muchos de los cálculos en regresión, pueden estar presentes errores numéricos en todos los resultados.

Dado que el usuario puede no estar capacitado (o simplemente no desee invertir tiempo) en chequear un programa, debajo se dan una reglas simples para chequearlo, que pueden utilizarse para obtener unas ideas de las limitaciones del programa; sin embargo, de nuevo recomendando encarecidamente contra «la realización de programas propios», cuando SAS, BMDP, y (quizás) otro software excelente están disponibles a precio razonable y se actualizan con los avances de la estadística.

1. Sumar los residuos respecto a la recta de regresión. Deben sumar cero, sin error de redondeo.
2. Si los residuos suman cero, ejecútese varias veces el programa después de añadir 10, 100, 1.000, 10.000, etc., a cada variable. Los coeficientes $b_1, b_2, \dots$ empiezan a cambiar en el punto en que ocurren los errores de redondeo.
3. Como una prueba de la exactitud de la rutina de inversión, ejecútese un problema de dos variables X_1 y X_2 . Después ejecútese el programa con la misma variable de respuesta pero con las nuevas variables independientes $X_1^* = X_1 + X_2$ y $X_2^* = X_1 - X_2$. Se deberán verificar las siguientes relaciones: $b_1 = b_1^* + b_2^*$ y $b_2 = b_1^* - b_2^*$.

Longley (1967) da algunos tests más, y Wampler (1970) lista resultados de muchos programas de regresión.

Una documentación está normalmente disponible con los programas de regresión; debe incluir una discusión completa de la entrada (*input*) requerida y una explicación de la salida de resultados (*output*) y de las *opciones* disponibles, así como exposición de las fórmulas de cálculo y un problema muestra. (Si bien es cierto que documentar un programa es una tarea difícil, el que la documentación esté pobremente escrita es con frecuencia una advertencia de un programa pobre o incorrectamente escrito).

En tanto que los formatos de los input de muchos programas de regresión varían, muchos programas tienen una opción que permite al usuario realizar muchas transformaciones con los datos, como tomar logaritmos, potencias o productos cruzados. Los resultados (outputs) de los programas típicos de regresión incluyen tablas de ANOVA, dibujos de residuos y otros estadísticos, además de la estimación de los coeficientes de regresión. Aunque con frecuencia es omitido, una «comprobación por eco», es decir, una salida por impresora de los datos originales y transformados, es esencial. Con frecuencia se obtienen «extraños» resultados con la regresión cuando se coloca erróneamente el punto decimal en una observación, o se leen variables equivocadas, o se hace uso incorrecto de la opción de transformación de datos. (Si no está disponible en el programa, pide al centro de cálculo la modificación del programa para que se imprima automáticamente, salvo que el usuario decida no imprimir los datos originales y los transformados).

Los criterios R^2 y C_p para la elección del modelo. En muchas situaciones hay una gran cantidad de posibles variables que pueden entrar en un modelo, y el problema está en la selección de las «pocas variables vitales» entre «las muchas posibles», en vez de obtener la ecuación completa de regresión. Hay muchas razones para no utilizar todas las variables posibles. Por ejemplo, un subconjunto de variables puede suministrar una ecuación de predicción mejor que el conjunto completo de variables, incluso aunque con el conjunto completo de variables se obtenga un mayor R^2 , ya que el conjunto mayor también tiene más variabilidad. Además, las ecuaciones con pocas variables son más fáciles de entender, y por tanto es más probable que tengan más aceptación y utilización.

Salvo que los datos provengan de un diseño de experimentos, no hay un test sencillo que seleccione las variables significativas. Dado que hay $2^k - 1$ posibles ecuaciones de predicción a evaluar, es obvio que no es factible su consideración una a una (pues para $k = 20$ se tiene que $2^k - 1 = 1.048.575$).

La *regresión por etapas* (*stepwise regression*) es una técnica heurística para evitar este problema computacional. Comienza por la selección de la variable independiente que es el mejor «predictor» en el sentido de que maximiza R^2 . Entonces va añadiendo secuencialmente variables a la ecuación por orden de importancia. En cada etapa la variable añadida es la que más incrementa la suma de cuadrados de la regresión (y por tanto R^2), o lo que es equivalente, reduce lo más posible la suma de cuadrados de los residuos. Este procedimiento no sólo selecciona variables, sino que también elimina variables previamente seleccionadas, si en algún momento dejan de ser importantes.

La regresión por etapas no garantiza que el «mejor» conjunto de variables estará incluido en la ecuación final. Sin embargo, da un método eficiente para reducir el número k de variables a una cantidad manejable; por ejemplo, si $k = 100$, la regresión por etapas se puede utilizar para seleccionar las 25 mejores, o incluso menos, para realizar un estudio más exhaustivo. Los programas de regresión por etapas están ampliamente disponibles; véanse Draper y Smith (1981).

Además de la regresión por etapas, se han desarrollado muchas otras técnicas. Una que parece tener un gran potencial fue desarrollada por Hocking y Leslie (1967) y mejorada por LaMotte y Hocking (1970). Su algoritmo encuentra el «mejor» conjunto de variables de tamaño 1, 2, ..., k , siendo k el número total de variables consideradas. Si bien la computación requiere más tiempo que en la regresión por etapas, este procedimiento garantiza el mejor subconjunto en el sentido del cuadrado del coeficiente de correlación (R^2), dando, además, unos subconjuntos que «aspiran» a tener las variables que entren en la ecuación de predicción. (Si el número de variables fuese pequeño, podríamos, naturalmente, calcular todas las regresiones posibles). Los mejores algoritmos de regresión están disponibles en BMDP y pueden soportar valores de k hasta 20 o 25 sin problemas en cuanto al tiempo de computación.

El conjunto de variables posibles debe ser seleccionado sobre la base de investigaciones preliminares para detectar los factores que tienen influencia en las variables de respuesta. La utilización indiscriminada del análisis de regresión para encontrar relaciones, donde ningún hecho hace sospechar de la existencia de una relación, conduce con frecuencia a resultados sin sentido. Desafortunadamente, esto se descubre normalmente después de que la ecuación de predicción falla estrepitosamente en la predicción de futuras observaciones.

Si se dispone de una gran cantidad de datos, una parte de ellos se puede utilizar para seleccionar variables y estimar coeficientes, reservando el resto de datos para comprobar las ecuaciones obtenidas. En cualquier caso, la ecuación de predicción se debe revisar periódicamente a medida que tengamos disponibles nuevos datos.

Una herramienta potente en el moderno análisis de regresión es el estadístico C_p [véanse Dudewicz y Karian (1985, pp. 236, 413)]. Mientras que R^2 mide la bondad de la ecuación de regresión en la predicción de los puntos del conjunto de datos que se está utilizando para construir el modelo, C_p estima la varianza de futuras predicciones hechas utilizando el mode-

lo. En tanto que la adición de una variable incrementará R^2 (incluso si la variable está totalmente incorrelacionada con lo que tratamos de predecir), normalmente C_p decrece a medida que las variables se van añadiendo para formar el modelo. Por tanto, la búsqueda del mínimo estadístico C_p en todas las regresiones posibles es un enfoque razonable —si bien cuando la introducción de una variable produzca un incremento considerable en R^2 con un incremento modesto de C_p , debe introducirse esa variable en el modelo.

REFERENCIAS

- ASQC (1996). «QA/QC Software Directory». *Quality Progress*, April, pp. 31-59.
- Barr, Donald R. (1969). «Using Confidence Intervals to Test Hypotheses». *Journal of Quality Technology*, vol. 1, no. 4, pp. 256-258.
- Bennett, Carl A., and Franklin, Norman L. (1954). *Statistical Analysis in Chemistry and the Chemical Industry*. John Wiley & Sons, New York, chap. II.
- Bingham, R. S., Jr. (1962). «Tolerance Limits and Process Capability Studies». *Industrial Quality Control*, vol. XIX, no. 1, pp. 36-40.
- Choksi, Suresh (1971). «Computer Can Optimize Manufacturing Tolerances for an Economical Design». *ASQC Technical Conference Transactions*. Milwaukee, pp. 323-330.
- Cohen, A. Clifford, and Whitten, Betty Jones (1981). «Estimation of Lognormal Distributions». *American Journal of Mathematical and Management Sciences*, vol. 1, no. 2, pp. 139-153.
- Daniel, Cuthbert (1977). Personal communication, August.
- Daniel, Cuthbert and Wood, Fred S. (1971). *Fitting Equations to Data*. John Wiley & Sons, New York.
- Dielman, Terry E., and Pfaffenberger, Roger C. (1984). «Computational Algorithms for Calculating Least Absolute Value and Chebyshev Estimates for Multiple Regression». *American Journal of Mathematical and Management Sciences*, vol. 4, nos. 1 and 2, pp. 169-197.
- Dixon, W. J. (1983). *BMDP Statistical Software, 1983 Printing with Additions*. University of California Press, Berkeley, CA.
- Dixon, W. J., and Massey, Frank J., Jr. (1969). *Introduction to Statistical Analysis*, 3rd ed. McGraw-Hill, New York.
- Dodge, H. F., Kinsburg, B. J., and Kruger, M. K. (1953). «The L3 Coaxial System—Quality Control Requirements». *Bell System Technical Journal*, vol. 32, pp. 943-1005.
- Draper, N. R., and Smith, H. (1981). *Applied Regression Analysis*, 2nd ed. John Wiley & Sons, New York.
- Dudewicz, Edward J. (1976). *Introduction to Statistics and Probability*. Holt, Rinehart and Winston, New York. (Currently published by American Sciences Press, Columbus, OH. Address: P.O. Box 21161, Columbus 43221-0161).
- Dudewicz, Edward J. (1983). «Heteroscedasticity». In N. L. Johnson, S. Kotz, and C. D. Read (eds.), *Encyclopedia of Statistical Sciences*, vol. 3. John Wiley & Sons, New York, pp. 611-619.
- Dudewicz, Edward J. (1992). «The Generalized Bootstrap». In Jöckel, K.-H., Rothe, G., and Sendler, W. (eds.), *Bootstrapping and Related Techniques*, vol. 376 of Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Springer-Verlag, Berlin, pp. 31-37.
- Dudewicz, Edward J. (1993). *Solutions in Statistics and Probability*. 2nd ed. American Sciences Press, Columbus, OH.
- Dudewicz, Edward J. (1995). «The Heteroscedastic Method: Fifty + Years of Progress 1945-2000». In Hayakawa, T., Aoshima, M., and Shimizu, K. (eds.), *MSI-2000: Multivariate Statistical Analysis*, vol. 1. American Sciences Press, Columbus, OH, pp. 179-197.
- Dudewicz, Edward J. (ed.) (1997). *Modern Digital Simulation Methodology, III. Advances in Theory, Application, and Design—Electric Power Systems, Spare Parts Inventory, Purchase Interval and Incidence Modeling, Automobile Insurance Bonus-Malus Systems, Genetic Algorithms—DNA Sequence Assembly, Education, & Water Resources Case Studies*. American Sciences Press, Columbus, OH.
- Dudewicz, Edward J., and Dalal, Siddhartha R. (1983). «Multiple-Comparisons with a Control when Variances Are Unknown and Unequal». *American Journal of Mathematical and Management Sciences*, vol. 3, no. 4, pp. 275-295.
- Dudewicz, Edward J., and Karian, Zaven A. (1985). *Modern Design and Analysis of Discrete-Event Computer Simulations*. IEEE Computer Society Press, Los Angeles, CA. (Address is P.O. Box 80452, Worldway Postal Center, Los Angeles 90080; Order No. CN597).

- Dudewicz, Edward J., and Karian, Zaven A. (1996). «The EGLD (Extended Generalized Lambda Distribution) System for Fitting Distributions to Data with Moments: II. Tables». In Dudewicz, E. J. (ed.), *Modern Digital Simulation Methodology, II: Univariate and Bivariate Distribution Fitting, Bootstrap Methods, and Applications to CensusPES and CensusPlus of the U.S. Bureau of the Census, Bootstrap Sample Size, and Biology and Environment Case Studies*. American Sciences Press, Columbus, OH, pp. 271-332.
- Dudewicz, Edward J., and Koo, J. O. (1982). *The Complete Categorized Guide to Statistical Selection and Ranking Procedures*. American Sciences Press, Columbus, OH.
- Dudewicz, Edward J., and Mishra, S. N. (1988). *Modern Mathematical Statistics*. John Wiley & Sons, New York.
- Dudewicz, Edward J., and Ralley, Thomas G. (1981). *The Handbook of Random Number Generation and Testing with TESTRAND Computer Code*. American Sciences Press, Columbus, OH.
- Dudewicz, Edward J., Karian, Zaven A., and Marshall, Rudolph James, III (1985). «Random Number Generation on Microcomputers». *Proceedings of the Conference on Simulation on Microcomputers*. The Society for Computer Simulation (Simulation Councils, Inc.), La Jolla, CA. (Address: P.O. Box 2228, La Jolla 92038).
- Duncan, Acheson J. (1974). *Quality Control and Industrial Statistics*, 4th ed. Richard D. Irwin, Homewood, IL.
- Edissonov, I. (1994). «The New ARSTI Optimization Method: Adaptive Random Search with Translating Intervals». *American Journal of Mathematical and Management Sciences*, vol. 14, pp. 143-166.
- Epstein, Benjamin (1960). «Estimation from Life Test Data». *Technometrics*, vol. 2, no. 4, pp. 447-454.
- Evans, Ralph A. (1966). «Problems in Probability». *Proceedings of the Annual Symposium on Reliability*. IEEE, New York, pp. 347-353.
- Fisher, R. A. (1936). «The Use of Multiple Measurements in Taxonomic Problems». *Annals of Eugenics*, vol. 7, pp. 179-188.
- Gibbons, Jean Dickinson (1997). *Nonparametric Methods for Quantitative Analysis*, 3rd ed. American Sciences Press, Columbus, OH.
- Golden, Bruce L. (ed.) (1993). *Vehicle Routing 2000: Advances in Time-Windows, Optimality, Fast Bounds, and Multi-Depot Routing*. American Sciences Press, Columbus, OH.
- Golden, Bruce L., and Eiselt, H. A. (eds.) (1992). *Location Modeling in Practice: Applications (Site Location, Oil Field Generators, Emergency Facilities, Postal Boxes), Theory, and History*. American Sciences Press, Columbus, OH.
- Golden, Bruce L., and Wasil, Edward A. (eds.) (1992). *Fisheries: Control and Management via Application of Management Sciences (with a Comprehensive Annotated Bibliography of Applications)*. American Sciences Press, Columbus, OH.
- Golden, Bruce L., Assad, Arjang A., and Zanakos, Stelios H. (eds.) (1984). *Statistics and Optimization: The Interface*. American Sciences Press, Columbus, OH.
- Govindarajulu, Z. (1981). *The Sequential Statistical Analysis of Hypothesis Testing: Point and Interval Estimation, and Decision Theory*. American Sciences Press, Columbus, OH.
- Grant, E. L., and Leavenworth, R. S. (1980). *Statistical Quality Control*, 5th ed., McGraw-Hill, New York.
- Gray, H. L., and Lewis, Truman (1967). «A Confidence Interval for the Availability Ratio». *Technometrics*, vol. 9, no. 3, pp. 465-471.
- Grubbs, Frank E. (1969). «Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples». *Technometrics*, vol. 11, no. 1, pp. 1-21.
- Gutt, J. D., and Gruska, G. F. (1977). «Variation Simulation». *ASQC Technical Conference Transactions*. Milwaukee, pp. 557-563.
- Hadley, G. (1967). *Introduction to Probability and Statistical Decision Theory*. Holden-Day, San Francisco.
- Hahn, G. J. (1970a). «Additional Factors for Calculating Prediction Intervals for Samples from a Normal Distribution». *Journal of the American Statistical Association*, vol. 65, no. 332, pp. 1668-1676.
- Hahn, G. J. (1970b). «Statistical Intervals for a Normal Population: 1. Tables, Examples, and Applications; II. Formulas, Assumptions, Some Derivations». *Journal of Quality Technology*, vol. 2, no. 3, pp. 115-125; vol. 2, no. 4, pp. 195-206.
- Hahn, G. J. (1971). «How Abnormal is Normality?». *Journal of Quality Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 18-22.
- Hahn, G. J. (1972). «The Absolute Sample Size Is What Counts». *Quality Progress*, vol. V, no. 5, pp. 18-19.

- Hahn, G. J., and Shapiro, S. S. (1967). *Statistical Models in Engineering*. John Wiley & Sons, New York.
- Harter, H. Leon (1983). *The Chronological Annotated Bibliography of Order Statistics*, vol. II: 1950-1959. American Sciences Press, Columbus, OH.
- Harter, H. Leon, and Dubey, Satya D. (1967). *Theory and Tables for Tests of Hypotheses Concerning the Mean and the Variance of a Weibull Population*. Document AD 653593, Clearinghouse for Federal Scientific and Technical Information, U.S. Department of Commerce, Washington.
- Hocking, R. R., and Leslie, R. N. (1967). «Selection of the Best Subset in Regression Analysis». *Technometrics*, vol. 9, no. 4, pp. 531-540.
- Hoerl, Arthur E., and Kennard, Robert W. (1981). «Ridge Regression—1980. Advances, Algorithms, and Applications». *American Journal of Mathematical and Management Sciences*, vol. 1, no. 1, pp. 5-83.
- Huh, M.-H., and Olkin, I. (1995). «Asymptotic Aspects of Ordinary Ridge Regression». In Hayakawa, T., Aoshima, M., and Shimizu, K. (eds.), *MSI-2000: Multivariate Statistical Analysis*, vol. 1. American Sciences Press, Columbus, OH, pp. 239-254.
- Iman, Ronald L. (1982). «Graphs for Use with the Lilliefors Test for Normal and Exponential Distributions». *The American Statistician*, vol. 36, no. 2, pp. 109-112.
- Ireson, W. Grant (ed.) (1982). *Reliability Handbook*. McGraw-Hill, New York.
- Johnson, Norman L., and Kotz, Samuel (1969). *Discrete Distributions*. Houghton Mifflin, Boston.
- Johnson, Norman L., and Leone, Fred C. (1964). *Statistics and Experimental Design*, vol. I. John Wiley & Sons, New York.
- Juran, J. M., and Gryna, Frank M., Jr. (1980). *Quality Planning and Analysis*, 2nd ed. McGraw-Hill, New York.
- Karian, Z., and Dudewicz, E. J. (1991). *Modern Statistical, Systems, and GPSS Simulation*. Computer Science Press/W.H. Freeman and Company, Book Publishing Division of Scientific American, New York. Currently published by American Sciences Press, Columbus, OH.
- Karian, Z., Dudewicz, E. J., and McDonald, P. (1996). «The Extended Generalized Lambda Distribution System for Fitting Distributions to Data: History, Completion of Theory, Tables, Applications, the 'Final Word' on Moment Fits». *Communications in Statistics: Simulation and Computation*, vol. 25, pp. 611-642.
- Karian, Z., and Dudewicz, Edward J. (1999). *Fitting Statistical Distributions to Data: The Generalized Lambda Distribution (GLD) and the Generalized Bootstrap (GB) Methods*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Kececioglu, D., and Cormier, D. (1964). «Designing a Specified Reliability into a Component». *Proceedings of the Third Annual Aerospace Reliability and Maintainability Conference*. Society of Automotive Engineers, Washington, p. 546.
- King, James R. (1971). *Probability Charts for Decision Making*. The Industrial Press, New York.
- Kirkpatrick, R. L. (1970). «Confidence Limits on a Percent Defective Characterized by Two Specification Limits». *Journal of Quality Technology*, vol. 2, no. 3, pp. 150-155.
- Kramer, C. Y., and Jensen, D. R. (1969, 1970). «Fundamentals of Multivariate Analysis». *Journal of Quality Technology*, vol. 1, no. 2, pp. 120-133, no. 3, pp. 189-204, no. 4, pp. 264-276; vol. 2, no. 1, pp. 32-40.
- LaMotte, L. R., and Hocking, R. R. (1970). «Computational Efficiency in the Selection of Regression Variables». *Technometrics*, vol. 12, no. 1, pp. 83-93.
- Lenz, H.-J., and Rendtel, U. (1984). «Performance Evaluation of the MIL-STD-105 D, Skip-Lot Sampling Plans, and Bayesian Single Sampling Plans». In Lenz, H.-J., Wetherill, G. B., and Wilrich, P.-Th. (eds.), *Frontiers in Statistical Quality Control 2*. Physica-Verlag, Rudolf Liebing GmbH & Co., Würzburg, Germany, pp. 92-106.
- Levy, George C., and Dumoulin, Charles L. (1984). *The LAB ONE NMRI Spectroscopic Data Analysis Software System: Revision 2.00 User's Manual*. Department of Chemistry, Syracuse University, Syracuse, NY (Address: Dept. of Chemistry, Browne Hall, Syracuse University, Syracuse 13244).
- Lieberman, G. J., and Owen, D. B. (1961). *Tables of the Hypergeometric Probability Distribution*. Stanford University Press, Stanford, CA.
- Lloyd, David K., and Lipow, Myron (1982). *Reliability: Management, Methods and Mathematics*, 2nd ed. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Longley, J. W. (1967). «An Appraisal of Least Squares Programs for the Electronic Computer from the Point of View of the User». *Journal of the American Statistical Association*, vol. 62, no. 319, pp. 819-841.
- Lusser, R. (1958). *Reliability Through Safety Margins*. United States Army Ordnance Missile Command, Redstone Arsenal, AL.

- Martin Marietta Corp. (1966). *Reliability for the Engineer*, book 5: *Testing for Reliability*. Martin Marietta, Orlando, FL, pp. 29-31.
- Moult, John F. (1963). «Critical Agents in Bearing Fatigue Testing». *Lubrication Engineering*, December, pp. 503-511.
- Mouradian, G. (1966). «Tolerance Limits for Assemblies and Engineering Relationships». *ASQC Technical Conference Transactions*. Milwaukee, pp. 598-606.
- Mulekar, Madhuri S., and Mishra, Satya N. (1997). «Inference on Measures of Niche Overlap for Heteroscedastic Normal Populations». In Hayakawa, T., Aoshima, M., and Shimizu, K. (eds.), *MSI-2000: Multivariate Statistical Analysis*, vol. III. American Sciences Press, Columbus, OH, pp. 163-185.
- Natrella, Mary G. (1963). *Experimental Statistics*, National Bureau of Standards Handbook 91. U.S. Government Printing Office, Washington, DC.
- Nelson, Wayne (1979). *How to Analyze Data with Simple Plots*. Volume 1 of Dudewicz, E. J. (ed.). *The ASQC Basic References in Quality Control: Statistical Techniques*. American Society for Quality Control, Milwaukee.
- Nelson, Wayne (1982). *Applied Life Data Analysis*. John Wiley & Sons, New York.
- Oliver, Larry R., and Springer, Melvin D. (1972). «A General Set of Bayesian Attribute Acceptance Sampling Plans». *Technical Papers of the 1972 Conference, American Institute of Industrial Engineers*, pp. 443-455.
- Owen, D. B., and Frawley, W. H. (1971). «Factors for Tolerance Limits Which Control Both Tails of the Normal Distribution». *Journal of Quality Technology*, vol. 3, no. 2, pp. 69-79. See also Frawley, W. H., Kapadia, C. H., Rao, J. N. K., and Owen, D. B. (1971). «Tolerance Limits Based on Range and Mean Range». *Technometrics*, vol. 13, no. 3, pp. 651-656.
- Peters, J. (1970). «Tolerancing the Components of an Assembly for Minimum Cost». ASME Paper 70-Prod.-9. *Transactions of the ASME Journal of Engineering for Industry*. American Society of Mechanical Engineers, New York.
- Pinsky, Paul D. (1983). *Statpro: The Statistics and Graphics Database Workstation, Statistics User's Guide*. Wadsworth Electronic Publishing Company, Boston (Address: Statler Office Building, 20 Park Plaza, Boston 02116).
- Ramberg, John S., Dudewicz, Edward J., Tadikamalla, Pandu R., and Mykytko, Edward F. (1979). «A Probability Distribution and its Uses in Fitting Data». *Technometrics*, vol. 21, no. 2, pp. 201-214.
- Ranganathan, J., and Kale, B. K. (1983). «Outlier-Resistant Tolerance Intervals for Exponential Distributions». *American Journal of Mathematical and Management Sciences*, vol. 3, no. 1, pp. 5-25.
- Rich, Barrett G., Smith, O. A., and Korte, Lee (1967). *Experience with a Formal Reliability Program*. SAE Paper 670731, Farm, Construction and Industrial Machinery Meeting, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA.
- Romeu, J. L., and Ozturk, A. (1996). «A New Graphical Test for Multivariate Normality». In Hayakawa, T., Aoshima, M., and Shimizu, K. (eds.), *MSI-2000: Multivariate Statistical Analysis*, vol. II. American Sciences Press, Columbus, OH, pp. 5-48.
- Rutherford, John R. (1971). «A Logic Structure for Experimental Development Programs». *Chemical Technology*, March, pp. 159-164.
- SAS Institute, Inc. (1982). *SAS User's Guide: Basics*, 1982 Edition. SAS Institute, Cary, NC (Address: P.O. Box 8000, Cary 27511).
- Schmid, C. F. (1983). *Statistical Graphics, Design Principles and Practices*. John Wiley & Sons, New York.
- Sheesley, J. H. (1977). «Tests for Outlying Observations». *Journal of Quality Technology*, vol. 9, no. 1, pp. 38-41.
- Siotani, Minoru, Hayakawa, T., and Fujikoshi, Y. (1985). *Modern Multivariate Statistical Analysis: A Graduate Course and Handbook*. American Sciences Press, Columbus, OH.
- Sun, L., and Müller-Schwarze, D. (1996). «Statistical Resampling Methods in Biology: A Case Study of Beaver Dispersal Patterns». *American Journal of Mathematical and Management Sciences*, vol. 16, pp. 463-502.
- Thoman, D. R., Bain, L. J., and Antle, C. E. (1970). «Maximum Likelihood Estimation. Exact Confidence Intervals for Reliability and Tolerance Limits in the Weibull Distribution». *Technometrics*, vol. 12, no. 2, pp. 363-371.
- Volk, William (1956). «Industrial Statistics». *Chemical Engineering*, March, pp. 165-190.
- Wampler, R. H. (1970). «On the Accuracy of Least Squares Computer Programs». *Journal of the American Statistical Association*, vol. 65, no. 330, pp. 549-565.

- Wardrop, R. L. (1995). «Simpson's Paradox and the Hot Hand in Basketball». *The American Statistician*, vol. 49, no. 1, pp. 24-28.
- Wescott, M. E. *Mimeo Notes*. Rochester Institute of Technology, Rochester, NY.
- Western Electric Company, Inc. (1982). *Statistical Quality Control Handbook*. American Society for Quality Control, Milwaukee.
- Williamson, E., and Bretherton, M. H. (1963). *Tables of the Negative Binomial Probability Distribution*. John Wiley & Sons, New York.
- Zacks, Shelemyahu (1983). *Workshop on Statistical Methods of Reliability Analysis for Engineers*. Center for Statistics, Quality Control, and Design, State University of New York, Binghamton, NY.

Capítulo 45

CONTROL ESTADÍSTICO DEL PROCESO¹

Harrison M. Wadsworth

INTRODUCCIÓN	45.2	GRÁFICOS DE CONTROL PARA ATRIBUTOS	45.13
Definiciones	45.2	Gráficos de control de porcentaje de elementos defectuosos (p) ..	45.14
Notación	45.3	Gráficos de control del número de elementos defectuosos (np) ..	45.16
TEORÍA E HISTORIA DEL CONTROL ESTADÍSTICO DEL PROCESO	45.3	Gráficos de control del número de defectos (c)	45.17
ETAPAS PREVIAS A LA CONSTRUCCIÓN DE UN GRÁFICO DE CONTROL	45.4	Gráficos de control del número de defectos por elemento (u)	45.17
CONSTRUCCIÓN DE UN GRÁFICO DE CONTROL DE VARIABLES PARA ALCANZAR UN ESTADO DE CONTROL (NO SE DAN GRÁFICOS ESTÁNDAR)	45.6	GRÁFICOS DE CONTROL DE SUMAS ACUMULADAS	45.19
Gráficos de medias y recorridos (Gráficos $\bar{X}$ y R)	45.6	Construcción de un gráfico de control CUSUM para medias ..	45.20
Gráficos s	45.8	Límites en un gráfico CUSUM utilizando el método de tabulación	45.22
INTERPRETACIÓN DE LOS GRÁFICOS DE CONTROL	45.8	GRÁFICOS DE CONTROL DE MEDIAS MÓVILES PONDERADAS EXPONENCIALMENTE	45.23
GRÁFICOS DE CONTROL DE VALORES INDIVIDUALES	45.12	GRÁFICOS DE CONTROL CON POCOS DATOS	45.26
Cálculo de los límites de control ..	45.12	GRÁFICO DE AJUSTE MANUAL DE BOX-JENKINS	45.27
Recorridos móviles	45.13	GRÁFICOS DE CONTROL MULTIVARIANTES	45.28
Desviación típica	45.13		
CONSTRUCCIÓN DE GRÁFICOS DE CONTROL PARA VARIABLES CUANDO SE DA UN ESTÁNDAR ..	45.13		

¹ El material de control estadístico del proceso para la cuarta edición fue suministrado por Dorian Shainin y Peter D. Shainin.

PRE-CONTROL	45.28	Software para control estadístico del proceso	45.30
CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS AUTOMATIZADOS	45.30	REFERENCIAS	45.31

INTRODUCCIÓN

Este capítulo presenta la utilización de técnicas estadísticas en control de procesos. Inicialmente, el control estadístico de procesos se aplicó a procesos de producción; sin embargo, recientemente las organizaciones dedicadas fundamentalmente a servicios han reconocido la potencia de estas técnicas. El capítulo comienza con definiciones y comentarios sobre la notación. En lo posible, se han utilizado las definiciones que se encuentran normalmente en la terminología estándar. La utilizada aquí corresponde a la de American National Standards; sin embargo, hay también terminología estándar internacional con los mismos códigos numéricos. La utilizada aquí proviene de:

- ANSI/ISO/ASQC A8402-1994, *Quality Management and Quality Assurance—Vocabulary*.
- ANSI/ISO/ASQC A3534-1993, *Statistics—Vocabulary and Symbols*
Part 1: *Probability and General Statistical Terms*.
Part 2: *Statistical Quality Control*.

El lector puede utilizar estas referencias para la definición de términos adicionales. ANSI/ISO/ASQC A8402-1994 ha reemplazado a ANSI/ASQC A3, y ANSI/ISO/ASQC A3534-2 ha sustituido a ANSI/ASQC A1 y A2, que fue referenciada en las primeras ediciones de este libro.

Definiciones

- *Proceso*. Conjunto interrelacionado de recursos y actividades que transforman inputs (entradas) en outputs (salidas). [Nótese que recursos incluye personal, instalaciones, equipos, técnicas y métodos (ANSI/ISO/ASQC A8402-1994, cláusula 1.2)].
- *Estado de control estadístico*. Estado en el que las variaciones entre los resultados de las muestras observadas se pueden atribuir a un sistema de causas aleatorias que parecen no cambiar con el tiempo. [Nota: El conjunto de causas aleatorias se comporta como si los resultados fuesen consecuencias de extraer muestras aleatorias de una misma población] (ANSI/ISO/ASQC A3534-2-1993, cláusula 3.1.5)].
- *Proceso en control, proceso estable*. Proceso en el que cada una de las medidas de calidad (por ejemplo, la media y la variabilidad o la proporción de unidades no conformes, o la media de errores por cada elemento de un producto o de un servicio) está en estado de control estadístico (ANSI/ISO/ASQC A3534-2-1993, cláusula 3.1.6).
- *Causas aleatorias*. Son factores, generalmente muchos en número pero cada uno de ellos de pequeña importancia, que contribuyen a la variación del proceso y que no es necesario que sean identificados. [Nota: A las causas aleatorias se les llama también *causas comunes* de variación (ANSI/ISO/ASQC A3534-2-1993, cláusula 3.1.9)].
- *Causas asignables*. Factores (generalmente sistemáticos) que se pueden detectar e identificar como responsables de un cambio en una característica de calidad o en un nivel del proceso. [Notas: (1) A las causas asignables se les denomina *causas especiales* de variación; (2) muchas pequeñas causas de cambios son determinables, pero puede ser antieco-

nómico considerarlas o controlarlas; en este caso deben ser tratadas como causas aleatorias (ANSI/ISO/ASQC A3534-2-1993, cláusula 3.1.8)].

- *Gráfico de control.* Gráfico con límite de control superior y/o inferior en el que se dibujan los valores de una medida estadística para una serie de muestras o subgrupos, usualmente con el orden temporal o del número de la muestra. Normalmente, el gráfico tiene una línea central para ayudar a detectar una posible tendencia hacia uno u otro de los límites de control; en otros, los límites de control se basan en estándares adoptados o valores específicos aplicables a las medidas estadísticas que se van a dibujar en el gráfico (ANSI/ISO/ASQC A3534-2-1993, cláusula 3.3.1)].

Notación. Se utilizará la notación estándar estadística siempre que sea posible. Es decir, una medida de una característica de calidad se denotará por x ; los parámetros, con letras griegas, y los estadísticos, por letras del alfabeto romano. Una barra encima de una letra significará media, y una doble barra indicará media de medias. Otros símbolos se definirán cuando se les utilice.

TEORÍA E HISTORIA DEL CONTROL ESTADÍSTICO DEL PROCESO

Problemas sobre variación en productos fabricados por la Western Electric Company y estudios de resultados de muestreo llevaron al Dr. Walter A. Shewhart, de los Laboratorios Bell, al desarrollo de los gráficos de control sobre 1924. Una memoria inédita de Shewhart, de 16 de mayo de 1924, contiene el primer gráfico de control conocido. En artículos posteriores, Shewhart desarrolló el concepto de gráfico de control con mayor completitud [véase Shewhart (1926a, 1926b, 1927 y 1931) para más detalles de estos primeros esfuerzos]. En 1931, Shewhart publicaba su clásico libro, *Control de calidad económico de productos manufacturados*. Las primeras aplicaciones dadas por Shewhart de los gráficos de control fueron en fusibles, termostatos y emisoras en Hawthorne Works de Western Electric Company. Entre 1927-1928 se iniciaron muchas otras aplicaciones por todas partes de Western Electric Company por otro miembro del Departamento de Calidad de los Laboratorios Bell, Harold F. Dodge. Estas aplicaciones eran tanto complementos de los planes de inspección por muestreo como un instrumento básico para los gráficos de defectos por unidad, para asegurar periódicamente el nivel de calidad.

En 1935, Dodge preparó el *Manual ASTM de presentación de datos*, que estudia muchos tipos de gráficos de control. Este documento se conoce actualmente como ASTM MNL 7 (1990). Ha sido utilizado en la industria durante muchos años. Entre 1941-1942, Dodge fue el presidente del Comité Z1 de la Asociación Americana de Estándares, que publicó los estándares ASA Z1.1, Z1.2 y Z1.3 sobre gráficos de control. Después de la publicación de estos estándares se extendió el uso de los gráficos de control. Versiones revisadas de los tres estándares están disponibles en ANSI y ASQ (véase ANSI/ASQC 1985a, 1985b y 1985c). Durante la Segunda Guerra Mundial, el Departamento de Investigación y Desarrollo de la Producción de la Junta de Producción para la Guerra patrocinó cursos de formación sobre los principios de control de calidad (incluyendo la utilización de los gráficos de control y los planes de aceptación por muestreo), como un medio de garantizar la calidad y promocionar la mejora continua. Desde entonces se han hecho muchas extensiones y modificaciones de los gráficos de control básicos de Shewhart. Los gráficos de control se utilizan ahora mucho en cualquier industria. Son las herramientas principales del control estadístico del proceso (SPC).

En sus estudios, Shewhart observó que la variabilidad está presente tanto en los elementos de la naturaleza como en los manufacturados. El estudio de esta variación y su reducción son los métodos principales de la mejora de la calidad, siendo los gráficos de control la herramienta

más importante de que disponemos para este fin. Aunque dos artículos no son idénticos (variación), los grupos de observaciones siguen o bien pautas predecibles o bien pautas no predecibles en absoluto, lo que indica que la mejora del proceso es necesaria. Esto llevó a Shewhart a concluir dos importantes principios: (1) la variación es inevitable, y (2) las observaciones individuales apenas dan base para tomar decisiones objetivas. Se pueden representar los datos de varias formas para determinar pautas de las observaciones. Un método es obtener el histograma de las observaciones que representa la gráfica de la distribución. Otro método es representar las observaciones en el orden en que se obtienen. Así se obtiene una línea útil para observar tendencias o ciclos en los datos.

Shewhart recomendaba la utilización de un gráfico en forma de línea para analizar los datos. Además indicaba que había dos causas de variación. Una la llamaba *causas aleatorias*. Son sucesos que causan pequeñas fluctuaciones en los datos. Cada una puede ser tan pequeña que no es importante que ocurra o puede resultar antieconómico corregirla. Aunque cada una de ellas contribuye con una fluctuación pequeña, juntas determinan una pauta. Por el teorema central del límite y por observaciones empíricas, Shewhart concluyó que siguen aproximadamente la distribución normal. La segunda causa de variación se llama *asignable*; es decir, una causa que puede asignarse a una fluctuación observada. Provocan variaciones que ocasionan una separación significativa de los datos respecto a la pauta esperada debida a las causas aleatorias. Los gráficos de control desarrollados por Shewhart tienen unos límites obtenidos con la hipótesis de distribución normal provocada por las causas aleatorias. Cualquier observación que esté fuera de estos límites indica la presencia de una causa assignable. Además, dado que las observaciones se dibujan en el orden en que se presentan, las tendencias y otras pautas no naturales se pueden observar muy fácilmente.

Un gráfico de control es una representación gráfica de la variación de ciertos estadísticos producidos por el proceso. Aventaja al histograma en presentar los datos en la sucesión temporal en que van apareciendo. Nos muestra periódicamente la variación del proceso, así como la naturaleza de esta variación; indica si hay control estadístico o si no lo hay, y permite interpretar las pautas y detectar cambios en el proceso. Los gráficos básicos desarrollados por Shewhart fueron los de medias y desviaciones típicas. Se desarrollaron otros gráficos para recorridos de muestras, para porcentajes de artículos no correctos, y para número de desconformidades (manchas, arañazos, fallos de pintura...) por artículo o por cien artículos. Desde entonces se han hecho muchas mejoras y modificaciones de los gráficos básicos, tales como los gráficos de sumas acumuladas y los gráficos de media móvil ponderada exponencialmente, que permiten detección más rápida de pequeños cambios en el parámetro que se controla. Todos estos tipos de gráficos de control serán estudiados brevemente en este capítulo.

ETAPAS PREVIAS A LA CONSTRUCCIÓN DE UN GRÁFICO DE CONTROL

1. Elegir la característica de calidad de la que se desea hacer el gráfico. Al hacer esta elección hay varios factores que se deben considerar:
 - a. Elegir una característica que está teniendo actualmente un alto número de desconformidades o de artículos no conformes. El análisis de Pareto es útil para hacer esta elección.
 - b. Identificar las variables del proceso que influyen en las características del producto final para identificar posibilidades de hacer distintos gráficos de control.
 - c. Elegir características que proporcionen datos para identificar y diagnosticar problemas. Al elegir características, es importante recordar que los atributos proporcionan un resumen de datos y que se pueden utilizar para un número cualquiera de características. Por otra parte, las variables se utilizan sólo para una característica en cada

gráfico, pero son necesarios para diagnosticar problemas y proponer acciones sobre la característica.

- d. Determinar el punto adecuado en el proceso para localizar el gráfico. Este punto debe decirse antes del proceso para evitar disconformidades y evitar el trabajo adicional sobre los artículos no conformes.
2. Elegir el tipo de gráfico de control.
 - a. La primera decisión es cuándo utilizar gráficos de variables o de atributos. Un gráfico de variables se utiliza para controlar características individuales medibles, en tanto que un gráfico de atributos se utiliza en una inspección del tipo pasa o no pasa. Los gráficos de atributos se utilizan para controlar el porcentaje o número de artículos defectuosos o el número de disconformidades por artículo. Un gráfico de variables suministra la máxima información por variable inspeccionada. Se utiliza para controlar tanto el nivel del proceso como la variabilidad del proceso. Un gráfico de atributos proporciona con frecuencia un resumen de datos que puede ser utilizado para mejorar el proceso y controlar características individuales.
 - b. Elegir el tipo específico de gráfico que debe ser utilizado. Si se debe utilizar un gráfico de variables, hay que decidir si se utiliza el gráfico de medias y recorridos o bien el de medias y desviaciones típicas. Si es importante detectar pequeños cambios en la media, se debe utilizar un gráfico de sumas acumuladas o un gráfico de medias móviles con ponderación exponencial. La desventaja de estos dos últimos tipos de gráficos es que son más difíciles de utilizar y de entender para quien los debe de aplicar. Si no es posible obtener subgrupos de medidas, se deben utilizar medidas individuales, que se deben evitar cuando sea posible. En los gráficos de atributos se representa el porcentaje o el número de unidades disconformes. En algunos casos es preferible representar el número de disconformidades por artículo inspeccionado. Todos estos gráficos se discutirán más adelante.
3. Elegir la línea central del gráfico y la base para calcular los límites de control. La línea central puede ser la media de los datos anteriores (históricos), la media de los datos que se van a recoger, o cierto valor deseado (estándar). Los límites se obtienen sumando y restando tres desviaciones típicas al valor central, pero otros múltiplos de la desviación típica se pueden utilizar en función de otros factores de riesgo que se consideren. Si se utilizan tres desviaciones típicas, se tiene un riesgo despreciable de preocuparse por problemas que no existen, es decir, falsas alarmas. Sin embargo, este múltiplo puede darnos un riesgo apreciable de no detectar pequeños cambios en el parámetro que está siendo estudiado. Con menores múltiplos aumenta el riesgo de preocuparse por falsas alarmas, pero se reduce el riesgo de no detectar pequeños cambios. Es más caro preocuparse por problemas que no existen que olvidar algún pequeño problema; por esta razón, los límites $\pm 3\sigma$ son los que se eligen usualmente.
4. Elegir un subgrupo racional o muestra. Se debe señalar que el término *muestra* es el normalmente utilizado, si bien *muestra* puede significar un solo valor, y si es posible, es deseable utilizar muestras de más de un valor en los gráficos de control. En los gráficos de variables se utilizan muestras de 4 o 5 elementos, en tanto que en los gráficos de atributos se utilizan muestras cuyo número de elementos oscila de 50 a 100. Los gráficos de atributos se pueden utilizar con inspección al 100 por ciento como un reflejo del proceso subyacente involucrado. Además del tamaño de la muestra, se deben elegir las muestras de tal forma que la probabilidad de un cambio en el proceso se minimice durante la toma de la muestra (por ello se debe utilizar una muestra pequeña); en tanto que la probabilidad de un cambio, si va a ocurrir, es máxima entre dos muestras. Esto es el concepto de tomar *subgrupos racionales*. Por tanto es mejor tomar pequeñas muestras periódicamente que una única muestra grande. La experiencia es normalmente el mejor método para decidir la frecuencia con que se deben tomar las muestras. Es decir, la tasa de variación en una reacción química o la velocidad de desgaste de una herra-

mienta deben ser consideradas al decidir la frecuencia con que se toman las muestras. Si no se tiene experiencia, se toman las muestras con bastante frecuencia hasta que se obtiene la experiencia.

5. Diseñar un sistema para recoger los datos. Si los gráficos de control van a ser una herramienta usual en la fábrica o taller, la recogida de datos debe ser simple y relativamente libre de error. Los instrumentos de medida deben dar lecturas rápidas y fiables. Si es posible, los instrumentos de medida deben realmente registrar los datos, lo que eliminaría una fuente de muchos errores. Las hojas de recogida de datos deben ser diseñadas cuidadosamente para hacer posible la lectura rápida de los datos. Las hojas de datos se deben guardar en un lugar seguro, sin suciedad ni aceite.
6. Calcular los límites de control y dar instrucciones adecuadas a todos los involucrados en el gráfico de control sobre su significado y la interpretación de sus resultados. El personal de producción debe ser entendido y tener capacidad de ejecutar acciones correctivas cuando lo indiquen los gráficos.

CONSTRUCCIÓN DE UN GRÁFICO DE CONTROL DE VARIABLES PARA ALCANZAR UN ESTADO DE CONTROL (NO SE DAN GRÁFICOS ESTÁNDAR)

En este caso asumimos que no sabemos nada respecto al proceso, pero deseamos determinar si está en estado de control estadístico, es decir, ver si sólo hay causas aleatorias de variación presentes. El procedimiento para todos los tipos de gráfico es:

1. Tomar una serie de 20 o 30 muestras del proceso.
2. Mientras se toman esas muestras, guardar registros exactos de cualquier cambio en el proceso, como cambios en operarios, máquinas o materiales.
3. Calcular los límites de control provisionales de esos datos.
4. Dibujar los datos sobre un gráfico con los límites provisionales para determinar si hay muestras fuera de los límites de control, es decir, si alguno de los puntos dibujados está fuera de los límites de control.

Si ninguno de los puntos dibujados estuviese fuera de los límites de control provisionales, podemos decir que el proceso está «en control», y se pueden utilizar estos límites para mantenerlo en control. Si, por el contrario, alguno de los puntos dibujados está fuera de los límites de control, decimos que el proceso «no está en control». Esto significa que hay causas asignables de variación presentes. En este caso debemos determinar, a partir de lo registrado en la etapa 2 anterior si es posible, la causa de cada uno de los puntos fuera de control, eliminar esas muestras de los datos y recalcular los límites de control provisionales. Si algún punto quedase fuera de los nuevos límites, se debe repetir esta etapa hasta que no haya puntos fuera de los límites de control provisionales. Los límites finales deben ser utilizados para el futuro control.

Gráficos de medias y recorridos (Gráficos $\bar{X}$ y R). El conjunto de estos dos gráficos es el procedimiento de control estadístico de proceso más utilizado. Se usa cuando tenemos una característica particular que deseamos controlar, puesto que estos gráficos se utilizan cada vez para una sola característica. Además, los datos deben ser de tipo variable. Muchos usuarios de un proceso de control están interesados en cierto artículo del producto y en los valores de unas pocas características de calidad de esos artículos. Medias y recorridos de pequeñas muestras o subgrupos de artículos dan una buena medida de la naturaleza del universo que representan. Nos permiten controlar y tomar decisiones respecto del proceso del que provienen. El gráfico de medias se utiliza para controlar la media o tendencia central del proceso, mientras que el gráfico de recorridos se utiliza para controlar su variabilidad. En vez del reco-

rrido, a veces se utiliza la desviación típica, pero el recorrido (diferencia entre los valores máximo y mínimo de la muestra) es más fácil de calcular y más fácil de entender por los operarios.

Utilizando el convenio de límites de control a $\pm 3\sigma$, los límites de control para el gráfico de medias se sitúan en

$$\mu \pm 3\sigma_{\bar{x}} = \mu \pm 3\sigma / \sqrt{n}$$

donde μ = media del proceso
 σ = desviación típica del proceso
 n = tamaño de la muestra

Dado que los parámetros μ y σ son desconocidos, los debemos estimar a partir de los datos. La mejor estimación de μ es $\bar{\bar{X}}$, donde $\bar{\bar{X}}$ es la media de las medias de las muestras $\bar{X}$, y $\bar{X}$ se calcula por

$$\bar{X} = \sum x/n$$

La desviación típica del proceso se puede estimar en función de la media $\bar{R}$ de los recorridos de las muestras. El recorrido medio da una buena estimación de la desviación típica para muestras pequeñas, de menos de 12 elementos. La desviación típica se estima por el cociente entre el recorrido medio y la constante d_2 , donde d_2 es una función del tamaño de la muestra. Por tanto, los límites de control del gráfico de medias $\bar{X}$ se calculan por

$$LSC_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + 3\bar{R} / (d_2\sqrt{n}) = \bar{\bar{X}} + A_2 \bar{R}$$

$$LIC_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - 3\bar{R} / (d_2 \sqrt{n}) = \bar{\bar{X}} - A_2 \bar{R}$$

donde $A_2 = 3/(d_2\sqrt{n})$.

El gráfico de recorridos se calcula de forma similar como $\mu_R \pm 3\sigma_R$, donde μ_R y σ_R son la media y la desviación típica de la distribución de los recorridos de las muestras, respectivamente. El recorrido medio se estima por $\bar{R}$, y la desviación típica del recorrido es $\sigma_R = d_3\sigma$. Esto se puede estimar por $\sigma_R = d_3\bar{R}/d_2$. Por tanto, calculamos los límites de control del gráfico de recorridos por

$$LSC_R = \bar{R} + 3d_3(\bar{R}/d_2) = (1 + 3d_3/d_2)\bar{R} = D_4 \bar{R}$$

$$LIC_R = \bar{R} - 3d_3(\bar{R}/d_2) = (1 - 3d_3/d_2)\bar{R} = D_3 \bar{R}$$

donde los factores A_2 , D_3 y D_4 son funciones del tamaño n de la muestra que están tabuladas en la Tabla 45.1, junto con d_2 y d_3 , y algunos otros factores que se utilizarán más tarde en este capítulo. Una tabla más exhaustiva se encuentra en el Apéndice II, Tabla A.

Para construir estos dos gráficos se toman 20 o 25 muestras de tamaño n del proceso. Usualmente se toma $n = 4$ o 5 . Para cada muestra se calcula su media y su recorrido. Con las 20 o 25 medias y recorridos se calcula la media de las medias y el recorrido medio. Se calculan los límites de control superior e inferior para cada uno de esos gráficos. En la Tabla 45.1 se puede comprobar que para $n \leq 6$, el valor de D_3 es 0. Esto es debido a que si se calculase el límite de control inferior, sería negativo, lo que no tiene ningún sentido, ya que el recorrido siempre es positivo. El que el valor de D_3 sea 0 en estos casos no significa que el límite inferior de control para el recorrido sea 0. Simplemente significa que no hay límite inferior de control para los recorridos para estas muestras tan pequeñas.

Hay muchos ejemplos de estos gráficos en la literatura. El libro *Manual de control estadístico de calidad* (AT&T 1984) contiene muchas ilustraciones de gráficos de control utilizados por la Western Electric Company. Otros libros con excelentes descripciones de los gráficos de control y ejemplos de sus usos están en Grant y Leavenworth (1996), Ott y Schilling (1990), y Wadsworth et al. (1986).

TABLA 45.1 Factores de los gráficos de control

n	d_2	d_3	c_4	c_5	A	A_2	A_3	B_3	B_4	B_5	B_6	D_3	D_4
2	1,13	0,85	0,80	0,60	2,12	1,88	2,66	0	3,27	0	2,61	0	3,27
3	1,69	0,89	0,89	0,46	1,73	1,02	1,95	0	2,57	0	2,28	0	2,58
4	2,06	0,88	0,92	0,39	1,50	0,73	1,63	0	2,27	0	2,09	0	2,28
5	2,33	0,86	0,94	0,34	1,34	0,58	1,43	0	2,09	0	1,96	0	2,11
6	2,53	0,85	0,95	0,30	1,23	0,48	1,29	0,03	1,97	0,03	1,87	0	2,00
7	2,70	0,83	0,96	0,28	1,13	0,42	1,18	0,12	1,88	0,11	1,81	0,08	1,92
8	2,85	0,82	0,97	0,26	1,06	0,37	1,10	0,19	1,82	0,18	1,75	0,14	1,86
9	2,97	0,81	0,97	0,25	1,00	0,34	1,03	0,24	1,76	0,23	1,71	0,18	1,82
10	3,08	0,80	0,97	0,23	0,95	0,31	0,98	0,28	1,72	0,28	1,67	0,22	1,78

Ejemplo 45.1: Las Figuras 45.1 y 45.2 ilustran la utilización de los gráficos de medias ($\bar{X}$) y recorridos (R). Las figuras son autoexplicativas y siguen los procedimientos explicados antes. Se puede observar que el gráfico de recorridos está en control, pero la sucesión de puntos en el gráfico de medias ($\bar{X}$) empieza con un nivel bajo y después de un ajuste muestra un buen control durante un rato. Sin embargo, los últimos ocho puntos están por encima de la línea central, y tres de esos puntos están por encima del límite superior de control.

Gráficos s . Para medir la dispersión de un proceso se puede sustituir el recorrido muestral por la desviación típica muestral s . Calcularíamos la desviación típica de cada muestra, hallaríamos la media de las desviaciones típicas muestrales y calcularíamos los límites de control con las ecuaciones

$$LCS_s = B_4 \bar{s}$$

$$LCI_s = B_3 \bar{s}$$

donde los valores de B_3 y B_4 se pueden encontrar en la Tabla 45.1 y en el Apéndice II, Tabla A.

La desviación típica tiene mejores propiedades matemáticas que el recorrido y su cálculo es relativamente sencillo con las calculadoras y ordenadores actuales. Sin embargo, el recorrido es más sencillo de entender por los operarios con formación estadística limitada, y por esta razón, el gráfico de recorridos es el gráfico de control más utilizado para controlar la variabilidad de procesos.

INTERPRETACIÓN DE LOS GRÁFICOS DE CONTROL

Lo usual es colocar el gráfico de medias $\bar{X}$ encima del gráfico de recorridos (o del gráfico de desviaciones típicas). Así, los dos estadísticos calculados para cada muestra se localizan fácilmente y resultan obvias las relaciones entre ellos. Buscamos puntos o pautas no usuales en los puntos dibujados en cada gráfico. Un proceso estable, es decir, un proceso bajo control estadístico, generalmente no produce pautas anómalas reconocibles. Produce una distribución aleatoria de los datos que posee varias características esenciales. Hemos observado previamente que los límites de control se colocan en los extremos de la distribución que sigue el estadístico que está siendo estudiado. Por tanto, los datos procedentes de un proceso en control deberán tener las siguientes características cuando se dibujan en un gráfico de control:

- La mayoría de los puntos dibujados están cerca de la línea central.
- Unos pocos puntos están cerca de los límites de control.

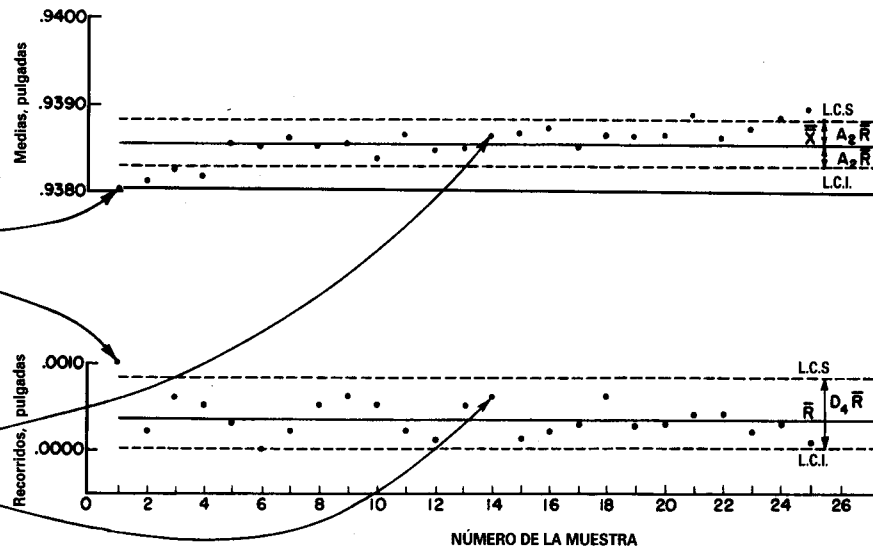
HOJA DE DATOS PARA UN GRÁFICO DE CONTROL

PIEZA NÚMERO: 102 J														DESCRIPCIÓN: EJE		
LOTE NÚMERO: 195						ORDEN NÚMERO: 7 - 18				MÁQUINA NÚMERO: SBL - 20				DEPARTAMENTO: MOTORES		
OPERACIÓN: COMPROBACIÓN DE LONGITUD						OPERARIO: BROWN				TURNOS: 1		FECHA 12-17-48		INSPECTOR: SMITH		
MUESTRA #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	NO.	X	R
	.9382	.9382	.9385	.9379	.9384	.9385	.9387	.9387	.9388	.9381	.9386	.9385	.9386	1	.93800	.0010
	.9378	.9380	.9382	.9380	.9385	.9385	.9385	.9386	.9382	.9385	.9387	.9384	.9386	2	.93810	.0002
	.9385	.9380	.9383	.9384	.9387	.9385	.9385	.9385	.9386	.9383	.9387	.9385	.9386	3	.93822	.0006
	.9375	.9382	.9379	.9384	.9386	.9385	.9387	.9382	.9386	.9386	.9385	.9384	.9381	4	.93818	.0005
														5	.93855	.0003
TOTAL	3.7520	3.7524	3.7529	3.7527	3.7542	3.7540	3.7544	3.7540	3.7542	3.7535	3.7545	3.7538	3.7539	6	.93850	.0000
X	.93800	.93810	.93822	.93818	.93855	.93850	.93860	.93850	.93855	.93838	.93862	.93845	.93848	7	.93860	.0002
R	.0010	.0002	.0006	.0005	.0003	.0000	.0002	.0005	.0006	.0005	.0002	.0001	.0005	8	.93850	.0005
														9	.93855	.0006
MUESTRA #	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	10	.93838	.0005	
	.9382	.9386	.9388	.9385	.9387	.9388	.9385	.9386	.9384	.9387	.9387	.9390	11	.93862	.0002	
	.9387	.9387	.9387	.9387	.9387	.9385	.9387	.9390	.9386	.9388	.9387	.9389	12	.93845	.0001	
	.9388	.9387	.9388	.9385	.9383	.9386	.9386	.9390	.9386	.9388	.9389	.9389	13	.93848	.0005	
	.9388	.9386	.9386	.9384	.9389	.9386	.9385	.9389	.9388	.9386	.9390	.9390	14	.93862	.0006	
													15	.93865	.0001	
TOTAL	3.7545	3.7546	3.7549	3.7541	3.7538	3.7545	3.7538	3.7483	3.7544	3.7549	3.7553	3.7558	16	.93872	.0002	
X	.93862	.93865	.93872	.93852	.93865	.93862	.93865	.93888	.93860	.93872	.93882	.93895	17	.93852	.0003	
R	.0006	.0001	.0002	.0003	.0006	.0003	.0003	.0004	.0004	.0002	.0003	.0001	18	.93865	.0006	
LÍMITES PARA EL GRÁFICO DE MEDIAS LÍMITE SUPERIOR DE CONTROL = $\bar{X} + A_2 \bar{R}$ LÍMITE INFERIOR DE CONTROL = $\bar{X} - A_2 \bar{R}$ $\bar{X} = .938541$ CALCULADOS DE LOS DATOS INSPECCIONADOS. $\bar{R} = .00036$ VÉASE LAS DOS ÚLTIMAS COLUMNAS DE ESTA HOJA LA CONSTANTE A_2 SE OBTIENE DE LAS TABLAS (VÉASE FIGURA 45.2). PARA UNA MUESTRA DE TAMAÑO = 4, $A_2 = 0.729$ $A_2 \bar{R} = .729 \times .00036 = .000262$ L.S.C = $.938541 + .000262 = .938803$ L.I.C = $.938541 - .000262 = .938279$														19	.93862	.0003
														20	.93865	.0003
														21	.93888	.0004
														22	.93880	.0004
														23	.93872	.0002
														24	.93882	.0003
														25	.93895	.0001
														TOTAL	23.46353	0.0090
LÍMITES PARA EL GRÁFICO DE RECORRIDOS LÍMITE SUPERIOR DE CONTROL = $D_4 \bar{R}$ LÍMITE INFERIOR DE CONTROL = $D_3 \bar{R}$ $\bar{R} = .00036$ (VÉASE LA ÚLTIMA COLUMNA DE ESTA HOJA) LAS CONSTANTES D_3 Y D_4 SE OBTIENEN DE LAS TABLAS (VÉASE FIGURA 45.2). PARA UNA MUESTRA DE TAMAÑO = 4, $D_3 = 0.000$, $D_4 = 2.282$ L.S.C = $2.282 \times .00036 = .00082$ L.I.C = $0 \times .00036 = 0$														$\bar{X} = \frac{23.46353}{25}$ $\bar{R} = \frac{0.0090}{25}$ $\bar{X} = .938541$ $\bar{R} = .00036$		

FIGURA 45.1 Hoja de datos para determinar si un proceso está en control.

EXTRACTOS DE LA HOJA
DE DATOS PARA EL GRÁFICO
DE CONTROL

PIEZA NÚMERO	102 J	
LOTE NÚMERO	195	
OPERACIÓN		
MUESTRA NÚMERO	1	2
	.9382	.9382
	.9378	.9380
	.9385	.9380
	.9385	.9382
TOTAL	3.7520	3.7524
$\bar{X}$	.9380	.9380
R	.0010	.0002
MUESTRA NÚMERO	14	15
	.9387	.9386
	.9388	.9387
	.9388	.9387
	.9388	.9386
TOTAL	3.7545	3.7546
$\bar{X}$	.9386	.9386
R	.0006	.0001

EXTRACTOS DE LA HOJA
DE DATOS PARA EL
GRÁFICO DE CONTROL

DEPARTAMENTO MOTORES		
INSPECTOR Smith		
NÚMERO	$\bar{X}$	R
1	.9380	.0010
2	.9380	.0002
25	.9385	.0001
TOTAL	23.6350	0.0090
$\bar{X}$	.9386	.00036
$\bar{R}$	.0006	.00036

LÍMITES PARA EL GRÁFICO DE MEDIAS

$$A_2 \bar{R} = .729 \times .00036 = .000262$$

LÍMITES PARA EL GRÁFICO DE RECORRIDOS

$$D_4 \bar{R} = 2.282 \times .00036 = .00082$$

$$D_3 \bar{R} = 0 \times .00036 = 0$$

FIGURA 45.2 Cómo construir el gráfico de control de Shewhart.

- Es muy extraño que algún punto pueda estar fuera de los límites de control.
- Los puntos dibujados siguen una distribución aleatoria, sin agrupamientos, tendencias u otras disposiciones diferentes de las de una distribución aleatoria.

Después de haber considerado las pautas naturales, vamos a considerar pautas no naturales de los puntos dibujados en un gráfico de control. Ciertamente, una disposición de puntos a la que le falte una o más de las características precedentes es una disposición no natural, pero vamos a considerar cada una de ellas y a considerar las posibles razones por las que los datos no siguen las reglas dadas anteriormente.

Muchos de los datos del gráfico de medias pueden no estar cerca de la línea central por diferentes razones. Si el valor de la media cambia de tiempo en tiempo, los datos pueden agruparse alrededor de dos líneas por encima y por debajo de la línea central. Esto puede ocurrir cuando hay, por ejemplo, dos máquinas o dos personas trabajando a niveles ligeramente diferentes en una cadena de producción.

La ausencia de la segunda de las características de un proceso en control, que unos pocos puntos están cerca de los límites de control en el gráfico de medias, puede estar causada por dos procesos con diferentes medias que se mezclan en las muestras obtenidas para construir el gráfico de control. Las medias muestrales tienden entonces a fluctuar alrededor de la línea central, pero el recorrido de cada muestra será muy grande (¡está hinchado!), provocando unos límites de control muy separados del valor central. En este caso el gráfico de las medias parece estar en muy buen control, pero el gráfico de los recorridos mostrará excesiva variación. Pautas de datos a las que les falte la tercera de las características precedentes, el que sea muy extraño que algún punto pueda estar fuera de los límites de control, puede indicar cambios frecuentes en la media del proceso o variabilidad creciente.

Respecto a la falta de la cuarta característica de las pautas naturales, ejemplos de pautas no naturales son cambios repentinos de nivel, tendencias, rachas o agrupamientos. Una discusión detallada de este punto se puede encontrar en el *Manual del control estadístico de la calidad* (AT&T 1984), donde se expone un diccionario de anomalías de los gráficos de control.

Si un proceso está «en control», hay un riesgo de 0,0013, o de un 0,13 por ciento, de investigar un cambio en el proceso cuando no ha habido ningún cambio, debido a que un punto quede fuera de alguno de los límites de control, dando un riesgo total de 0,0026, es decir, un 0,26 por ciento, de buscar una causa que no existe. Se le llama el *riesgo de un error de tipo I*, o un α riesgo. También se le llama el *riesgo del productor*. Si el proceso está realmente fuera de control, la probabilidad de que un punto quede fuera de un límite de control es mucho mayor. Es tanto más probable cuanto más fuera de control está el proceso. El riesgo de que un punto no quede fuera de los límites de control, y que por tanto no detecte un cambio, es el *riesgo de un error de tipo II*, o un β riesgo. Este riesgo se llama también el *riesgo del consumidor*.

Los límites de control se colocan de manera que el α riesgo sea bajo. Límites más amplios de 3σ nos ahorrarían sólo unas pocas investigaciones innecesarias y podrían causar un retraso en la investigación de situaciones de estar fuera de control. Límites mucho más estrechos incrementarían la incidencia de investigaciones innecesarias, en tanto que no reducirían significativamente el retraso en la detección de situaciones de fuera de control. La regla de investigar cada punto que esté a más de tres desviaciones típicas de la media es un compromiso razonable.

Cuando se han calculado los límites de control, hay una información que se puede obtener del gráfico y que no está contenida en la regla precedente. Es raro, y aproximadamente de la misma probabilidad, que se presenten los siguientes sucesos en un proceso en control:

1. Un punto fuera de uno de los límites de control a tres desviaciones típicas.
2. Dos de tres puntos consecutivos fuera de dos desviaciones típicas.
3. Cuatro de cinco puntos consecutivos más allá de una desviación típica.
4. Ocho puntos consecutivos al mismo lado de la línea central.

Cada uno de estos sucesos debe ser visto como una señal de estar el proceso fuera de control, que requiere la necesaria atención.

El uso de las cuatro reglas precedentes es opcional, si bien se ha demostrado que son muy prácticas en muchos casos. Fueron recomendadas en 1956 por la Western Electric Company en su programa de control de calidad. Las tres últimas se aplican sólo en gráficos de control con límites simétricos. Su utilización conjunta incrementa el α riesgo cuando el proceso está en control, pero decrece el β riesgo cuando el proceso no está en control.

GRÁFICOS DE CONTROL DE VALORES INDIVIDUALES

Muchas veces no es práctico tomar una muestra de varios elementos de un proceso. Esto es particularmente cierto para la industria química o para otros procesos continuos o cuando se estudian variables como temperatura o presión. Otras situaciones en las que sólo tiene sentido realizar una única observación son en contabilidad, eficiencia, proporciones, ventas o costos de calidad. En tales situaciones, si tomamos varias muestras del proceso al mismo tiempo, lo que estaremos chequeando es nuestro instrumento de medida y no el proceso de producción. En este caso tomaríamos una sola observación cada vez que sacamos una muestra. Un gráfico de control que se base en una observación se llama un *gráfico de valores individuales* o un *gráfico X*. Como no utilizamos medias, no tenemos los beneficios del teorema central del límite, que nos dice que la distribución de las medias es aproximadamente normal con independencia de la distribución de los valores individuales. Por tanto, un gráfico *X* es mucho más sensible a la falta de normalidad de la distribución que un gráfico de medias ($\bar{X}$).

Dado que tomamos sólo una observación, no tenemos una manera obvia de estimar la desviación típica que podamos utilizarla para determinar los límites de control para el gráfico *X*. Tenemos dos posibles elecciones: podemos utilizar recorridos móviles, es decir, diferencias entre dos observaciones sucesivas, o podemos calcular la desviación típica de 20 o más observaciones sucesivas. Si el proceso no cambia, ambos estadísticos darán aproximadamente la misma respuesta. Sin embargo, si el proceso cambia, el recorrido móvil minimizará el efecto del cambio. Por tanto, este método es el normalmente utilizado.

El procedimiento básico para construir gráficos *X* es:

1. Seleccionar la característica medible que va a ser estudiada.
2. Recoger suficientes observaciones (20 o más) para un estudio inicial. Las observaciones deben estar lo suficientemente alejadas para permitir al proceso que pueda experimentar cambios.
3. Calcular los límites de control y la línea central para el estudio inicial utilizando las fórmulas dadas más adelante.
4. Establecer el gráfico de control inicial utilizando la línea central y los límites de control, y representar las observaciones obtenidas en la etapa 2. Si todos los puntos están entre los límites de control y no hay pautas no naturales, utilizar los límites de control obtenidos para el control en el futuro.
5. Revisar los límites de control y la línea central en cuanto sea necesario (quitando los puntos fuera de control o las tendencias, etc.) para ayudar a la mejora del proceso.
6. Evaluar periódicamente la efectividad del gráfico, revisándolo o interrumpiéndolo cuando sea necesario.

Cálculo de los límites de control. Los límites de control para el gráfico *X* se calculan de forma similar a los del gráfico $\bar{X}$. Por tanto, se colocan los límites de control en la línea central ± 3 desviaciones típicas. Se colocarán en

$$\mu \pm 3\sigma$$

La media $\bar{X}$ de las observaciones se utiliza normalmente para estimar la media μ del proceso. Si se tiene un caso estándar y se conoce la desviación típica σ que se introduce en la ecuación precedente. Si se considera un caso no estándar, se debe estimar la desviación típica, que, como se mencionó antes, se puede hacer por los recorridos móviles o por la desviación típica de las observaciones.

Recorridos móviles. El recorrido móvil es la diferencia entre el mayor y el menor de dos observaciones sucesivas. Por tanto, para un total de n observaciones hay $n - 1$ recorridos móviles, que promediados nos darán el recorrido medio móvil $\bar{R}$. Los límites de control se obtienen de forma similar a los de los gráficos utilizando subgrupos, es decir,

$$LSC_x = \bar{X} + 3\bar{R}/d_2 = \bar{X} + E_2\bar{R}$$

$$LIC_x = \bar{X} - 3\bar{R}/d_2 = \bar{X} - E_2\bar{R}$$

donde los valores de $E_2 = 3/d_2$ se encuentran en la Tabla Y del Apéndice II. Para recorridos móviles con $n = 2$, se tiene (véase Tabla Y del Apéndice II) que $E_2 = 3/1,3 = 2,66$. Por tanto, los límites de control para un gráfico de valores individuales vienen dados por

$$LSC_x = \bar{X} + 2,66\bar{R}$$

$$LIC_x = \bar{X} - 2,66\bar{R}$$

Desviación típica. Como una alternativa al método de los recorridos móviles, a veces se calcula la desviación típica s de las observaciones. En este caso, los límites de control son

$$\bar{X} \pm 3s$$

Si la media del proceso cambia, por ejemplo en el caso de una tendencia, el método de la desviación típica no dará unos límites de control muy separados. Si la media del proceso permanece relativamente constante, ambos métodos dan aproximadamente los mismos límites de control.

CONSTRUCCIÓN DE GRÁFICOS DE CONTROL PARA VARIABLES CUANDO SE DA UN ESTÁNDAR

Cuando se dan unos valores de los parámetros, se tiene lo que se llama un *gráfico con unos estándares dados*. En este caso, el valor estándar para la media se representa por $\bar{X}_0$ y el valor estándar para la desviación típica se denota por σ_0 . Los límites de control para el gráfico de medias son

$$\bar{X}_0 \pm 3\sigma_0/\sqrt{n} = \bar{X}_0 \pm A\sigma_0$$

donde A es función del tamaño n de la muestra y se tabula en la Tabla 45.1 y en la Tabla A del Apéndice II. Los límites de control para un gráfico de valores individuales son los mismos, salvo que al ser el tamaño de la muestra $n=1$, se tiene simplemente $\bar{X}_0 \pm 3\sigma_0$.

GRÁFICOS DE CONTROL PARA ATRIBUTOS

Los gráficos de control para variables requieren efectivamente mediciones, tales como longitud, peso, resistencia a la tensión, etc. Datos del tipo pasa no pasa no se pueden utilizar para estos tipos de gráficos. Los gráficos para atributos, por otra parte, se pueden utilizar en las

situaciones en que lo único que nos interesa es contar el número de artículos defectuosos o el número de defectos en una muestra. Hay varias ventajas de los gráficos de atributos frente a los gráficos de variables:

1. Los gráficos de atributos se pueden utilizar para estudiar diferentes tipos de errores al mismo tiempo, en tanto que un gráfico de variables sólo sirve para estudiar una característica de calidad.
2. La toma de datos en los gráficos de atributos es mucho más simple que en los gráficos de variables. Simplemente necesitamos conocer si el artículo inspeccionado cumple las especificaciones requeridas.
3. Los gráficos de atributos se pueden utilizar en inspecciones visuales para atributos tales como limpieza, etiquetado correcto, color correcto, etc.
4. Los gráficos de atributos no dependen de la distribución estadística subyacente.

En contrapartida, los gráficos de variables necesitan un menor tamaño de muestra. En los gráficos discutidos antes utilizamos tamaños de muestra iguales a 4 o 5 elementos, en tanto que los gráficos de atributos requieren tamaños de muestra de 50 elementos como mínimo. Los gráficos de atributos se utilizan frecuentemente para inspección al 100 por ciento, lo que sería muy difícil en los gráficos de variables. Los gráficos de control de atributos más comunes son el gráfico p de proporción de unidades defectuosas, el gráfico np de número de unidades defectuosas, el gráfico c de número de defectos, y el gráfico u de número de defectos por artículo. Los discutimos a continuación en este orden.

Gráficos de control de porcentaje de elementos defectuosos (p). La variable que va a ser controlada aquí es el porcentaje o fracción en cada muestra de artículos defectuosos respecto a los requerimientos de calidad. Por tanto, se divide el número de artículos inspeccionados con uno o más defectos entre el número de artículos inspeccionados. El cociente es la fracción de artículos defectuosos. A veces este cociente se multiplica por 100, y la variable representada es el tanto por ciento de artículos defectuosos. Si se asume que la proporción de defectos en el proceso es constante, la distribución de la variable es la binomial. Los detalles de esta distribución se expusieron en el Capítulo 44. Para muestras relativamente grandes, la distribución binomial se puede aproximar con bastante exactitud por la distribución normal, y como en los gráficos de variables se tienen que todos los datos deben distar de la media menos de tres desviaciones típicas. Datos fuera de las tres desviaciones típicas significan falta de control estadístico. Por tanto, los límites de control se colocan en estos valores ($p \pm 3\sigma_p$).

Recuérdese que la desviación típica para una variable binomial es

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}}$$

Por tanto, los límites de control superior e inferior para un gráfico p están en

$$\bar{p} \pm 3 \sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}}$$

Aunque el gráfico p se utiliza normalmente para inspección del tipo pasa no pasa, también se puede utilizar para inspección por medición. Entonces se considera defectuosa una pieza si sus medidas están fuera de un conjunto especificado de límites. Sin embargo, en estos casos no se recomienda la utilización de un gráfico p , pues es menos capaz de diagnosticar causas de defectos. Un gráfico p para determinar los límites de control se encuentra en el Gráfico Z del Apéndice II.

El gráfico p se puede utilizar cuando el tamaño de la muestra es o no constante. Dado que en la fórmula anterior n es el tamaño de la muestra, si n varía de subgrupo a subgrupo, lo que es

frecuente cuando el gráfico se utiliza para inspección al 100 por ciento, los límites de control varían. Son más anchos para pequeños subgrupos que para subgrupos grandes. Si el tamaño del subgrupo varía, tenemos tres posibilidades:

1. Podemos calcular el tamaño medio de los subgrupos. Esto es apropiado cuando los tamaños de los grupos son similares o cuando todos los datos están cerca de la línea central.
2. Podemos calcular límites de control separados para cada subgrupo. Esto puede conducir a un gráfico confuso.
3. Podemos encontrar un tamaño medio de los subgrupos y calcular los límites correspondientes para ese tamaño medio de subgrupos, pero cuando un punto esté cerca de los límites, se calculan los límites reales utilizando el tamaño real del subgrupo.

Lo recomendable es la tercera posibilidad. Al utilizarla debemos recordar que un tamaño del subgrupo mayor que el tamaño medio significa que los límites se desplazan hacia la línea central, por lo que si en ese caso un punto está fuera de los límites, no es necesario recalcular los límites con el tamaño real del subgrupo.

Para construir un gráfico p deberemos, como para gráficos de variables, recoger 20 o 25 muestras durante un período suficiente de tiempo para permitir al proceso incorporar toda la variabilidad. Si los tamaños de las muestras son todos iguales, se determinan el número de elementos defectuosos en cada muestra y se divide dicho número por el tamaño del subgrupo, y se promedian los cocientes obtenidos. Así se obtiene el valor de $\bar{p}$ en la expresión precedente de los límites de control. Para encontrar esta p media, primero añadimos todos los elementos defectuosos y los elementos inspeccionados de cada subgrupo; luego dividimos el primer total por la segunda media lograda. Es necesario seguir este segundo procedimiento cuando el tamaño del subgrupo cambia. Como un ejemplo para mostrar la importancia de este procedimiento, supongamos que tenemos cinco lotes de un producto terminado, según muestra la Tabla 45.2. N es el tamaño del lote, x es el número de elementos defectuosos en cada lote, y p es la proporción de elementos defectuosos. Estamos inspeccionando todos los artículos en cada lote.

Si simplemente promediásemos la proporción de elementos defectuosos en la columna derecha, obtendríamos $\bar{p} = 0,590/5 = 0,118$. Esto nos daría unos límites de control superior, utilizando los tamaños reales de los lotes de 0,161, 0,255, 0,152, 0,215 y 0,197. Ninguno de estos lotes está fuera de control. Sin embargo, si en lugar del procedimiento anterior, calculamos $\bar{p} = 90/1.600 = 0,056$, obtenemos límites de control superior iguales a 0,087, 0,154, 0,081, 0,125 y 0,113. En este caso, tres de los cinco lotes (los lotes 2, 4 y 5) están por encima del límite superior de control, lo que indica que no tenemos un proceso estable. La verdadera media de la proporción de elementos defectuosos es 0,056 y no 0,118. Este último número presupone dar el mismo tratamiento a cada lote, a pesar de que sus tamaños son muy diferentes unos de los otros.

TABLA 45.2 Resultados de la inspección de cinco lotes

Lote	N	x	p
1	500	32	0,064
2	50	10	0,200
3	800	10	0,013
4	100	18	0,180
5	150	20	0,133
Totales	1.600	90	0,590

Para todos los tipos de gráficos de control de atributos, el límite inferior de control, cuando se calcula utilizando las expresiones adecuadas, puede ser negativo. Esto, naturalmente, no tiene sentido, por lo que simplemente no tenemos límite de control inferior en esos casos. En el ejemplo precedente se aplica esta consideración a los lotes 2, 4 y 5. Nótese que el lote 3 está realmente debajo de su límite de control inferior, que es, en este caso, 0,032. Esto significa que su calidad, medida en términos de proporción de elementos defectuosos, es mejor que la media de los otros lotes. Algunos utilizan cero como límite de control inferior cuando el límite calculado es negativo. Esto puede llevar al concepto erróneo de que una muestra con valor cero significa que el subgrupo no está en control.

Ejemplo 45.2: La Tabla 45.3 y la Figura 45.3 nos muestran un gráfico *p*. La Tabla 45.3 contiene el resultado final de un test aplicado a imanes permanentes de relés eléctricos. Hay un total de 14.091 imanes chequeados y 1.030 fueron encontrados defectuosos. El promedio de imanes chequeados por semana fue de $\bar{n}=14.091/19=741,6$. El promedio de defectuosos fue $\bar{p}=1.030/14.091=0,073$. La Figura 45.3 nos da el gráfico de control con límites basados en estos valores de $\bar{n}$ y $\bar{p}$. Utilizando las fórmulas precedentes, los límites de control superior e inferior se sitúan en $0,073 \pm 0,0287$, es decir, 0,102 y 0,044.

Gráficos de control del número de elementos defectuosos (*np*). En este caso representamos el número de elementos defectuosos en cada subgrupo. Dado que *p* es *x/n*, *x* es igual a *np*, donde *x* es el número de elementos defectuosos, y al gráfico se le llama frecuentemente el gráfico *np*. Este tipo de gráfico exige que el tamaño de la muestra sea constante. En este caso los límites de control se colocan en

$$n\bar{p} \pm 3 \sqrt{n\bar{p}(1 - \bar{p})}$$

TABLA 45.3 Datos para el gráfico *p*

Producción semanal			Final de montaje y test	
Subgrupo:			Inspeccionado en:	
Semana número	Fecha final de semana	Imanes inspeccionados	Imanes con defectos	Proporción de defectos
1	12/3	724	48	0,067
2	12/10	763	83	0,109
3	12/17	748	70	0,094
4	12/31	748	85	0,114
5	1/7	724	45	0,062
6	1/14	727	56	0,077
7	1/21	726	48	0,066
8	1/28	719	67	0,093
9	2/4	759	37	0,049
10	2/11	745	52	0,070
11	2/18	736	47	0,064
12	2/25	739	50	0,068
13	3/4	723	47	0,065
14	3/11	748	57	0,076
15	3/18	770	51	0,066
16	3/25	756	71	0,094
17	4/1	719	53	0,074
18	4/8	757	34	0,045
19	4/15	760	29	0,038
Totales		14.091	1.030	
Medias		741,6	54,2	0,073

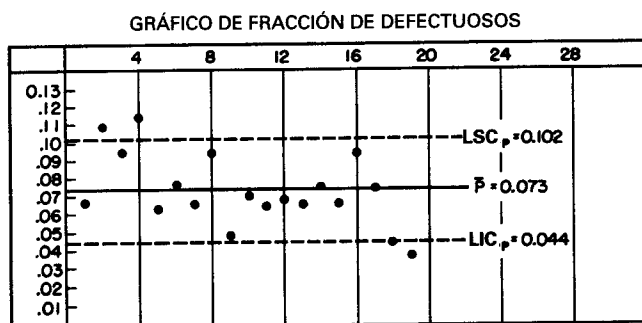


FIGURA 45.3 Gráfico p de imanes permanentes.

o utilizando la media $\bar{X}$ de elementos defectuosos por subgrupo, los límites de control se pueden expresar de forma equivalente por

$$\bar{X} \pm 3 \sqrt{\bar{X}(1 - \bar{X}/n)}$$

Gráficos de control del número de defectos (c). Si deseamos dibujar el número de defectos, donde cada elemento inspeccionado puede tener varios defectos, y se hace el recuento de todos los defectos, obtenemos un gráfico c , donde c es el número de defectos en cada muestra. En este caso, la distribución subyacente es la distribución de Poisson, discutida en el Capítulo 44. Recuerdese que en esta distribución la desviación típica es la raíz cuadrada de la media, por lo que si cogemos 20 o 25 muestras y calculamos la media de defectos $\bar{c}$, los límites de control se sitúan en

$$\bar{c} \pm 3 \sqrt{\bar{c}}$$

Un gráfico para determinar los límites de control como gráfico c se encontrará en el Gráfico AA del Apéndice II.

Un gráfico c exige *número grande e igual de posibilidades* de que aparezcan defectos en cada subgrupo inspeccionado. Así, por ejemplo, si estamos inspeccionando el número de soldaduras defectuosas en una tarjeta de circuitos, todas las tarjetas deben tener el mismo número de conexiones. En caso contrario, deberemos utilizar un gráfico u , que se discute a continuación.

Ejemplo 45.3: Un gráfico de control c se utiliza para controlar defectos en láminas. La Tabla 45.4 muestra el resultado de una serie de tests —poros— para probar la impermeabilidad de las láminas a los aceites. Se cogen muestras de 11 por 17 pulgadas y se aplica tinta coloreada en una parte de la lámina. Cada borrón de tinta que aparece en la otra parte de la lámina en menos de 5 minutos se considera como un defecto.

La línea central del gráfico se sitúa en $\bar{c} = 200/25 = 8,0$ defectos por hoja. Los límites de control se sitúan en $8,0 \pm 3\sqrt{8} = 8,0 \pm 8,5$, o 0 y 16,5. Por tanto, hay un único límite superior de control en 16,5. El gráfico resultante está en la Figura 45.4.

Gráficos de control del número de defectos por elemento (u). Este gráfico se llama a veces el *gráfico c estandarizado*. Se utiliza cuando las muestras están formadas por más de un elemento y cada elemento puede tener más de un defecto. La variable que se dibuja en el gráfico es el número de defectos por elemento. El número de elementos en cada muestra no es nece-

TABLA 45.4 Datos para el gráfico *c*

Número de poros (= Número de borrones de tinta)		Número de poros (= Número de borrones de tinta)	
Hoja número		Hoja número	
1	8	14	6
2	9	15	14
3	5	16	6
4	8	17	4
5	5	18	11
6	9	19	7
7	9	20	8
8	11	21	18
9	8	22	6
10	7	23	9
11	6	24	10
12	4	25	5
13	7	Total	200

sario que permanezca constante, como debía suceder en el gráfico *c*. Los límites de control se calculan de forma similar a los del gráfico *c*, con la diferencia de que ahora la variable es *c/n*, donde *n* es el número de elementos de la muestra. Por ejemplo, si estamos investigando el número de puntos de soldadura defectuosos en una tarjeta con un circuito impreso y las tarjetas tienen diferente número de puntos de soldadura, se divide el número de puntos de soldadura defectuosos en cada tarjeta entre el número total de puntos de soldadura en cada tarjeta.

Los límites de control para el gráfico *u* son

$$\bar{u} \pm 3\sqrt{\bar{u}/n}$$

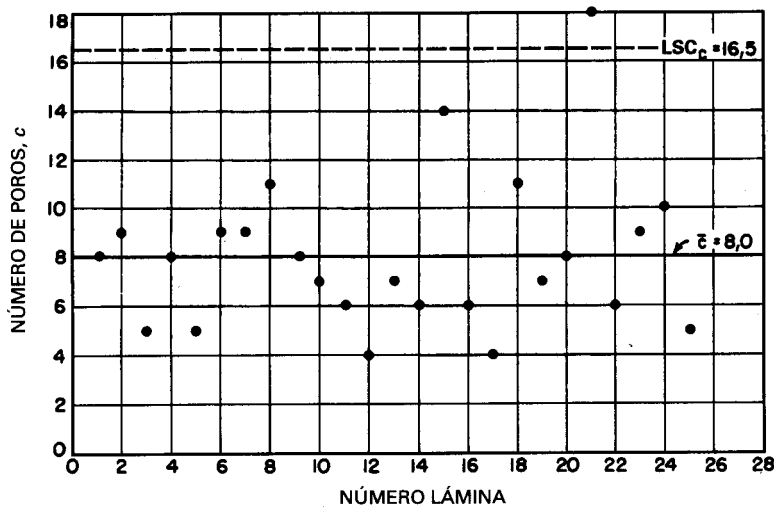


FIGURA 45.4 Gráfico *c* de poros en láminas.

Ejemplo 45.4: Como un ejemplo de utilización del gráfico u , los datos de la Tabla 45.5 son el resultado de la inspección de defectos encontrados en 10 muestras de tela. De aquí deducimos que $\bar{u} = 59/1.360 = 0,043$. Podemos calcular el tamaño medio por $1.360/10 = 136$. Utilizando esta expresión de n en la expresión precedente de los límites de control obtenemos:

$$LSC_u = 0,043 + 3\sqrt{0,043/136} = 0,043 + 0,054 = 0,097$$

$$LIC_u = 0,043 - 3\sqrt{0,043/136} = 0,043 - 0,054 = < 0$$

Por tanto, no hay límite inferior de control, y sólo la segunda muestra está cercana al límite superior de control; sin embargo, puesto que el tamaño de esta muestra es 80, mucho menor que el tamaño medio de 136, el límite superior de control correcto para esta muestra será mayor que 0,097, luego la muestra estará en control.

GRÁFICOS DE CONTROL DE SUMAS ACUMULADAS

Otro tipo de gráfico de control es el *gráfico de control de sumas acumuladas* (abreviadamente, *gráfico CUSUM*). Este gráfico es particularmente útil en la detección de pequeños cambios (entre $0,5\sigma$ y $2,5\sigma$) en el parámetro que se estudia. Para cambios grandes de aproximadamente $2,5\sigma$, los gráficos de Shewhart discutidos previamente son tan buenos o incluso mejores que los CUSUM, siendo más fáciles de entender y usar. Un gráfico CUSUM es una representación de las sumas acumuladas de las desviaciones entre cada dato, por ejemplo una media muestral, y un valor de referencia T . Así, este tipo de gráfico tiene una memoria característica no encontrada en los tipos precedentes de gráficos. Se utiliza generalmente para representar la media muestral $\bar{X}$, si bien también puede utilizarse para otro tipo de estadísticos, como s o p . También se utiliza con frecuencia para gráficos de medidas individuales, particularmente en procesos químicos. Para una discusión de otros tipos de gráficos CUSUM se puede consultar a Wadsworth et al. (1986). En los gráficos CUSUM lo importante es la pendiente de la línea dibujada, en tanto que para los gráficos precedentes lo importante es la distancia entre la línea dibujada y la línea central.

Los gráficos CUSUM, como los otros tipos de gráficos, se interpretan comparando los puntos dibujados con los límites críticos. Sin embargo, los límites críticos para un gráfico de control CUSUM no son ni fijos ni paralelos. Una máscara en forma de V se construye frecuente-

TABLA 45.5 Resultados de inspección en tela

Metros cuadrados de tela inspeccionada	Número de defectos encontrados	u
200	5	0,025
80	7	0,088
100	3	0,030
300	15	0,050
120	4	0,033
90	6	0,067
250	10	0,040
50	1	0,020
100	6	0,060
70	2	0,029
Totales	1.360	59

mente. Se deja sobre el gráfico con su origen sobre el último punto dibujado. Si alguno de los puntos previamente dibujados es cubierto por la máscara, es una indicación de que el proceso ha cambiado.

Construcción de un gráfico de control CUSUM para medias. Para construir un gráfico de control CUSUM para las medias se siguen las siguientes etapas:

1. Obtener una estimación del error estándar del estadístico que se dibuja; por ejemplo, puede ser obtenido de un gráfico de recorridos o de otro estimador apropiado. Si se utiliza un gráfico de recorridos, el estimador es $\bar{R}/(d_2\sqrt{n})$ o $A_2\bar{R}/3$.
2. Determinar la mínima variación en la media D que se desea poder detectar. Calcular $\delta = D/\sigma_{\bar{x}}$.
3. Determinar el nivel de significación al que se desea tomar las decisiones. Para límites equivalentes a 3σ , el nivel de significación es $\alpha = 0,00135$.
4. Determinar el factor de escala k . Es el factor entre las escalas del eje vertical (estadístico considerado) respecto al eje horizontal (numeración de las muestras). Ewan (1963) recomendaba que era conveniente que k fuese un valor comprendido entre $1\sigma_{\bar{x}}$ y $2\sigma_{\bar{x}}$, preferentemente cercano a $2\sigma_{\bar{x}}$.
5. Obtener la distancia principal d de la Tabla BB del Apéndice II utilizando el valor de δ obtenido en la etapa $2\sigma_{\bar{x}}$.
6. Obtener el ángulo θ de la máscara de la Tabla BB del Apéndice II escribiendo D/k igual a δ en la tabla y leyendo θ en la tabla. Se debe utilizar interpolación lineal si fuese necesario.
7. Utilizar d y θ para construir la máscara en V.
8. El tamaño de las muestras para un gráfico CUSUM de medias es el mismo que para un gráfico de medias ($\bar{X}$). Sin embargo, Ewan (1963) sugiere, para obtener los mejores resultados, que se debe utilizar

$$n = 2,25s^2/D$$

donde s es una estimación de la desviación típica del proceso.

Utilización de la máscara V en los gráficos CUSUM. La máscara se sitúa sobre el último punto dibujado. Si alguno de los puntos previamente dibujados es recubierto por la máscara, es que ha ocurrido un cambio. Los puntos cubiertos por la parte superior de la máscara indican un decrecimiento en la media del proceso, en tanto que los cubiertos por la parte inferior de la máscara indican un incremento en la media del proceso. El primer punto recubierto por la máscara indica, aproximadamente, el tiempo en el que ocurrió el cambio. Cuando no hay puntos anteriores cubiertos por la máscara, es que el proceso está en control.

Algunas precauciones

1. Chequear periódicamente la variabilidad del proceso con un gráfico R o s antes de extraer conclusiones respecto al nivel medio del proceso.
2. Observar los cambios graduales (tendencias) que aparecen o desaparecen en cortos periodos de tiempo. Estos cambios no son tan claros en un gráfico CUSUM como lo son en un gráfico de medias ($\bar{X}$).
3. Se asume que las medidas individuales siguen una distribución normal.

Ejemplo 45.5: Los datos de la Tabla 45.6 resumen las medidas de 20 muestras de 4 ladrillos cada muestra y nos dan los porcentajes de absorción de agua. Se utiliza como valor de referencia $T = 10,0$. Para ilustrar el gráfico CUSUM, se modifican los datos originales para introducir un descenso en el nivel medio del 2,0 por ciento, empezando en el subgrupo 11. Un gráfico de recorridos nos muestra que $(\bar{R}) = 8,08$.

TABLA 45.6 Datos de porcentaje de absorción de agua

Muestra número	$\bar{X}$	$\bar{X} - 10,0$	$\Sigma(\bar{X} - 10,0)$
1	15,1	5,1	5,1
2	12,3	2,3	7,4
3	7,4	-2,6	4,8
4	8,7	-1,3	3,5
5	8,8	-1,2	2,3
6	11,7	1,7	4,0
7	10,2	0,2	4,2
8	11,5	1,5	5,7
9	11,2	1,2	6,9
10	10,2	0,2	7,1
11	7,6	-2,4	4,7
12	6,2	-3,8	0,9
13	8,2	-1,8	-0,9
14	7,8	-2,2	-3,1
15	6,8	-3,2	-6,3
16	6,1	-3,9	-10,2
17	4,3	-5,7	-15,9
18	8,5	-1,5	-17,4
19	7,7	-2,3	-19,7
20	9,7	-0,3	-20,0

1. $\sigma_{\bar{X}}$ se estima por $\bar{R}/d_2\sqrt{n} = 8,08/2,059\sqrt{4} = 1,96$.
2. Deseamos detectar un cambio en la media del proceso de $D = 1\sigma_{\bar{X}}$; por tanto, $\delta = 1,96/1,96 = 1,0$.
3. Deseamos utilizar $\alpha = 0,00135$, el valor correspondiente al gráfico de control estándar.
4. El factor de escala k se calcula como $2\sigma_{\bar{X}} = 2(1,96) = 3,92 \approx 4$.
5. En la Tabla BB del Apéndice II se obtiene la distancia principal de la máscara $d = 13,2$.
6. Sustituir $D/k = 2/4 = 0,5$ por δ en la Tabla BB del Apéndice II para obtener $\theta = 14^\circ$.

La Figura 45.5 muestra el gráfico CUSUM con la máscara en la muestra número 17. La máscara se mueve de izquierda a derecha, colocando el origen de la máscara sobre cada uno de los puntos dibujados. En los 16 primeros puntos, la máscara no recubre ninguno de los puntos previamente dibujados. En el punto 17 se detecta un cambio, que la máscara indica que ocurrió en el punto 10 u 11.

La Figura 45.5 también muestra los mismos datos dibujados en un gráfico de medias estándar ($\bar{X}$). Tal gráfico no hubiese detectado el cambio por la existencia de algún punto fuera de los límites de control. Sin embargo, hubiese detectado el cambio en el punto 17 debido a que 4 de 5 puntos consecutivos están alejados del valor central más de una desviación típica. Una comparación entre el gráfico CUSUM y el gráfico estándar $\bar{X}$ hace referencia al ARL (número medio de muestras), que es el número medio de muestras para que el gráfico detecte con cierto nivel de significación un cambio. Ewan (1963) compara los gráficos CUSUM y los $\bar{X}$ para distintos cambios en la media del proceso. Para cambios entre $0,5\sigma_{\bar{X}}$ y $2,0\sigma_{\bar{X}}$, el gráfico CUSUM detecta el cambio con menos muestras de las que son necesarias en un gráfico de medias $\bar{X}$. Para cambios mayores, no presentan ventaja los gráficos CUSUM. La conclusión de Ewan supone que el gráfico $\bar{X}$ sólo utiliza la regla de un punto fuera de los límites de control. Como se ha visto anteriormente, si se utilizan otros criterios de existencia de situación de fuera de control, entonces disminuye la ventaja de los gráficos CUSUM.

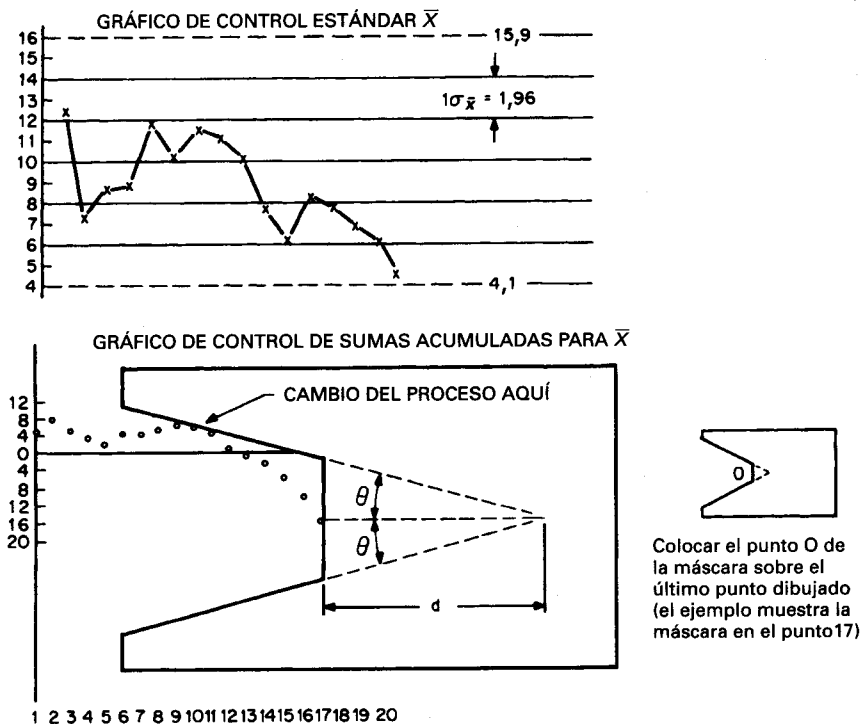


Figura 45.5 Comparación de los gráficos de sumas acumuladas con los gráficos de control estándar.

Límites en un gráfico CUSUM utilizando el método de tabulación. En algunos procesos no es conveniente utilizar la máscara V. Se puede utilizar un método alternativo de tabulación que está muy bien adaptado a las aplicaciones con ordenador. Es equivalente al método de recorrido con la máscara. Sigue este procedimiento:

1. Formar la suma acumulada $C_1 = \Sigma(\bar{X}_i - K_1)$, donde $K_1 = T + D/2$, para detectar un cambio hacia arriba.
2. Formar la suma acumulada $C_2 = \Sigma(\bar{X}_i - K_2)$, donde $K_2 = T - D/2$, para detectar un cambio hacia abajo.
3. Calcular estas cantidades secuencialmente respecto a $\bar{X}_i$, sustituyendo por 0 los valores negativos de C_1 y sustituyendo también por 0 los valores positivos de C_2 .
4. Observar la evolución de los valores de C_1 y de C_2 . Cuando uno de los valores iguala o excede a $Dd/2$ en valor absoluto, se tiene una señal de cambio en la media.

Ejemplo 45.6: Utilizaremos los mismos resultados del Ejemplo 45.5 para aclarar esa técnica. Recordemos que en este ejemplo tenemos $T = 10,0$, $D = 2$ y $d = 13,2$. Entonces aplicaremos las etapas anteriores teniendo presente que:

1. $K_1 = T + D/2 = 10,0 + 2/2 = 11,0$ y $C_1 = \Sigma(\bar{X}_i - 11,0)$.
2. $K_2 = T - D/2 = 10,0 - 2/2 = 9,0$ y $C_2 = \Sigma(\bar{X}_i - 9,0)$.
3. Límite de decisión de existencia de cambio en la media $= Dd/2 = 13,2$.

Este procedimiento se desarrolla en la Tabla 45.7.

TABLA 45.7 Tabulación de datos de absorción de agua

Muestra número	$\bar{X}$	$\bar{X} - 11,0$	C_1	$\bar{X} - 9,0$	C_2	Notas
1	15,1	4,1	4,1	6,1	> 0	
2	12,3	1,3	5,4	3,3	> 0	
3	7,4	-3,6	1,8	-1,6	-1,6	
4	8,7	-2,3	< 0	-0,3	-1,9	
5	8,8	-2,2	< 0	-0,2	-2,1	
6	11,7	0,7	0,7	2,7	> 0	
7	10,2	-0,8	< 0	1,2	> 0	
8	11,5	0,5	0,5	2,5	> 0	
9	11,2	0,2	0,7	2,2	> 0	
10	10,2	-0,8	< 0	1,2	> 0	
11	7,6	-3,4	< 0	-1,4	-1,4	
12	6,2	-4,8	< 0	-2,8	-4,2	
13	8,2	-2,8	< 0	-0,8	-5,0	
14	7,8	-3,2	< 0	-1,2	-6,2	
15	6,8	-4,2	< 0	-2,2	-8,4	
16	6,1	-4,9	< 0	-2,9	-11,3	
17	4,3	-6,7	< 0	-4,7	-16,0	Señal inferior
18	8,5	-2,5	< 0	-0,5	-16,5	
19	7,7	-3,3	< 0	-1,3	-17,8	
20	9,7	-1,3	< 0	0,7	-17,1	

GRÁFICOS DE CONTROL DE MEDIAS MÓVILES PONDERADAS EXPONENCIALMENTE

Otro tipo de gráfico de control es el de medias móviles con ponderación exponencial (EWMA = exponentially weighted moving average). Fue introducido primeramente por Roberts (1959) y luego por Wortham y Ringer (1971), que lo propusieron para aplicarlo en procesos industriales, así como para aplicaciones en sistemas de control en finanzas y en dirección, para los que los subgrupos formados por varios elementos no son aplicables; como los gráficos CUSUM, son útiles para detectar pequeños cambios en la media. Observaciones individuales se toman normalmente para este tipo de gráficos. Las observaciones individuales pueden ser medias (cuando las observaciones individuales de las que provienen las medias no están disponibles), lecturas individuales, cocientes, proporciones, o medidas similares. Aquí se presenta una breve discusión de este tipo de gráfico. El lector interesado debe consultar las referencias precedentes u otras publicaciones más recientes, como Hunter (1986), Lowry et al. (1992), Lucas y Saccucci (1990), Ng y Case (1989), Crowder (1989) y Albin et al. (1997).

El estadístico dibujado es la media ponderada de la observación actual y todas las observaciones precedentes, donde la media previa recibe más peso, es decir,

$$Z_t = \lambda x_t + (1 - \lambda)Z_{t-1} \quad 0 < \lambda < 1$$

donde $Z_0 = \mu$

Z_t = media móvil ponderada exponencialmente en el tiempo actual t .

Z_{t-1} = media móvil ponderada exponencialmente en el tiempo inmediatamente precedente $t-1$.

x_t = la observación presente.

λ = el factor de ponderación para la observación actual.

Se asume que los x_i son independientes, pero los estadísticos muestrales Z_i están autocorrelacionados. Sin embargo, Wortham y Ringer (1971) demostraron que para valores grandes de t , los estadísticos muestrales es común distribuirlos cuando los x_i están normalmente distribuidos con media μ y varianza σ^2 . Es decir,

$$E(Z_i) = \mu$$

y

$$\text{Var}(Z_i) = \sigma^2[\lambda/(2 - \lambda)][1 - (1 - \lambda)^{2i}]$$

Cuando t aumenta, el último término entre paréntesis en la parte derecha converge rápidamente hacia uno, y la correspondiente expresión para la varianza se transforma en

$$\text{Var}(Z_i) \approx \sigma^2[\lambda/(2 - \lambda)]$$

Eligiendo $\lambda = 2/(t + 1)$, la expresión aproximada de la varianza se transforma en

$$\text{Var}(Z_i) = \sigma^2/t \quad (\text{varianza de medias de muestras de } t \text{ elementos})$$

Bajo estas condiciones, los límites de control se transforman en $\hat{\mu} \pm 3\sqrt{\hat{\sigma}^2/t}$. Para otros valores de λ , los límites de control son

$$\text{LSC} = \hat{\mu} + 3\hat{\sigma}\sqrt{\lambda/(2 - \lambda)}$$

$$\text{LIC} = \hat{\mu} - 3\hat{\sigma}\sqrt{\lambda/(2 - \lambda)}$$

Para las primeras observaciones, se debe utilizar la primera ecuación para la varianza. Esto se puede ilustrar en el siguiente ejemplo. Si no se tiene una buena estimación para σ , se debe utilizar un gráfico de recorridos y estimar $\hat{\sigma}$ por $\bar{R}/d_2$. En el caso de valores individuales, el recorrido móvil medio se puede utilizar en la forma en que se hizo para los gráficos de control de valores individuales.

Ejemplo 45.7: Para ilustrar el gráfico de control de medias móviles exponencialmente ponderadas (EWMA), utilizaremos los mismos datos del Ejemplo 45.5. Recordemos que tenemos los porcentajes de absorción de agua de 20 muestras de 4 ladrillos cada muestra. Las medias se muestran en la Tabla 45.6 y de nuevo en la Tabla 45.8. El gráfico de recorridos nos da una estimación de $\sigma_{\bar{x}} = 1,96$. Para las primeras muestras utilizaremos la fórmula completa de la desviación típica y el valor nominal 10 para nuestra estimación de μ . En este ejemplo utilizaremos $\lambda = 0,2$.

El gráfico con los datos aparece en la Figura 45.6. Tanto este gráfico como en la Tabla 45.8 se puede observar que los límites de control se estabilizan tras 8 o 9 muestras. El gráfico se sitúa debajo del límite inferior de control desde la muestra 16 hasta el final de las muestras.

Los parámetros diseñados para este gráfico son un múltiplo de σ y el valor de λ utilizado. Es posible elegir estos dos parámetros de modo que este gráfico se aproxime al CUSUM. Ha habido varios estudios teóricos de la longitud media de un gráfico EWMA; véase, por ejemplo, Lucas y Saccucci (1990). Suministran tablas de longitud media para un rango amplio de valores de λ y para diferentes anchuras del gráfico. En general, Montgomery (1991) recomienda valores de λ entre 0,05 y 0,25, siendo $\lambda = 0,08$, $\lambda = 0,10$ y $\lambda = 0,15$ las elecciones más utilizadas. Deben utilizarse pequeños valores de λ para detectar pequeños cambios. Los límites a tres desviaciones típicas, como en los gráficos de Shewhart, parece que funcionan bien en la mayoría de los casos; sin embargo, si λ es menor que 0,10, parece que un valor de $2,75\sigma$ da mejores resultados.

TABLA 45.8 Datos y cálculos para un gráfico EWMA

Muestra t	$\bar{X}_t$	Z_t	Límites de control para Z_4	
			LIC	LSC
0		10,00		
1	15,1	11,02	8,8	11,2
2	12,3	11,28	8,5	11,5
3	7,4	10,50	8,3	11,7
4	8,7	10,14	8,2	11,8
5	8,8	9,87	8,2	11,9
6	11,7	10,24	8,1	11,9
7	10,2	10,23	8,1	11,9
8	11,5	10,48	8,1	11,9
9	11,2	10,62	8,1	11,9
10	10,2	10,54	8,1	12,0
11	7,6	9,95	8,1	12,0
12	6,2	9,20	8,0	12,0
13	8,2	9,00		
14	7,8	8,76		
15	6,8	8,37		
16	6,1	7,92		
17	4,3	7,20		
18	8,5	7,46		
19	7,7	7,51		
20	9,7	7,95		

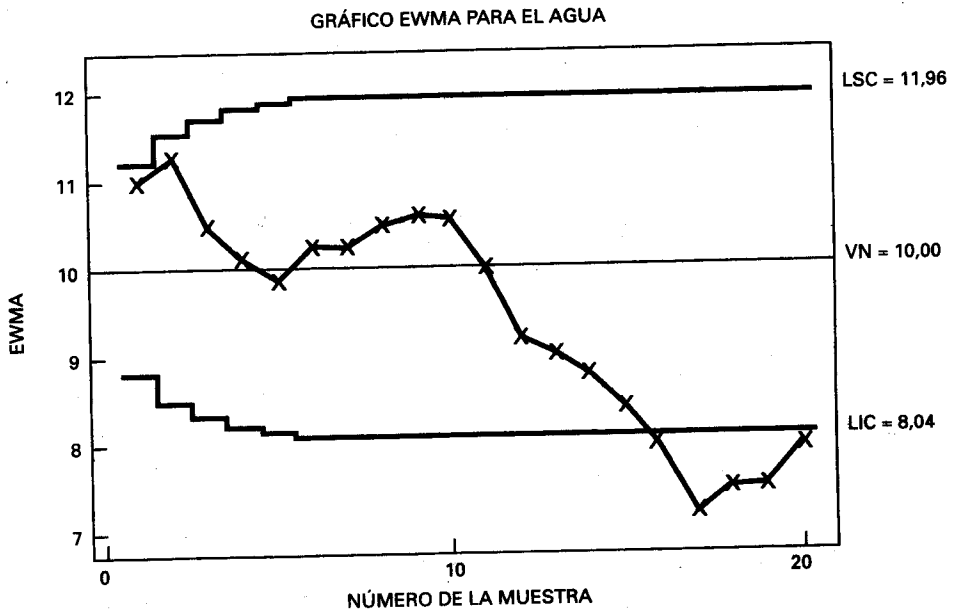


FIGURA 45.6 Gráfico EWMA.

Al igual que el gráfico CUSUM, el gráfico EWMA es más efectivo que el gráfico de medias ($\bar{X}$) para detectar pequeños cambios en la media (menores de $2,5\sigma$); sin embargo, ambos gráficos funcionan peor que el gráfico de medias ($\bar{X}$) para grandes cambios. Para superar esta dificultad, algunos autores han propuesto representar los límites de Shewhart y los límites EWMA en el mismo gráfico (véase, por ejemplo, Albin et al. 1997).

GRÁFICOS DE CONTROL CON POCOS DATOS

Algunos procesos se realizan sobre períodos tan cortos que el procedimiento usual de recoger 20 o 30 muestras para hacer un gráfico de control no es factible. A veces estas tiradas tan cortas están provocadas por causas asignables conocidas que ocurren en determinados momentos. Hough y Pond (1995) discuten cuatro formas de construir gráficos de control en estas situaciones:

1. Ignorar la variabilidad sistemática y representar los datos en un único gráfico.
2. Estratificar los datos y dibujarlos en un único gráfico.
3. Utilizar regresión para modelizar los datos y dibujar los residuos en un gráfico.
4. Estandarizar los datos y representar los datos estandarizados en un gráfico.

La última opción es la que ha recibido más aceptación. Utiliza la transformación

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

para quitar cambios sistemáticos tanto en nivel como en variabilidad. Esta estandarización de los gráficos de Shewhart ha sido discutida por Nelson (1989), Wheeler (1991) y Griffith (1996). Los gráficos de control de este tipo tienen los límites de control en ± 3 . Estos gráficos se llaman a veces *gráficos Z*.

Algunas variaciones de estos gráficos son las siguientes:

1. *Gráficos de diferencias*, en los que se resta a cada observación una constante que puede ser la media conocida (μ), una media de datos históricos ($\bar{X}$), un valor nominal (T) o un límite de especificación. Burr (1989) discute este gráfico e incluye su utilización para estudiar la capacidad de un proceso.
2. *Gráficos estandarizados*, en los que una constante como la anterior se resta a cada observación y el resultado se divide por una segunda constante. Cuando el divisor es la desviación estándar, los valores resultantes de Z tienen desviación típica igual a 1, y los límites de control están a ± 3 para $\alpha = 0,0027$. El divisor puede ser la desviación típica conocida (σ) o una estimación por datos históricos, por ejemplo mediante R/d_2 . A veces el divisor no es la desviación típica, sino otro valor. Por ejemplo, Burr (1989) discutió una medida utilizada en Kodak en la que a cada observación se le restaba el nominal y el resultado se dividía por la mitad de la tolerancia. Tenía la ventaja de indicarnos la fracción de la tolerancia utilizada por el proceso, así como su cercanía al valor nominal.
3. *Gráficos cortos de medias y de recorridos*, en la que el estadístico

$$Z = (\bar{X} - \bar{\bar{X}})/\bar{R}$$

se dibuja con límites de control para la media situados en $\pm A_2$. El estadístico $R/\bar{R}$ se dibuja en el gráfico de recorridos con límites de control situados en D_3 y D_4 . El resultado es un conjunto de gráficos adimensionales adecuados para representar diferentes piezas o fabricaciones en el mismo gráfico.

Otro gráfico para pequeñas fabricaciones es el gráfico Q , discutido por Quesenberry (1991, 1995a, 1995b). Esta técnica permite construir el gráfico a partir de los datos iniciales sin estimar previamente la media o la varianza. Nos permite comenzar la construcción del gráfico al comienzo de una producción. Además se utiliza la transformación integral de probabilidad para conseguir la normalidad en lo representado en el gráfico Q cuando se parte de datos no distribuidos normalmente, como sucede con los recorridos o con las desviaciones típicas. Quesenberry explica la utilización de este método para obtener gráficos de control para medias o desviaciones típicas, tanto si la media y desviación típica del proceso son o no conocidas.

Para explicar la utilización del gráfico Q , consideraremos el caso de medidas normalmente distribuidas con media desconocida y varianza conocida. El gráfico de localización del proceso se construye así:

1. Registrar las medidas individuales: $x_1, x_2, x_3, \dots, x_r$.
2. Para dibujar el punto r -ésimo, calcular

$$Q_r(X_r) = [(r-1)/r]^{1/2} [(x_r - \bar{X}_{r-1})/\sigma] \quad r = 1, 2, 3 \dots$$

donde $\bar{X}_{r-1}$ es la media aritmética de los primeros $r-1$ puntos.

3. Representar $Q_r(X_r)$ para cada uno de los datos, con límites de control $\pm 3,0$.

El gráfico de variación del proceso se construye de forma similar:

1. Utilizar las mismas medias: $x_1, x_2, x_3, \dots, x_r$.
2. Para dibujar el dato r -ésimo (sólo con r par):
 - a. Calcular

$$[(x_r - x_{r-1})^2 / 2\sigma^2], \quad r = 2, 4, 6 \dots$$

- b. Encontrar el percentil de la distribución χ^2 con un grado de libertad para el valor calculado en a.
 - c. Encontrar la distancia normalizada a la media de una distribución normal para el percentil encontrado en b y escribir que esta distancia es igual a $Q(R_r)$.
3. Dibujar los valores $Q(R_r)$ para los datos pares con límites de control $\pm 3,0$.

GRÁFICO DE AJUSTE MANUAL DE BOX-JENKINS

J. S. Hunter sugirió una importante adición a las herramientas de construcción de gráficos discutidas con anterioridad (Hunter 1997). Mientras que los gráficos de Shewhart, CUSUM y EWMA para variables sirven para controlar los procesos, los gráficos de Hunter, llamados *gráficos de ajuste manual de Box y Jenkins*, pueden ser utilizados para *regularlos*. Estos gráficos están basados en trabajos anteriores de Box y Jenkins (1962, 1970). Box y Luceño (1997) han publicado recientemente un texto con una explicación completa de estas técnicas. Hunter (1997) incluye un ejemplo acompañado con muchos gráficos.

Los gráficos de Shewhart, CUSUM y EWMA, discutidos anteriormente, requieren que un operario represente periódicamente la historia del estadístico que nos interesa y que deje el proceso ir tanto más solo cuanto los puntos dibujados estén más en el interior de los límites de control y satisfagan las reglas de control estadístico. Se asume que la media del proceso es constante y que las diferencias de los datos respecto a la media son independientes y normalmente distribuidas con varianza constante σ^2 . El gráfico controla el proceso. El objetivo es reducir la variabilidad eliminando las causas especiales (asignables) identificadas por los gráficos.

Los gráficos de ajuste manual de Box-Jenkins suministran un mecanismo de predicción y *regulación* del proceso después de cada observación. El procedimiento asume que el proceso

es *no estacionario*; es decir, el nivel (media) del proceso está cambiando constantemente y la varianza está creciendo. El objetivo de este gráfico es mantener la varianza tan pequeña como sea posible.

Es importante observar que si las desviaciones de los datos respecto a la media son independientes, este método no debe utilizarse, y que si se usa tiende a aumentar la varianza del proceso. Sin embargo, si las desviaciones no son independientes, el gráfico de ajuste manual de Box-Jenkins puede suministrar una predicción y un ajuste necesario para obligar al proceso a estar en el nominal con la mínima varianza. Para una completa discusión de esta técnica se puede consultar el trabajo de Hunter (1997).

GRÁFICOS DE CONTROL MULTIVARIANTES

Cuando hay dos o más características de calidad correlacionadas que se deben controlar simultáneamente, tales como la longitud y el peso de una pieza, es necesario el uso de los gráficos de control multivariantes. Si construimos dos gráficos de control separados para cada característica, la región de control será rectangular, en tanto que esta región será elíptica utilizando métodos multivariantes. Esto significa que unas observaciones estarán en control en un caso y fuera de control en el otro.

Los gráficos de control multivariantes están más allá del objetivo de este capítulo, pero una detallada discusión de este tema se puede ver en Alt et al. (1998), Jackson (1985) o Woodall y Neube (1985). Versiones multivariantes de los gráficos de Shewhart, CUSUM y EWMA están disponibles en las publicaciones. Están tratadas con referencias en Alt et al. (1998).

PRE-CONTROL

Los gráficos de control discutidos desde el principio de este capítulo suministran límites deducidos exclusivamente de las variaciones observadas del proceso, por lo que proporcionan un medio para detectar cambios en el proceso. En algunas situaciones es importante detectar sólo los cambios que pueden provocar la producción de unidades defectuosas. En tales casos, los límites de control deben ser deducidos utilizando los datos observados y las especificaciones del producto. Entonces se permite que el proceso fluctúe en tanto en cuanto no sea inminente la aparición de unidades defectuosas. El gráfico da señales de alarma sólo si hay amenaza de aparición de unidades defectuosas. Los límites de control modificados [véanse Wardsworth et al. (1986, pp. 256-266)] y los gráficos de control aceptados son dos ejemplos de tales gráficos. Los gráficos de control aceptados se describen en el Capítulo 46. Otro ejemplo de este método es la técnica PRE-control.

El PRE-control comienza con un proceso centrado entre los límites de especificación y los cambios detectados que fueran en algunas partes más allá de los límites de especificación. El PRE-control requiere no dibujar y no calcular con datos de muestra. Sólo necesita el registro de dos elementos para dar información de control. Utiliza la distribución normal para determinar cambios significativos en el proceso que resultaría de elementos defectuosos. El principio del PRE-control asume que el proceso utiliza todo el intervalo de tolerancia. Esto es, que la diferencia entre los límites de especificación superior e inferior del proceso es 6σ , con el proceso exactamente centrado.

Dos límites de PRE-control (PC) se colocan a un cuarto de cada límite de tolerancia, tras dividir el intervalo de tolerancia en cuatro partes iguales, como se muestra en la Figura 45.7. Así resultan cinco regiones que se colorean para facilitar las aplicaciones prácticas. Las dos regiones fuera de los límites de especificación se colorean en rojo. Las dos regiones entre los límites PC y los límites de especificación se colorean en amarillo, y la región central entre

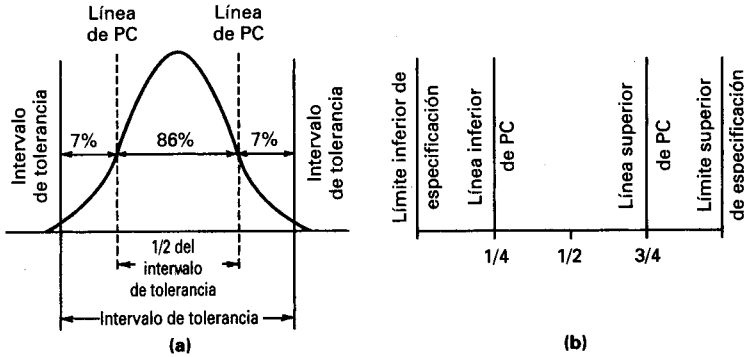


FIGURA 45.7 (a) Hipótesis del PRE-control. (b) Localización de las líneas de PRE-control.

los límites PC se colorea en verde. Si la distribución fuese como la indicada en la Figura 45.7a, el 86 por ciento de las piezas estaría en la zona verde, mientras que un 7 por ciento, o una parte de 14, estaría en cada una de las zonas amarillas. La probabilidad de que dos piezas sucesivas estén en la misma zona amarilla sería de $1/14$ por $1/14$, es decir, $1/196$ (aproximadamente una de cada 200). Por tanto, podemos decir que si dos piezas consecutivas están en la misma zona amarilla, hay una mayor probabilidad (195/196) de que la media del proceso haya cambiado que de que no haya cambiado. Es razonable entonces ajustar la media del proceso hacia el centro.

Es igualmente improbable obtener una pieza en una de las zonas amarillas y la siguiente en la otra zona amarilla. Esto nos indicaría que el proceso había cambiado, debido a cierto factor que ha causado una variación de tal magnitud que hace imposible la no aparición de piezas fuera de las tolerancias. Por tanto, se debe hacer un estudio inmediato del proceso, introduciendo alguna acción correctiva antes de poder continuar el proceso con seguridad.

Estos principios llevan a las siguientes reglas que resumen el procedimiento de PRE-control:

1. Dividir el intervalo de tolerancia en cuatro partes iguales, colocando las líneas de PRE-control (PC) a un cuarto de cada límite de especificación. Si se desea, colorear las zonas de forma apropiada como se indicó antes: roja, amarilla y verde.
2. Comenzar el proceso.
3. Si la primera pieza está en la zona roja (defectuosa), ajustar el proceso.
4. Si la primera pieza está en la zona amarilla (precaución), chequear la pieza siguiente.
5. Si la segunda pieza está en la misma zona amarilla, ajustar el proceso hacia el centro.
6. Si la segunda pieza está en la zona verde (buena), continuar el proceso, y ajustar el proceso sólo cuando dos piezas consecutivas estén en la misma zona amarilla.
7. Si dos piezas consecutivas están en distintas zonas amarillas, detener el proceso y tomar acciones para reducir la variabilidad.
8. Cuando cinco piezas consecutivas aparecen en la zona verde, se puede empezar a chequear menos piezas, pudiendo disminuir la frecuencia de chequeo de piezas hasta que por cada 25 chequeadas sólo haga falta realizar un ajuste. En tanto se espera la aparición de cinco piezas en la zona verde, si aparece una pieza en la zona amarilla, se debe volver a empezar a contar hasta la aparición de cinco nuevas piezas consecutivas en la zona verde.
9. Durante el período de disminución de la frecuencia de chequeo de piezas no se debe hacer ningún ajuste hasta que una pieza exceda la línea PC (zona amarilla). Si esto ocurre, chequear la pieza siguiente y continuar como en la etapa 6.
10. Cuando se ajusta un proceso, se debe producir la aparición de cinco piezas consecutivas en la zona verde antes de empezar a disminuir de nuevo la frecuencia de chequear piezas.

11. Si un operario chequea más de 25 piezas sin necesidad de tener que realizar ningún ajuste, se debe reducir la frecuencia de chequeo de manera que se pueden producir más piezas entre dos chequeos consecutivos. Por el contrario, si se necesita ajustar antes de chequear 25 piezas, se debe aumentar la frecuencia con que se realizan los chequeos. Un promedio de 25 piezas chequeadas entre los dos ajustes es una indicación de que la frecuencia de chequear piezas es correcta.

Cuando sólo hay una tolerancia superior, se establece un límite PC en el punto medio entre la tolerancia y el cero (en los casos de planitud o concentricidad) o a un cuarto de la distancia entre la tolerancia inferior y la mejor pieza (en el caso de una variable como productividad o resistencia), por encima de dicha tolerancia inferior. En estos casos hay una zona verde, una amarilla y una roja.

La técnica de PRE-control indica cambios en la media del proceso o en la variabilidad. Esta técnica es fácil de usar y de entender, puede utilizar controles del tipo pasa no pasa, y puede garantizar un cierto porcentaje máximo de elementos defectuosos si se hacen los ajustes cuando se ha indicado. Por otra parte, las técnicas de control de proceso como ésta, que utilizan unos límites más estrechos que los de las tolerancias, deben ser introducidas en fabricación con cuidado, pues salvo que se acompañen de una clara explicación, pueden llevar al equivoco de que se han hecho más severas las tolerancias.

Una discusión más detallada de esta técnica y de los estadísticos que hay detrás de ella se pueden encontrar en Brown (1966) y en Shainin (1984). Una comparación del PRE-control con los gráficos de medias y recorridos se puede encontrar en Sinibaldi (1985). Ledolter y Swersey (1997) evalúan el procedimiento del PRE-control y concluyen que «el procedimiento del PRE-control no es adecuado para sustituir a los gráficos de control». Explican que los gráficos de control son útiles para identificar causas asignables de variación y para distinguirlas de las causas aleatorias. Esto es muy importante en las primeras etapas del proceso cuando probablemente la capacidad del proceso es baja ($C_p < 1$). El PRE-control es poco adecuado para esa situación, y su utilización lleva, seguramente, a una intervención excesiva (sobrecontrol) del proceso.

CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS AUTOMATIZADOS

En otros capítulos de este manual se han discutido los procesos productivos automatizados y el papel de los ordenadores en los procesos productivos y no productivos. El avance hacia la automatización ha traído importantes innovaciones en el análisis de datos de control de procesos:

1. Instrumentos de lectura continua que producen grandes cantidades de datos de variables de procesos y de características de calidad.
2. Automatización de los análisis estadísticos (por ejemplo, cálculo de medias, desviaciones típicas y límites de control). Esto se discute en el próximo párrafo.
3. Comparación de resultados de los procesos con valores estándares preestablecidos. De esta comparación puede resultar:
 - a. Generación de un documento que dé la información adecuada de no estar en la situación estándar.
 - b. Generación de una señal de error que automáticamente realiza un proceso de ajuste.
4. En los últimos años se ha realizado una gran mejora en instrumentos de control de dimensiones. Cuando se produce una pieza, si cierta medición muestra un cambio significativo de tamaño, se generan instrucciones de detener la producción hasta que se realice la corrección adecuada.

Software para control estadístico del proceso. Muchos programas están disponibles para análisis estadístico de datos en ordenadores personales, incluyendo todos los tipos de gráfi-

cos de control. Hay calibres e instrumentos de medida con salida digital hacia un instrumento de recogida de datos. Estos instrumentos almacenan las lecturas tomadas en la fábrica y las trasladan a un ordenador personal en la oficina. Como una alternativa, las lecturas de los instrumentos de medida se pueden introducir con el teclado de ciertos instrumentos de recogida de datos.

El software calculará los estadísticos muestrales, los límites de control iniciales y el gráfico de control. Los límites de control se deben recalcular periódicamente, y límites en $\pm 2\sigma$ se deben calcular como una guía adicional. Hay software que da resúmenes y análisis adicionales, como listado de datos, valores fuera de las especificaciones, histogramas, tests para ciclos y otras anomalías dentro de los límites de control, tests de normalidad, cálculos de capacidad de proceso, gráficos de Pareto y análisis de tendencias.

El costo relativamente bajo de los ordenadores personales y la disponibilidad de software han contribuido sustancialmente al renovado interés por los gráficos $\bar{X}$ y R y por otros tipos de gráficos. La combinación de ordenador y software ha hecho que sea práctico el recoger grandes cantidades de datos y someterlos a complejos análisis. Sin embargo, la mejora de procesos todavía requiere la identificación de las pocas vitales y con frecuencia inesperadas variables que provocan el exceso de variación. El análisis con ordenador de datos previos no puede sustituir tales herramientas como diseño de experimentos. Los ordenadores son lo más útil cuando un experto en diagnosticar problemas ha creado una plantilla en una hoja de cálculo y son lo menos útil cuando simplemente se utiliza un paquete estadístico de un programa. Los usuarios de tales programas raramente están familiarizados con la lógica de los paquetes de los programas y pueden llegar a erróneas conclusiones.

La Sociedad Americana para la Calidad publica anualmente un directorio de software para procesos de control y otros usos estadísticos (ASQC 1996). Además, el *Journal of Quality Technology* (ASQ) y *Quality* (Hitchcock Publishing Company) tienen columnas donde describen programas para control de procesos.

REFERENCIAS

- Albin, S. L., Kang, L., and Shea, G. (1997). «An $\bar{X}$ and EWMA Chart for Individual Observations». *Journal of Quality Technology*, vol. 28, no. 1, pp. 41-48.
- Alt, F. B., Smith, N. D., and Jain, K. (1998). «Multivariate Quality Control», in Wadsworth, H. M., (ed.): *Handbook of Statistical Methods for Engineers and Scientists*, 2d ed. McGraw-Hill, New York, chap. 21.
- ANSI/ISO/ASQC A3534 (1993). *Statistics—Vocabulary and Symbols*, Part 1: *Probability and General Statistical Terms*; Part 2: *Statistical Quality Control*. American Society for Quality, Milwaukee.
- ANSI/ISO/ASQC A8402 (1994). *Quality Management and Quality Assurance—Vocabulary*. American Society for Quality, Milwaukee.
- ANSI/ASQC B1 (1985a). *Guide for Quality Control*. American Society for Quality, Milwaukee.
- ANSI/ASQC B2 (1985b). *Control Chart Method of Analyzing Data*. American Society for Quality, Milwaukee.
- ANSI/ASQC B3 (1985c). *Control Chart Method of Controlling Quality during Production*. American Society for Quality, Milwaukee.
- ASQC (1996). «Quality Progress' 13th Annual QA/QC Software Directory». *Quality Progress*, vol. 29, no. 4, pp. 32-59.
- ASTM (1990). *ASTM Manual on Presentation of Data*. American Society for Testing Materials, Philadelphia.
- AT&T (1984). *Statistical Quality Control Handbook*. AT&T Technologies, Indianapolis.
- Box, G. E. P., and Jenkins, G. M. (1962). «Some Statistical Aspects of Adaptive Optimization and Control», *Journal of the Royal Statistical Society [B]*, vol. 24, pp. 297-343.
- Box, G. E. P., and Jenkins, G. M. (1970). *Time Series Analysis, Forecasting and Control*. Holden Day, San Francisco.
- Box, G. E. P., and Luceño, A. (1997). *Statistical Control by Monitoring and Adjustment*. Wiley, New York.

- Brown, N. R. (1966). «Zero Defects the Easy Way with Target Area Control». *Modern Machine Shop*, July, pp. 96-100.
- Burr, J. T. (1989). «SPC in the Short Run». *Transactions: ASQC Quality Congress*. Milwaukee, pp. 778-780.
- Crowder, S. V. (1989). «Design of Exponentially Weighted Moving Average Schemes». *Journal of Quality Technology*, vol. 21, no. 2, pp. 155-162.
- Ewan, W. D. (1963). «When and How to Use Cu-SUM Charts». *Technometrics*, vol. 5, no. 1, February, pp. 1-22.
- Grant, E. L., and Leavenworth, R. S. (1996). *Statistical Quality Control*, 7th ed., McGraw-Hill, New York.
- Griffith, G. K. (1996). *Statistical Process Control Methods for Long and Short Runs*, 2d ed., ASQC Quality Press, Milwaukee.
- Hough, L. D., and Pond, A. D. (1995). «Adjustable Individual Control Charts for Short Runs». *Proceedings: 40th ASQC Annual Quality Congress*. Milwaukee, pp. 1117-1125.
- Hunter, J. S. (1986). «The Exponentially Weighted Moving Average». *Journal of Quality Technology*, vol. 18, no. 2, pp. 203-210.
- Hunter, J. S. (1997). «The Box-Jenkins Manual Adjustment Chart», *Proceedings: 51st Annual Quality Congress*. American Society for Quality, Milwaukee, pp. 158-169.
- Jackson, J. E. (1985). «Multivariate Quality Control». *Communications in Statistical Theory Methods*, vol. 14, pp. 2657-2688.
- Ledolter, J., and Swersey, A. (1997). «An Evaluation of Pre-Control». *Journal of Quality Technology*, vol. 29, no. 2, pp. 163-171.
- Lowry, C. A., Woodall, W. H., Champ, C. W., and Rigdon, S. E. (1992). «Multivariate Exponentially Weighted Moving Average Control Charts». *Technometrics*, vol. 34, no. 1, pp. 46-53.
- Lucas, J. M., and Saccucci, M. S. (1990). «Exponentially Weighted Moving Average Control Schemes: Properties and Enhancements». *Technometrics*, vol. 32, no. 1, pp. 1-12.
- Montgomery, D. C. (1991). *Introduction to Statistical Quality Control*. Wiley, New York.
- Nelson, L. S. (1989). «Standardization of Shewhart Control Charts». *Journal of Quality Technology*, vol. 21, no. 4, pp. 287-289.
- Ng, C. H., and Case, K. E. (1989). «Development and Evaluation of Control Charts Using Exponentially Weighted Moving Averages». *Journal of Quality Technology*, vol. 21, no. 3, pp. 242-250.
- Ott, E. R., and Schilling, E. G. (1990). *Process Quality Control*, 2d ed., McGraw-Hill, New York.
- Quesenberry, C. P. (1991). «SPC Q Charts for Start-Up Processes and Short or Long Runs». *Journal of Quality Technology*, vol. 23, no. 3, pp. 213-244.
- Quesenberry, C. P. (1995a). «On Properties of Binomial Q Charts for Attributes». *Journal of Quality Technology*, vol. 27, no. 3, pp. 204-213.
- Quesenberry, C. P. (1995b). «On Properties of Poisson Q Charts for Attributes». *Journal of Quality Technology*, vol. 27, no. 4, pp. 293-303.
- Roberts, S. W. (1959). «Control Chart Tests Based on Geometric Moving Averages». *Technometrics*, vol. 1, no. 3, pp. 239-250.
- Shainin, D. (1984). «Better Than Good Old $\bar{X}$ and R Charts Asked by Vendors». *ASQC Quality Congress Transactions*, pp. 302-307.
- Shewhart, W. A. (1926a). «Quality Control Charts». *Bell System Technical Journal*, pp. 593-603.
- Shewhart, W. A. (1926b). «Finding Causes of Quality Variations». *Manufacturing Industries*, pp. 125-128.
- Shewhart, W. A. (1927). «Quality Control U». *Bell System Technical Journal*, pp. 722-735.
- Shewhart, W. A. (1931). *Economic Control of Quality of Manufactured Product*. Van Nostrand-Reinhold, New York. A reprint of this classic work has been published and is available from the American Society for Quality, Milwaukee.
- Sinibaldi, E. J. (1985). «PRE-Control, Does It Really Work with Non-Normality». *ASQC Quality Congress Transactions*, pp. 428-433.
- Wadsworth, H. M., Stephens, K. S., and Godfrey, A. B. (1986). *Modern Methods for Quality Control and Improvement*. Wiley, New York.
- Wheeler, D. J. (1991). *Short Run SPC*. SPC Press, Inc., Knoxville, TN.
- Woodall, W. H., and Neube, M. M. (1985). «Multivariate CUSUM Quality Control Procedures». *Technometrics*, vol. 27, pp. 285-292.
- Worham, A. W., and Ringer, L. J. (1971). «Control Via Exponential Smoothing». *The Logistic Review*, vol. 7, no. 3, pp. 33-40.

Capítulo 48

CONCEPTOS DE FIABILIDAD Y ANÁLISIS DE DATOS

**William Q. Meeker, Luis A. Escobar,
Necip Doganaksoy y Gerald J. Hahn**

INTRODUCCIÓN	48.2	Métodos de aceleración	48.19
Relaciones entre calidad y fiabilidad	48.2	Modelos de aceleración	48.19
Aplicaciones del análisis de datos fiables	48.2	Elevación de la temperatura	48.21
Fuentes y tipos de datos fiables ..	48.3	Planificación de un ALT	48.21
Software de ordenador	48.3	Estrategia para analizar datos ALT .	48.22
MODELOS DE DATOS DE VIDA ..	48.4	CONCEPTOS DE FIABILIDAD DE SISTEMAS	48.25
Conceptos del modelo de tiempo de fallo	48.4	Terminología para fiabilidad de sistemas	48.26
Otras cantidades de interés en análisis de fiabilidad	48.6	Sistemas con componentes en serie	48.26
Distribuciones usuales paramétricas de tiempo de fallo	48.6	Sistemas con componentes en paralelo	48.28
ANÁLISIS DE DATOS DE VIDA CENSURADOS	48.10	SISTEMAS REPARABLES	48.28
Muestra de datos de un test de vida (unicensurados)	48.10	Modelos no paramétricos para procesar datos	48.31
Representación en papel probabilístico	48.11	Estimación no paramétrica del MCF	48.31
Estimación de máxima verosimilitud	48.13	Comparación no paramétrica de dos muestras de datos de reparaciones	48.33
Líneas guía en la elección del tamaño de muestra en los tests de vida	48.14	OTROS TÓPICOS EN FIABILIDAD ..	48.33
Análisis de datos múltiplemente censurados	48.15	Fuentes de datos e información de fiabilidad	48.33
MODELOS ACELERADOS DE TESTS DE VIDA Y DE ANÁLISIS DE DATOS	48.17	FMEA y FMECA	48.33
		Árboles de fallos	48.34
		Diseño de experimentos para aumentar la fiabilidad	48.35
		Prueba de fiabilidad	48.36

Filtrado (inspección al 100 por ciento) y quemado (burn-in) ..	48.36	Software de fiabilidad	48.37
Aumento de fiabilidad	48.37	REFERENCIAS	48.38

INTRODUCCIÓN

Relaciones entre calidad y fiabilidad. Los rápidos avances en tecnología, el desarrollo de productos altamente sofisticados, la intensa competitividad globalizada y las crecientes expectativas del consumidor han añadido nuevas presiones en los fabricantes para producir productos de alta calidad. Mientras los productores con frecuencia piensan en alta calidad en términos de minimizar la chatarra o el retrabajo, la preocupación de los clientes va dirigida a la funcionalidad, fiabilidad y extenso tiempo de vida del producto. Los clientes esperan tener seguridad en comprar un producto que cumpla o exceda las expectativas de vida. Técnicamente, la fiabilidad se define frecuentemente como la probabilidad de que un sistema, vehículo, máquina, instrumento u otro producto cumpla su función deseada bajo condiciones operativas específicas, durante un período de tiempo especificado. La mejora de la fiabilidad es una parte importante de un objetivo global más amplio de mejorar la calidad del producto. Hay muchas definiciones de calidad, pero hay un acuerdo general de que un producto no fiable *no* es un producto de alta calidad. Condra (1993) enfatiza que «fiabilidad es calidad a lo largo del tiempo».

Los programas modernos para mejorar la fiabilidad de los productos existentes y para asegurar una continuada alta fiabilidad para la siguiente generación de productos exigen métodos cuantitativos de predicción y evaluación de la fiabilidad del producto y el suministro temprano de señales e información sobre las causas raíz del fallo. En muchos casos, esto supondrá recoger y analizar datos de fiabilidad procedentes de estudios tales como tests de laboratorios (o diseño de experimentos) sobre materiales, instrumentos y componentes, tests de las primeras unidades de prototipos, cuidadoso control de las primeras unidades de producción en su campo de actuación, análisis de datos de garantía y seguimiento sistemático durante un largo plazo del producto en su campo de actuación. Esto frecuentemente también implica la planificación cuidadosa de tales programas para asegurar que se obtiene la información más significativa. Las evaluaciones de fiabilidad presentan frecuentemente un problema adicional a los encontrados normalmente en las evaluaciones de calidad, ya que normalmente hay un tiempo transcurrido entre cuando el producto es fabricado y cuando la información de fiabilidad llega.

Aplicaciones del análisis de datos fiables. Algunos de los grandes objetivos en la obtención de datos fiables incluyen:

1. Obtener una temprana interpretación de los modos de fallo y comprender y quitar sus causas raíz —y con ello mejorar la fiabilidad.
2. Obtener información de los fallos de actuación del producto en los usuarios, para ayudar a mejorar el diseño del producto, quizás para la próxima versión.
3. Determinar cuánto tiempo debe estar funcionando cada unidad antes del envío (y en qué condiciones) para evitar prematuros fallos en los usuarios. Esto se denomina a veces «quemado» (*burn-in*).
4. Cuantificar la fiabilidad para determinar si un producto está preparado o no para su lanzamiento; es decir, ¿el producto satisface el nivel especificado de fiabilidad?
5. Predicción de los costos de garantía.

6. Decidir sobre la necesidad de retirar un producto a sus usuarios (así como la extensión de la retirada).

Aunque los cuatro últimos objetivos son, con frecuencia, los primeros por los que los analistas son preguntados, el concentrarse en ellos resulta a veces prematuro. El primer objetivo es el más fundamental, ya que no se puede demostrar un alto nivel de fiabilidad si, a decir verdad, no existe, y es obviamente deseable evitar los costosos «quemados» y las retiradas de producto. Sin embargo, mucha de la discusión de este capítulo se dirige a los cuatro últimos objetivos. El Capítulo 3, «El proceso de planificación de la calidad», y el Capítulo 19, «Calidad en investigación y desarrollo», consideran el proceso entero de asegurar una alta fiabilidad.

Fuentes y tipos de datos fiables. Es importante distinguir entre los siguientes tipos de datos de fiabilidad:

- El estadillo con la sucesión de tiempos de reparación (o con los tiempos de cualquier otro suceso específico del sistema) para un sistema reparable.
- Los tiempos hasta que se produce el fallo (u otro suceso claramente especificado) para unidades o componentes no reparables (incluyendo componentes *no reparables* en el interior de un sistema *reparable*).

Cuando los tests de fiabilidad se desarrollan en sistemas más grandes o subsistemas (incluso en aquellos que se pueden reparar), es esencial que se obtenga la información detallada sobre la causa del fallo a nivel de componente. Esto es especialmente importante si el propósito de la recolección de datos es la mejora del sistema de fiabilidad, y no es simple evaluación del sistema global de fiabilidad. Los capítulos siguientes describen métodos de análisis de datos para unidades o componentes no reparables, así como para analizar sistemas de datos de reparaciones.

La fiabilidad de datos se presenta en muchas situaciones diferentes. Algunos ejemplos son:

- Tests de laboratorio para estudiar durabilidad, uso u otras propiedades de duración de vida de materiales particulares, componentes o subsistemas.
- Tests de vida operativa en sistemas completos o subsistemas, hechos antes de que el producto sea enviado a los consumidores.
- Operaciones hechas por los clientes.

Lo típico es que la fiabilidad de los datos sea censurada, es decir, algunas unidades permanecen sin fallar, y (en el mejor de los casos) sólo conoceremos sus tiempos de supervivencia, pero no sus tiempos hasta que se produce el fallo. La razón más común para censurar es la necesidad de analizar los datos antes del fallo de todas las unidades. El análisis de los datos censurados es más complicado cuando difieren los tiempos censurados de las unidades que no han fallado. Esto ocurre cuando diferentes unidades del producto se colocan en el test o comienzan a funcionar en tiempos diferentes, lo que es usual al analizar datos de fallos en los usuarios. También puede ser el caso cuando las unidades tienen diferentes grados de exposición en el tiempo o cuando se evalúan fallos debidos a un particular modo de fallo (en cuyo caso los fallos de otros modos independientes se tratan como observaciones censuradas en el análisis de datos). Una importante hipótesis necesitada para el análisis estándar de datos censurados es que el tiempo de censurar es independiente de cuando esta unidad debería haber fallado. Por ejemplo, si a una unidad se le apartase del test o de su funcionamiento debido a estar ya muy cerca del fallo y se le tratase como una observación censurada, se introduciría un sesgo en el análisis.

Software de ordenador. En este capítulo nos centramos en los métodos y aplicaciones de análisis de fiabilidad con datos. Se dan fórmulas sólo cuando suministran nueva percepción y ayudan al lector a comprender cómo utilizar el método.

Si bien es posible hacer algún análisis simple de fiabilidad con datos manualmente, para análisis mayores de fiabilidad se debe utilizar ordenador con pantalla de alta resolución.

Desdichadamente, sólo unos pocos de los más conocidos paquetes estándar de análisis de datos tienen capacidad para hacer análisis de fiabilidad con datos. A medida que los vendedores de software se hagan más conscientes de las necesidades del cliente, es de esperar que mejorarán las capacidades de los paquetes comerciales.

SAS PROC RELIABILITY (SAS Institute 1996), SAS JMP (SAS Institute 1995), S-Plus (Statistical Sciences 1996), Minitab 12 (Minitab 1997) y un programa especial llamado WinSMITH (Abernethy 1966) pueden hacer análisis de vida con datos para situaciones simples (distribuciones simples) para las que se asume que todos los datos de vida están en unas únicas condiciones medioambientales. Son fáciles de utilizar y el carácter interactivo varía entre los paquetes considerados. Además, cada uno de esos programas, excepto WinSMITH, pueden hacer regresión y análisis de test de vida acelerados. SAS JMP puede también analizar datos con más de un modo de fallo. SAS PROC RELIABILITY puede, adicionalmente, hacer los análisis de los sistemas no reparables paramétricos descritos en este capítulo. Meeker y Escobar (1998) describen las funciones S-Plus que se pueden utilizar para hacer todos los análisis descritos en este capítulo.

MODELOS DE DATOS DE VIDA

Este capítulo trata preferentemente con componentes no reparables u otros productos que son reemplazados, en lugar de ser reparados, cuando sobreviene el fallo (o bien se considera el tiempo del primer fallo en productos reparables). Se describe lo siguiente:

1. Modelos estadísticos para representar tiempos de fallo de productos no reparables.
2. Métodos para estimar cantidades de interés (es decir, probabilidades de fallo, distribución de cuantiles) de datos de tiempo de fallo, con o sin hacer alguna hipótesis sobre la distribución.

Discutimos inicialmente modelos que tratan el tiempo de fallo sólo con las condiciones de utilización. En la discusión siguiente de tests de vida acelerados se describen los correspondientes modelos de regresión que explican el efecto que factores como la temperatura tienen en la vida.

Conceptos del modelo de tiempo de fallo. La distribución del tiempo de fallo T de un producto se puede caracterizar por la función de distribución acumulada (cdf), por la función de densidad de probabilidad (pdf), por la función de supervivencia (sf) o por la función de riesgo (hf). La forma común de describir un modelo estadístico en muchas aplicaciones es con las funciones cdf y pdf, tal como se hace en los cursos elementales de estadística. Por otra parte, la función hf no es tan bien conocida, pero tiene mucha aplicabilidad en el análisis de datos de vida. Estas funciones están descritas abajo e ilustradas (para una posible distribución de tiempos de fallo) en la Figura 48.1. La elección de la función o funciones a utilizar depende del problema práctico específico que sea considerado. Todas estas funciones son importantes por un propósito o por otro.

La función de distribución acumulada de probabilidad (cdf) para T , $F(t) = \Pr(T \leq t)$ da la *probabilidad* de que una unidad, seleccionada aleatoriamente de una población o un proceso, falle antes del tiempo t . Alternativamente, $F(t)$ se puede interpretar como la *proporción* de unidades en la población (o en un proceso estacionario) que fallan antes del tiempo t . [Aquí un proceso estacionario se define como un proceso que genera unidades que tienen una cdf $F(t)$ que no cambia con el tiempo].

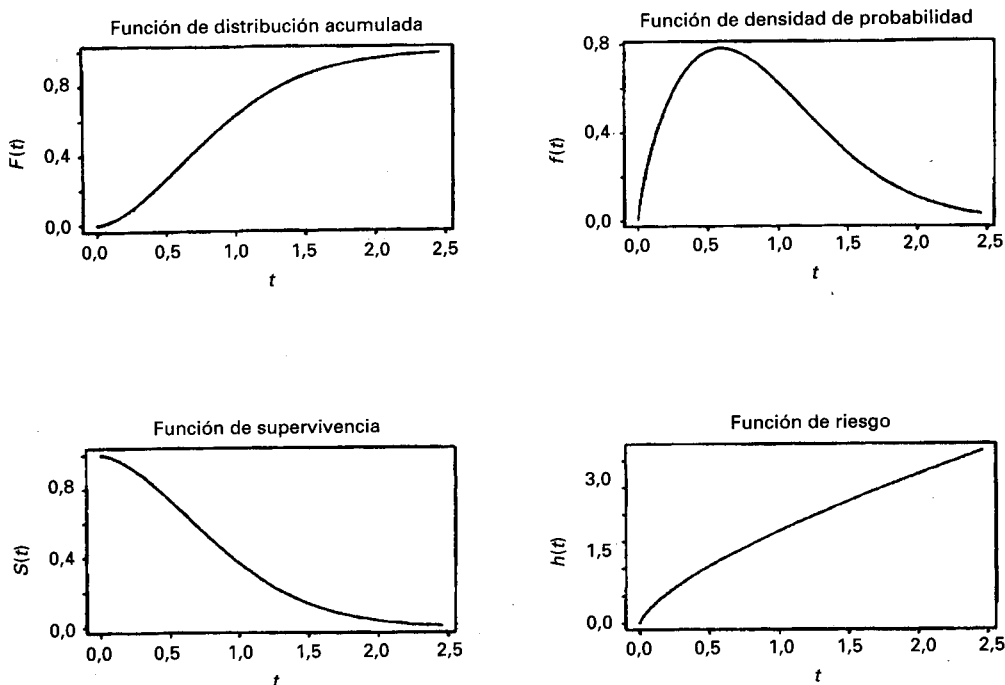


FIGURA 48.1 Funciones típicas cdf, pdf, sf y hf de tiempos de fallo.

La función de supervivencia sf (también conocida como *función de fiabilidad*) es el complemento de la función cdf, $S(t) = \Pr(T > t) = 1 - F(t) = \int_t^\infty f(x)dx$, y da la probabilidad de sobrevivir hasta el tiempo t .

El pdf (función de densidad de probabilidad) para una variable aleatoria continua T se define como la derivada de $F(t)$ con respecto al tiempo t : $f(t) = dF(t)/dt$. Por tanto, para una variable aleatoria positiva, $F(t) = \int_0^t f(x)dx$. La función pdf se puede utilizar para representar frecuencias relativas de tiempos de fallo como una función del tiempo y se le puede interpretar como un histograma suavizado de un gran número de tiempos de fallo observados.

La función hf (también conocida como proporción de riesgo, función de proporción instantánea de fallos, y varios otros nombres más) se define por

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Pr(t < T \leq t + \Delta t \mid T > t)}{\Delta t} = \frac{f(t)}{1 - F(t)}$$

La función hf expresa la propensión al fallo en el próximo intervalo pequeño de tiempo, condicionado a haber sobrevivido al tiempo t . Es decir, para un pequeño Δt , $h(t) \times \Delta t \approx \Pr(t < T \leq t + \Delta t \mid T > t)$. La función hf se puede interpretar como una proporción de fallo en el siguiente sentido. Si hay un gran número de piezas [por ejemplo $n(t)$] en funcionamiento en el tiempo t , entonces, $n(t) \times h(t)$ es aproximadamente igual al número de fallos por unidad de tiempo [o $h(t)$ es aproximadamente igual al número de fallos por unidad de tiempo y por unidad con riesgo de dejar de funcionar]. Debido a su estrecha relación con fallos de proceso y con estrategias de mantenimiento, los ingenieros de fiabilidad frecuentemente modelan el tiempo de fallo en términos de $h(t)$. La «curva de bañera» mostrada en la Figura 48.2 suministra un modelo conceptual útil para muchas poblaciones. Puede haber fallos tempranos de unidades con defectos relacionados con

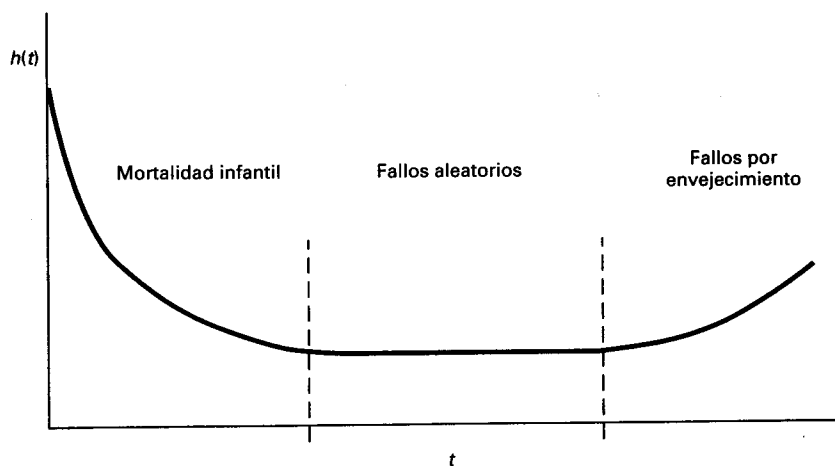


FIGURA 48.2 Función de riesgo curva de bañera.

la calidad (mortalidad infantil). Durante gran parte de la vida útil del producto, la función de riesgo es aproximadamente constante, pues los fallos son causados por choques o interacciones externas que ocurren aleatoriamente. Los fallos al final de la vida se deben al envejecimiento. Muchos tests de fiabilidad se localizan en una parte u otra de esta curva.

Otras cantidades de interés en análisis de fiabilidad. La media (también denominada «valor esperado» o «momento de primer orden») de una variable aleatoria T es una medida de tendencia central o vida «media», y se define por

$$E(T) = \int_0^{\infty} tf(t) dt$$

Cuando la función de densidad de probabilidad $f(t)$ es muy asimétrica, es decir, que tiene una larga cola a la derecha (lo que es común en muchas aplicaciones con datos de vida), el tiempo medio de fallo puede diferir apreciablemente de otras medidas de tendencia central, como el tiempo mediano de fallo (que es el tiempo en el que ya ha fallado la mitad de la población). El tiempo medio de fallo $E(T)$ también se representa por MTTF.

Los parámetros tradicionales en los modelos estadísticos (media y desviación típica) *no* son frecuentemente de interés primario en los estudios de fiabilidad. En lugar de ellos, los ingenieros de diseño, los ingenieros de fiabilidad, gerentes y clientes están interesados en medidas específicas de fiabilidad de producto o en características particulares de la distribución de tiempos de fallo, por ejemplo la distribución de cuantiles. En particular, el cuantil t_p es el tiempo en el que la proporción p de la población ha fallado. Se tiene que $F(t_p) = p$. Por ejemplo, t_{20} es el tiempo hasta el que el 20 por ciento de la población ha fallado. De forma alternativa, frecuentemente sólo se quiere conocer $F(t)$, que es la probabilidad de fallo asociada con un número particular de horas, días, semanas, meses o años de uso, es decir, la probabilidad de que un producto falle durante los primeros t años (meses...) de funcionamiento.

Distribuciones usuales paramétricas de tiempo de fallo

La distribución exponencial. La función cdf de la distribución exponencial es

$$F(t; \theta) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\theta}\right) \quad t > 0$$

donde el parámetro $\theta > 0$ de la distribución se llama factor o parámetro de escala. La distribución exponencial no tiene parámetro de forma, y por tanto tiene una forma única. Las funciones exponenciales cdf, pdf y la función de riesgo están dibujadas en la Figura 48.3 para $\theta = 0,5$, 1 y 2. El cuantil p de la distribución exponencial es $t_p = -\theta \log(1-p)$. La distribución exponencial tiene la importante característica de que su función de riesgo $h(t) = 1/\theta$ es constante (no dependiendo del tiempo t). Una función de riesgo constante implica que, por unidad no fallada, la probabilidad de fallo en el siguiente intervalo de tiempo es independiente de la edad de la unidad. Físicamente, una función de riesgo constante implica que las unidades de la población no están sujetas al modo de fallo de la mortalidad infantil y también que no se desgastan ni sufren otro tipo de envejecimiento. Por tanto, este modelo es apropiado cuando los fallos son inducidos por un fenómeno externo que es independiente de la vida del producto y de su historia pasada. Un ejemplo puede ser la vida en servicio de un plato en un restaurante, cuyo fin de vida es el resultado de una rotura. Por su simplicidad, la distribución exponencial se utiliza mucho, y bastantes veces incorrectamente. No es apropiada para modelar la vida de componentes mecánicos (por ejemplo, cojinetes) sujetos a una combinación de fatiga, corrosión o desgaste, o para componentes electrónicos que también tienen propiedades de desgaste en su vida (por ejemplo, láseres y filamentos).

La distribución de Weibull. La cdf de la distribución de Weibull es

$$F(t; \eta; \beta) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \right] \quad t > 0$$

donde $\beta > 0$ es el parámetro de forma de la distribución y $\eta > 0$ es el parámetro de escala (que es, aproximadamente, el cuantil 0,63 de esta distribución). El cuantil p de la distribución de

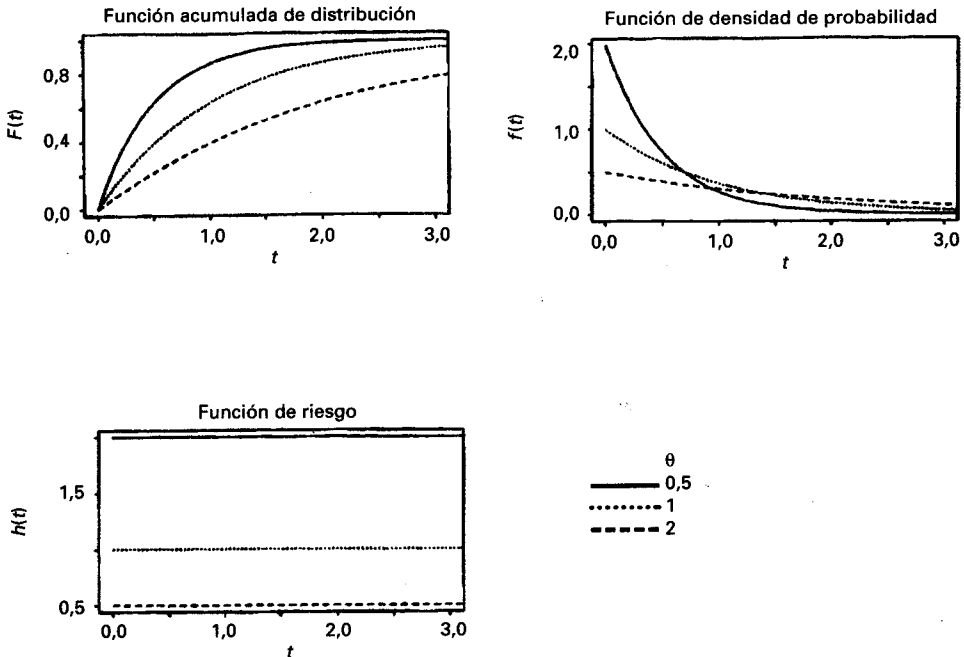


FIGURA 48.3 Cdf, pdf y hf de la distribución exponencial para $\theta = 0,5$, 1 y 2.

Weibull es $t_p = \eta[-\log(1 - p)]^{1/\beta}$. Por ejemplo, la mediana de la distribución de Weibull es $t_{0,5} = \eta[-\log(1 - 0,5)]^{1/\beta}$. La función de riesgo de la distribución de Weibull es $h(t) = (\beta/\eta)(t/\eta)^{\beta-1}$. La distribución exponencial es un caso especial de la de Weibull con $\beta = 1$. La importancia práctica de la distribución de Weibull resulta de su capacidad de describir distribuciones de fallos con muchas formas diferentes que normalmente se presentan en la práctica. Como se ilustra en la Figura 48.4, para $0 < \beta < 1$ la función de riesgo de Weibull es decreciente, en tanto que para $\beta > 1$ la función de riesgo de Weibull es creciente. Por tanto, la distribución de Weibull puede utilizarse para describir la función de riesgo decreciente causada por la mortalidad infantil o la función de riesgo creciente debida al desgaste, pero *no* ambas a la vez. La distribución de Weibull se utiliza frecuentemente como un modelo para la duración de un aislamiento y de muchos otros productos, así como un modelo para la resistencia de materiales. En muchas aplicaciones hay una justificación teórica de su uso.

El logaritmo de una variable aleatoria de Weibull, $Y = \log(T)$, sigue una distribución con mínimo valor extremo tal que

$$\Pr [\log(T) \leq \log(t)] = F(t; \mu, \sigma) = \Phi_{\text{sev}}\left(\frac{\log(t) - \mu}{\sigma}\right)$$

donde $y = \log(t)$, $\Phi_{\text{sev}}(z) = 1 - \exp[-\exp(z)]$, $\mu = \log(\eta)$ es un parámetro de localización con $-\infty < \mu < \infty$, y $\sigma = 1/\beta > 0$ es un parámetro de escala. La relación entre la distribución de Weibull y la distribución con mínimos valores extremos es similar a la relación entre la distribución normal y la distribución logarítmico normal. Esta relación se utilizará más tarde en este capítulo al explicar métodos de análisis de regresión para tiempos de fallos y modelos para aceleración de tests.

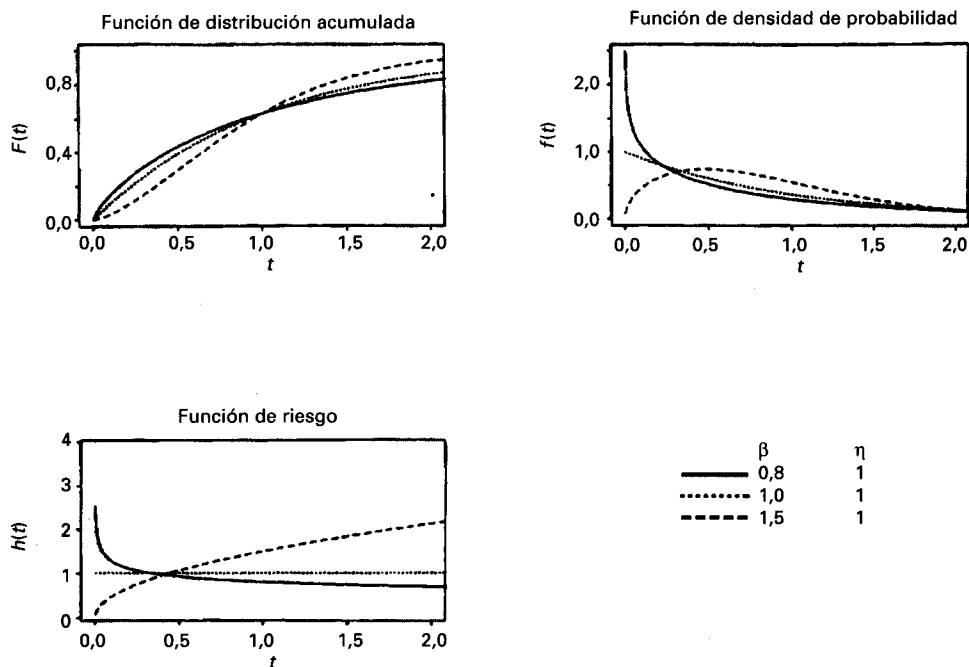


FIGURA 48.4 Cdf, pdf y hf de la distribución de Weibull para el parámetro de escala $\eta = 1$ y para el parámetro de forma $\beta = 0,8, 1,0$ y $1,5$.

La distribución logarítmico-normal. La distribución normal, aunque tiene un papel central en otras aplicaciones estadísticas, no es con frecuencia apropiada como modelo de tiempos de fallo. Esto es debido a que los fallos pueden ocurrir en tiempos muy cercanos a las cero horas, pero no pueden ser negativos. Sin embargo, los logaritmos de los tiempos de fallos son con frecuencia bien descritos por una distribución normal. Esto es equivalente a ajustar los tiempos de fallos por una distribución logarítmico normal (abreviadamente, lognormal). La función cdf lognormal es

$$F(t; \mu, \sigma) = \Phi_{\text{nor}} \left[\frac{\log(t) - \mu}{\sigma} \right] \quad t > 0$$

donde Φ_{nor} es la función cdf para la distribución normal estándar (véase Capítulo 44). El parámetro $\exp(\mu)$ es un factor de escala y la mediana de la distribución, y $\sigma > 0$ es el parámetro de forma. El cuantil p de la distribución lognormal es $t_p = \exp[\mu + \Phi_{\text{nor}}^{-1}(p)\sigma]$, donde Φ_{nor}^{-1} es la inversa de la distribución normal estandarizada. La relación entre las distribuciones lognormal y normal se utiliza con frecuencia para simplificar la utilización de la distribución lognormal.

La distribución lognormal se utiliza comúnmente como modelo para la distribución de tiempos de fallos. Como muestra la Figura 48.5, la función de riesgo lognormal siempre comienza en 0, aumenta hasta un máximo, y luego se acerca a 0 cuando t se hace grande.

Según el teorema central del límite (descrito en el Capítulo 44), está justificada la aplicación de la distribución lognormal para una variable aleatoria formada por el producto de muchas variables positivas aleatorias positivas, idénticas e independientes. Por ejemplo, se ha sugerido que la distribución lognormal es el modelo apropiado para los tiempos de fallo de un proceso de degradación resultado de la multiplicación de proporciones constantes aleatorias.

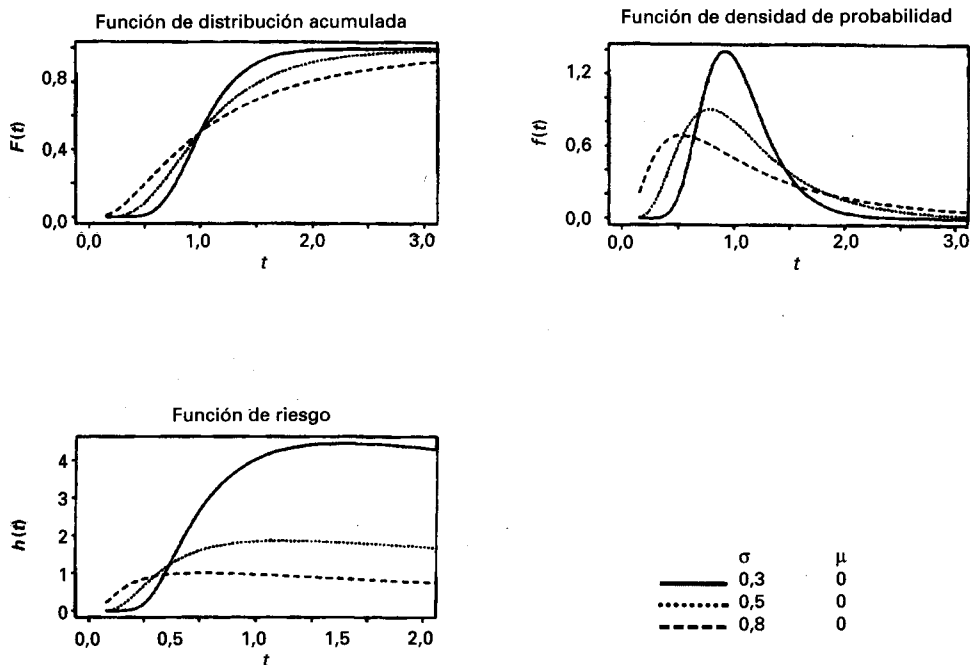


FIGURA 48.5 Cdf, pdf y hf de la distribución lognormal con parámetro de escala $\exp(\mu) = 1$ y para el parámetro de forma $\sigma = 0,3, 0,5$ y $0,8$.

Consecuentemente, la distribución lognormal se utiliza ampliamente en la descripción de tiempos de fallo debidos a la fatiga y en aplicaciones microelectrónicas.

Otras distribuciones de vida. Para más detalles de estas y otras distribuciones que pueden utilizarse para describir distribuciones de vida, véanse el Capítulo 8 de Hahn y Shapiro (1967) y los Capítulos 4 y 5 de Meeker y Escobar (1998).

Modos de fallos múltiples. En situaciones más complejas (por ejemplo, productos que tienen *tanto* mortalidad infantil como desgaste por el uso, como sucedía en la curva de bañera, que se describió anteriormente), los datos no pueden ajustarse por ninguno de los modelos precedentes. Con frecuencia este es el caso cuando hay más de un modo de fallo. En tales casos, si se identifican los modos de fallo individuales, es usualmente mejor hacer evaluaciones separadas de cada uno de estos modos y combinar los resultados para obtener un sistema total de probabilidades. Para ejemplos, véase más información en el Capítulo 5 de Nelson (1982) o en el Capítulo 15 de Meeker y Escobar (1998).

ANÁLISIS DE DATOS DE VIDA CENSURADOS

Esta sección ilustra métodos sencillos, pero potentes, para analizar datos de vida. El primer ejemplo utiliza datos de un test de vida de un laboratorio. El segundo ejemplo ilustra el análisis de datos múltiplemente censurados de un estudio de seguimiento de campo (en las condiciones operativas). En ambos casos se procede de la siguiente forma:

1. Analizar gráficamente los datos, utilizando un procedimiento no paramétrico (no se requiere ninguna hipótesis respecto a la forma de la distribución subyacente) con representación en un papel probabilístico especial. Estos gráficos también nos ayudan a explorar la adecuación de posibles modelos de distribución.
2. Si una distribución paramétrica suministra una adecuada descripción de los datos disponibles, estimar los parámetros de la distribución.
3. Utilizando estos parámetros, estimar los cuantiles que interesen de la distribución. Proporción de fallos de la población en tiempos específicos, valores de la función de riesgo, e intervalos de confianza apropiados en algunos o en todos de los valores estimados.

Muestra de datos de un test de vida (uncensurados). Para una muestra de datos de un test de vida con n observaciones, controlando los fallos de forma continua o muy frecuentemente, y censurados todos al final del período de observación (típico en tests de vida en laboratorios), una estimación no paramétrica de $F(t)$ se puede calcular por

$$\hat{F}(t) = \frac{\text{número de fallos hasta el tiempo } t}{n} \quad [48.1]$$

Esta es una función escalonada que salta $1/n$ en cada tiempo de fallo (salvo que se produzcan r fallos simultáneos en un tiempo, en cuyo caso el salto es r/n). Esta estimación no necesita ninguna hipótesis respecto a la forma de la distribución subyacente. La estimación sólo puede hacerse hasta el tiempo de censuramiento, y no más adelante.

Ejemplo: Test de fatiga en eslabón de cadena. Parida (1991) da los resultados de un test de fatiga en un gran ciclo con carga controlada en 130 eslabones de cadena. Los 130 eslabones se seleccionaron aleatoriamente de una población de diferentes hornadas utilizadas en la fabricación de eslabones. A cada eslabón se le aplicó el test hasta el fallo o hasta que se le habían apli-

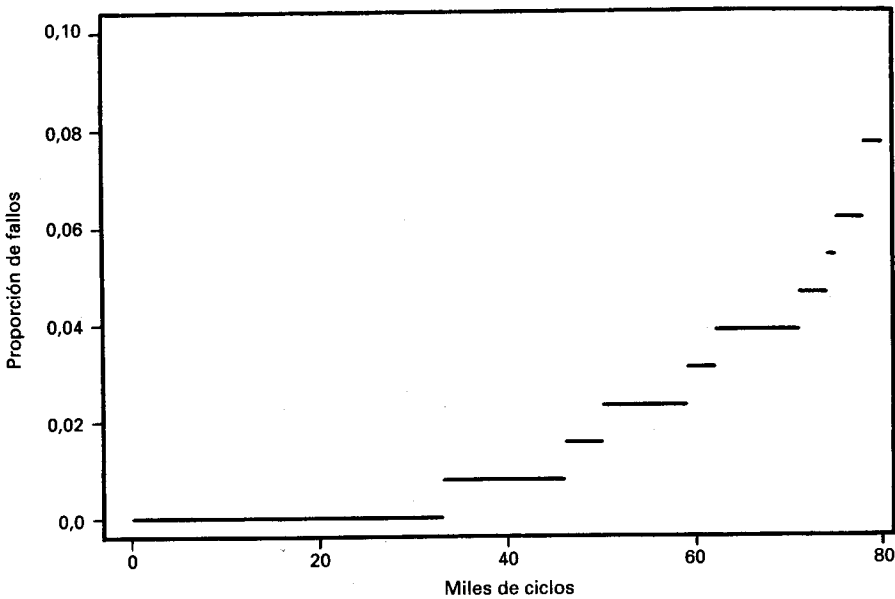


FIGURA 48.6 Estimación no paramétrica de $F(t)$ para los datos de fallo de eslabón de cadena.

cado 80.000 ciclos. Hubo 10 fallos: a los 33, 46, 50, 59, 62, 71, 74 y 75 ciclos y dos a los 78.000 ciclos. Los 120 eslabones restantes no fallaron en esos 80.000 ciclos. La Figura 48.6 muestra la función escalonada no paramétrica que a través de esos datos estima $F(t)$.

Representación en papel probabilístico. La comparación de los datos representados en figuras como la 48.6 con distribuciones acumuladas teóricas, como las de las Figuras 48.3, 48.4 y 48.5, es difícil, pues el ojo humano no puede comparar fácilmente curvas no lineales. Los gráficos probabilísticos representan los datos en *escalas especiales de probabilidad* de manera que una particular distribución teórica acumulada de probabilidad se representa por una línea recta cuando se dibuja en tal escala. Por ejemplo, al tomar el logaritmo de los cuantiles de la distribución de Weibull, se obtiene la línea recta $\log(t_p) = \log(\eta) + (1/\beta)\log[-\log(1-p)]$. Por tanto, la representación de los datos en un papel adecuado de probabilidad, y la comprobación de que el gráfico razonablemente se aproxima a una línea recta, suministra una evaluación sencilla de la adecuación del modelo asumido. Además, los gráficos probabilísticos se utilizan normalmente para estimar:

- La distribución de los cuantiles.
- Las probabilidades de sobrevivir a ciertos tiempos de vida especificados.

La Figura 48.7 es el dibujo en papel probabilístico de Weibull de los datos de fallo en eslabón de cadena. Un método de obtener el gráfico probabilístico es representar el i -ésimo tiempo de fallo (o número de ciclos del i -ésimo fallo) en el eje de tiempos e $(i-0,5)/n$ en el eje de probabilidades para $i = 1, 2, \dots$. Esto es equivalente a representar, en cada salto de la función escalonada de la Figura 48.6, el punto medio entre los extremos de cada salto en función de los tiempos de salto, como lo muestra la Figura 48.7. El dibujo de la curva a través de esos puntos nos permite estimar la distribución de cuantiles y de probabilidades de supervivencia, sin asumir ningún modelo de distribución. En este caso, los puntos dibujados en la Figura 48.7 están

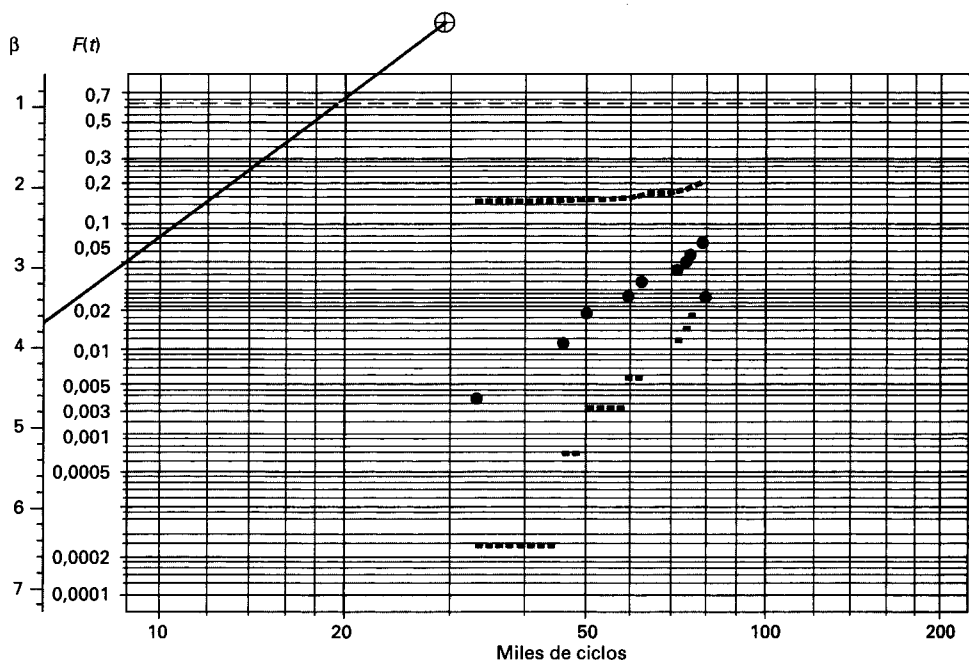


FIGURA 48.7 Gráfico en papel de probabilidad de Weibull para fallos de eslabón de cadena con intervalo bilateral de confianza al 95%.

cerca de una línea recta, indicando que la distribución de Weibull suministra un buen ajuste de los datos. La Figura 48.7 contiene una escala especial « β » que nos permite obtener una estimación gráfica del parámetro de forma de la distribución de Weibull. Esto se hace dibujando una línea desde la marca en cruz en la parte superior del gráfico y en dirección paralela a la línea que parece ajustar mejor a los puntos. El corte de esta línea con la escala β nos da la estimación del parámetro « β ». En este caso, la estimación gráfica del parámetro de forma de Weibull es $\beta \approx 3,62$. Una estimación gráfica del parámetro de escala η de la distribución de Weibull se puede obtener representando la línea que mejor se ajusta a los puntos y leyendo una estimación del cuantil 0,63, obteniendo $\hat{\eta} \approx 18,5$ en este ejemplo. El cuadrículado de la Figura 48.7 es útil para dibujar a mano o para leer números del gráfico. Se puede argumentar que el cuadrículado interfiere con la interpretación del gráfico, por lo que su inclusión debe ser una opción del software.

Las líneas de puntos de este gráfico probabilístico dan el intervalo de confianza no paramétrico (es decir, sin ninguna hipótesis de distribución de los parámetros) al 95 por ciento, que ayuda a evaluar la incertidumbre de la muestra en la evaluación de $F(t)$. Este intervalo de confianza se obtiene utilizando el método descrito por Nair (1984) y se define en función de la distribución de la bondad del test de ajuste. Si se puede dibujar una línea recta a través de cada una de las líneas de la banda de confianza, como es el caso aquí, entonces la distribución correspondiente al papel probabilístico utilizado (Weibull para la Figura 48.7) no debe ser desechada como un modelo que pudiese generar los datos.

Un gráfico similar lognormal (no mostrado aquí) sugiere que los datos también podrían venir de una distribución lognormal. La asunción de la distribución lognormal suministra estimaciones similares para los cuantiles dentro del rango de los datos, pero apreciables diferencias fuera del rango.

Estimación de máxima verosimilitud. El método de máxima verosimilitud (ML = maximum likelihood) proporciona un método estadístico formal y objetivo para aproximar una distribución de vida, utilizando un modelo asumido y estimando varias propiedades, como la distribución de cuantiles y de probabilidades de fallo. También puede utilizarse un papel probabilístico para mostrar la estimación ML de $F(t)$. En efecto, el ajuste de una distribución de Weibull utilizando ML consiste en ajustar por una línea recta los puntos dibujados en el papel probabilístico. Los programas de ordenador están ajustados para esta tarea. El método de los mínimos cuadrados (utilizando los métodos de regresión lineal estándar) se puede utilizar para ajustar los puntos por una línea recta. ML es, sin embargo, el método preferido, especialmente con datos censurados, por sus buenas propiedades estadísticas y por otras justificaciones teóricas. La Figura 48.8 es similar a la Figura 48.7, pero da el gráfico probabilístico de Weibull para los datos de los eslabones de cadena con la línea ML superpuesta. Las líneas punteadas delimitan el intervalo de confianza puntual estimado de $F(t)$ con la aproximación paramétrica normal al 95 por ciento (calculado en la forma descrita en el Capítulo 8 por Meeker y Escobar 1998). Para algunos propósitos, la incertidumbre implicada por los intervalos de la Figura 48.8 sugeriría la necesidad de más información. La siguiente subsección discute métodos de elección del tamaño de muestra para controlar el ancho de los intervalos de confianza para los cuantiles de Weibull.

El gráfico probabilístico de la Figura 48.8 puede sugerir extrapolar fuera del recorrido de los valores de tiempo de los fallos, en ambas direcciones. Se debe observar que tal extrapolación es peligrosa; sólo los datos no nos dicen nada respecto a la forma de $F(t)$ fuera del rango de 30.000 a 90.000 ciclos. Por otra parte, los intervalos de confianza, aunque son más amplios fuera del recorrido de los datos, reflejan sólo la incertidumbre debida a la limitación de los

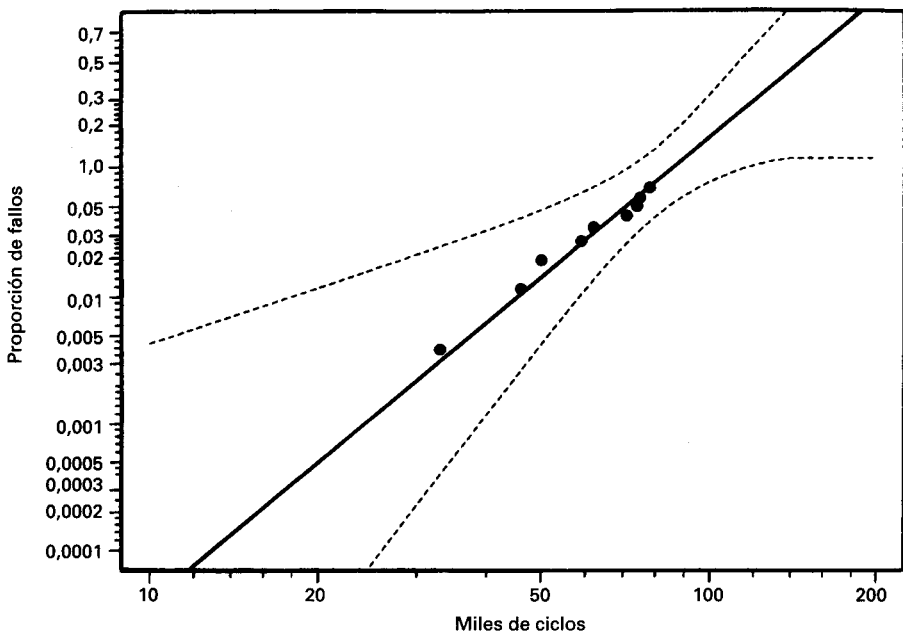


FIGURA 48.8 Gráfico probabilístico de Weibull con la estimación de la distribución de Weibull por el método ML y los intervalos de confianza puntuales para $F(t)$ para los datos de fallo de los eslabones de la cadena.

datos, y se asume que el ajuste por la distribución de Weibull se mantiene más allá del recorrido de los datos tanto como en el interior.

Líneas guía en la elección del tamaño de muestra en los tests de vida. Generalmente, grandes muestras dan estimaciones más precisas. Esta subsección muestra cómo elegir el tamaño de muestra n para controlar con precisión un test de vida sencillo. Ciertamente se requiere información de entrada, como lo ilustra el siguiente ejemplo.

Planificación de valores para determinar tamaños de muestra. Como ilustración, supongamos que unos investigadores desean ejecutar un test de duración para un nuevo instrumento mecánico. El test durará 30 días y los experimentadores esperan, por experiencias anteriores, que alrededor del 7 por ciento de unidades fallarán en ese período de tiempo. También las referidas experiencias anteriores les hace esperar que los datos se ajusten a una distribución de Weibull con parámetro de forma cercano a $\beta = 3$.

Utilización de la simulación para evaluar la precisión. Los gráficos de la Figura 48.9 comparan simulaciones de estimaciones ML de cdf para las situaciones anteriores de tests (distribución de Weibull con $\eta = 30[-\log(1 - 0,07)]^{-1/3} = 71,92$ días y $\beta = 3$) con un tiempo fijo de censura de 30 días para tamaños de muestra $n = 40, 160, 640$ y 2.560 ; cada simulación está basada en 30 muestras aleatorias de tamaño n . En cada gráfico, la línea más gruesa y larga muestra el cdf de la supuesta subyacente distribución cierta de la población, de la que los datos

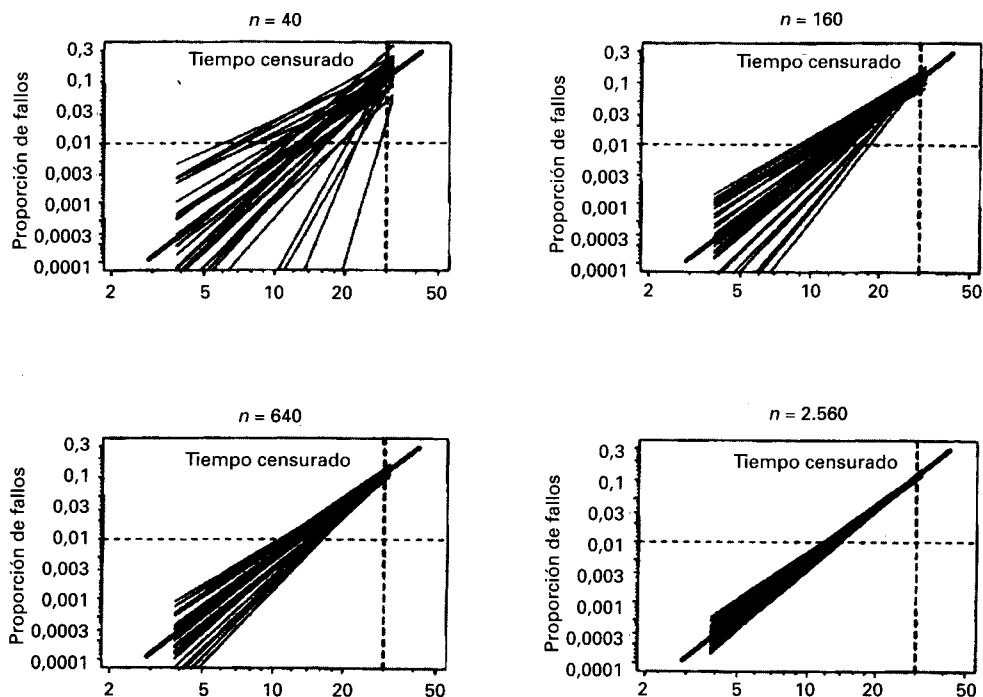


FIGURA 48.9 Dibujos en papel probabilístico de Weibull de la cdf y del cuantil 0,01 estimado mediante el método ML, para 30 muestras simuladas de tamaño $n = 40, 160, 640$ y 2.560 para una distribución de Weibull con $\eta = 71,92$ y $\beta = 3$.

generados fueron sacados. Las otras líneas muestran el cdf estimado para cada una de las 30 simulaciones. Una comparación de los gráficos muestra que con una muestra de pequeño tamaño, la línea estimada se puede separar apreciablemente de la línea verdadera. Mirando la línea horizontal con marcas, podemos ver la mejora en precisión para estimar el tiempo en el que el 1 por ciento de la población habría fallado a medida que el tamaño de la muestra crece. Por ejemplo, para $n = 40$, las 30 estimaciones de $t_{0,01}$ van desde 5,9 hasta 28,0 días, en tanto que para $n = 2.560$, el rango va de 11,2 a 14,2 días. Por tanto, tales estimaciones nos permiten evaluar la precisión que puede esperarse en la estimación de cierto estudio planeado, y desde esta evaluación se puede decidir el apropiado tamaño muestral.

Fórmula analítica del tamaño de muestra. Si se prefiere un enfoque analítico para encontrar el tamaño de muestra necesitado para estimar el cuantil t_p de una distribución de Weibull con un grado especificado de precisión, se puede utilizar una fórmula aproximada con la ayuda de un conjunto de curvas. Así, en nuestro ejemplo, podemos desear estimar el cuantil 0,01 sin alejarnos más de un 40 por ciento de su verdadero valor con un 95 por ciento de confianza. La fórmula aproximada es

$$n = \frac{z_{(1-\alpha/2)}^2 V^\square}{[\log(R_T)]^2}$$

donde $z_{(1-\alpha/2)}$ es el cuantil $1 - \alpha/2$ de la distribución normal estandarizada; $1 - \alpha$ es el deseado nivel de confianza; $R_T > 1$ es el objetivo de precisión, y $V^\square$ es el valor leído en la Figura 48.10, multiplicado por $(\beta^\square)^2$, donde $\beta^\square$ es el «valor planificado» para el parámetro β de la distribución de Weibull. En nuestro ejemplo, $\beta^\square = 3$. Para un intervalo de confianza al 95 por ciento, $\alpha = 0,05$, $1 - \alpha/2 = 0,975$, por lo que $z_{0,975} = 1,96$. Los valores típicos de R_T varían de 1,2 a 2, cuando lo deseado es que los puntos finales del intervalo de confianza no se alejen del punto estimado t_p más de $100(R_T - 1)$ por ciento por arriba y por abajo. En nuestro ejemplo, $R_T = 1,4$. La Figura 48.10 da un gráfico del factor de varianza aproximado en una muestra grande, $\beta^2 \times V$, para estimar t_p . Una varianza menor implica mayor precisión en la estimación. Cada línea da $\beta^2 \times V$ como función del cuantil p cuyo valor se desea estimar con el test de vida; en nuestro ejemplo, $p = 0,01$. Hay diferentes líneas para diferentes valores de p_c , la proporción esperada de fallos durante la vida del test. En nuestro ejemplo, $p_c = 0,07$. Las curvas en la Figura 48.10 se utilizan para leer $\beta^2 \times V$ utilizando p y p_c y entonces resuelven el valor $V^\square$ de V , utilizando $\beta^\square$. Si el modelo y los valores planificados son correctos, la precisión realmente obtenida será menor que la precisión objetivo R_T con probabilidad aproximada 0,5.

En el ejemplo, entrando en la Figura 48.10 con $p_c = 0,07$ y $p = 0,01$, leemos la ordenada $V^\square \times (\beta^\square)^2 \approx 70$, por lo cual $V^\square \approx 70/(3)^2 = 7,778$. Por tanto, con $R_T = 1,4$,

$$n = \frac{z_{(1-\alpha/2)}^2 V^\square}{[\log(R_T)]^2} = \frac{(1,96)^2 (7,778)}{[\log(1,4)]^2} = 264$$

es el número de piezas a las que se debe aplicar el test. En resumen, para estimar el cuantil 0,01 dentro de un 40 por ciento de su verdadero valor con un 95 por ciento de confianza, necesitamos aplicar el test a 264 unidades durante 30 días (bajo la hipótesis de que la distribución de Weibull tenga un parámetro de forma igual a 3 y un 7 por ciento de fallos esperado después de 30 días).

Análisis de datos múltiplemente censurados. Se pueden presentar los datos múltiplemente censurados cuando las diferentes unidades entran en servicio en diferentes tiempos o las unidades tienen tiempos de funcionamiento diferentes en cierto tiempo transcurrido (probablemente en un lugar real de trabajo), o en una variedad de otras situaciones (como en el análisis de un modo particular de fallo, en el que las unidades que fallan independientemente debido a otros modos de fallo se considera que siguen actuando con respecto al modo de fallo

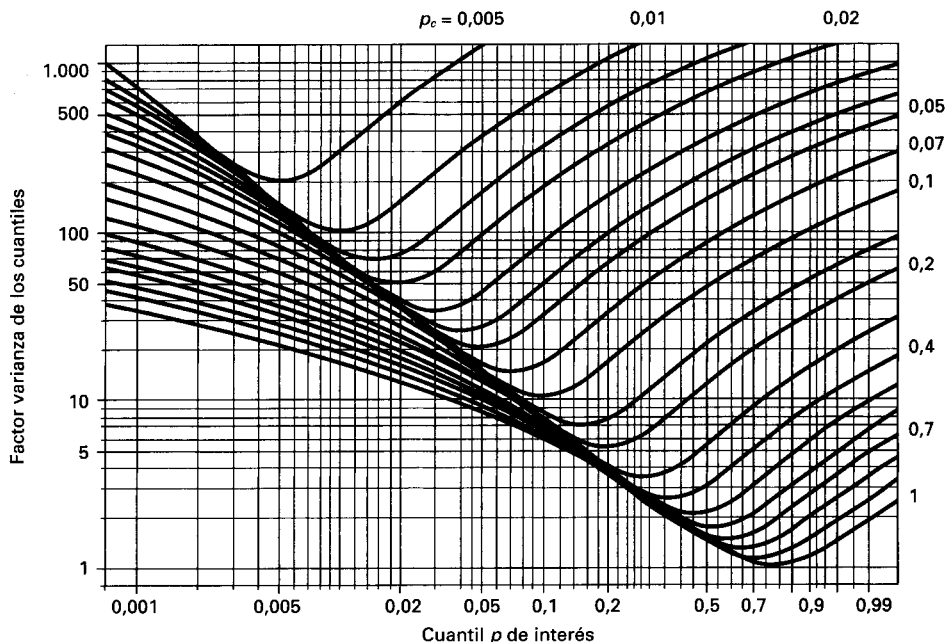


FIGURA 48.10 Factor aproximado de varianza $\beta^2 \times V$ para la estimación por máxima verosimilitud de los cuantiles de una distribución de Weibull de una gran muestra en función de p_c , la proporción de población que falla en el tiempo censurado t_c y p , el cuantil de interés.

bajo evaluación). En este caso, frecuentemente algunos tiempos de funcionamiento de unidades no falladas son menores que algunos tiempos de fallos. La censura múltiple es frecuente en la práctica, especialmente al tratar con datos de vida en un lugar real de trabajo. Para estos datos, la probabilidad acumulada de fallos $F(t)$ no se puede estimar directamente utilizando [48.1]. En su lugar se utiliza un estimador alternativo, que se describe abajo. El estimador ML y los intervalos de confianza aproximados que se mencionaron previamente todavía se aplican.

Ejemplo: Datos de fallos en amortiguadores. O'Connor (1985) da datos de fallos para amortiguadores. En el tiempo del análisis, los fallos habían sucedido a los 6.700, 9.120, 12.200, 13.150, 14.300, 17.520, 20.100, 20.900, 22.700, 26.510 y 27.490 km. Había 27 unidades en servicio que no habían fallado. Los kilómetros que habían hecho estas unidades habían sido 6.950, 7.820, 8.790, 9.660, 9.820, 11.310, 11.690, 11.850, 11.880, 12.140, 12.870, 13.330, 13.470, 14.040, 17.540, 17.890, 18.450, 18.960, 18.980, 19.410, 20.100, 20.150, 20.320, 23.490, 27.410, 27.890 y 28.100 km.

Para estimar $F(t)$ con datos múltiplemente censurados, utilizamos el siguiente procedimiento no paramétrico (es decir, que no asume ningún tipo de distribución). Sean $t_1, t_2, \dots, t_r$ los tiempos en los que ocurren los fallos; sea d_i el número de unidades que fallan en t_i , y sea n_i el número de unidades que no han fallado hasta el instante t_i . El estimador de $F(t)$ para todos los valores de t entre t_i y t_{i+1} es

$$F(t_i) = 1 - \prod_{j=1}^i \left(1 - \frac{d_j}{n_j} \right) \quad i = 1, \dots, r \quad [48.2]$$

TABLA 48.1 Estimaciones no paramétricas de $F(t)$ para datos de amortiguadores hasta 12.200 km

t_i , km	d_i	r_i	n_i	d_i/n_i	$1 - d_i/n_i$	$\hat{S}(t_i)$	$\hat{F}(t_i)$
6.700	1	0	38	1/38	37/38	0,97368	0,0263
6.950	0	1	37				
7.820	0	1	36				
8.790	0	1	35				
9.120	1	0	34	1/34	33/34	0,94505	0,0549
9.660	0	1	33				
9.820	0	1	32				
11.310	0	1	31				
11.690	0	1	30				
11.850	0	0	29				
11.880	0	1	28				
12.140	0	1	27				
12.200	1	0	26	1/26	25/26	0,90870	0,0913

Este es el bien conocido límite producto o estimador de Kaplan-Meier. Sólo se puede utilizar dentro del intervalo de fallos de los datos. La justificación de este estimador está basada en la relación entre la función cdf y la función de riesgo (con valores discretos del tiempo), que se describe con mayor amplitud en el Capítulo 3 de Meeker y Escobar (1998). Los cálculos de las probabilidades acumuladas de fallo estimadas, $F(t_i)$, y de las probabilidades de supervivencia estimadas, $S(t_i)$, para 12.200 km para los datos de los amortiguadores están dados en la Tabla 48.1. Esta tabla se habría podido dar hasta 27.490 km, que es el tiempo de fallo mayor.

La Figura 48.11 muestra los datos de fallo de los amortiguadores dibujados en papel probabilístico de Weibull, con los puntos dibujados en cada uno de los tiempos de fallo a la altura media entre los saltos de la estimación no paramétrica de la función cdf estimada en la Tabla 48.1 (ampliada a los 27.490 km). La Figura 48.11, como la Figura 48.8, también muestra estimación ML de la función cdf de Weibull y el conjunto de los intervalos de confianza puntuales para $F(t)$ al 95 por ciento. El gráfico muestra que la distribución de Weibull se ajusta bien a los datos. Un gráfico similar en papel probabilístico normal (no representado aquí) no ajusta tan bien. Si bien los puntos dibujados representan una estimación no paramétrica que *no* está basada en ninguna distribución asumida, la línea recta dibujada a través de los puntos representados en el papel probabilístico de Weibull, por el método ML, a mano alzada, o por cualquier otro método, es una estimación paramétrica que, a diferencia de la estimación no paramétrica, permite la extrapolación en el tiempo. La extrapolación fuera del rango de los datos es, sin embargo, peligrosa, pues el modelo de distribución asumido, si bien da un ajuste razonable cerca del centro de los datos, puede que no se pueda aplicar más allá de los extremos.

El Capítulo 4 de Nelson (1982) describe la gráfica de la función de riesgo, un método alternativo gráfico de estimación no paramétrica de datos múltiples censurados. Los dos métodos son muy similares y generalmente proporcionan estimaciones similares.

MODELOS ACELERADOS DE TESTS DE VIDA Y DE ANÁLISIS DE DATOS

La estimación de la distribución de los tiempos de fallo, o funcionamiento durante largo plazo, de componentes de productos de *alta fiabilidad* es particularmente difícil. Muchos productos

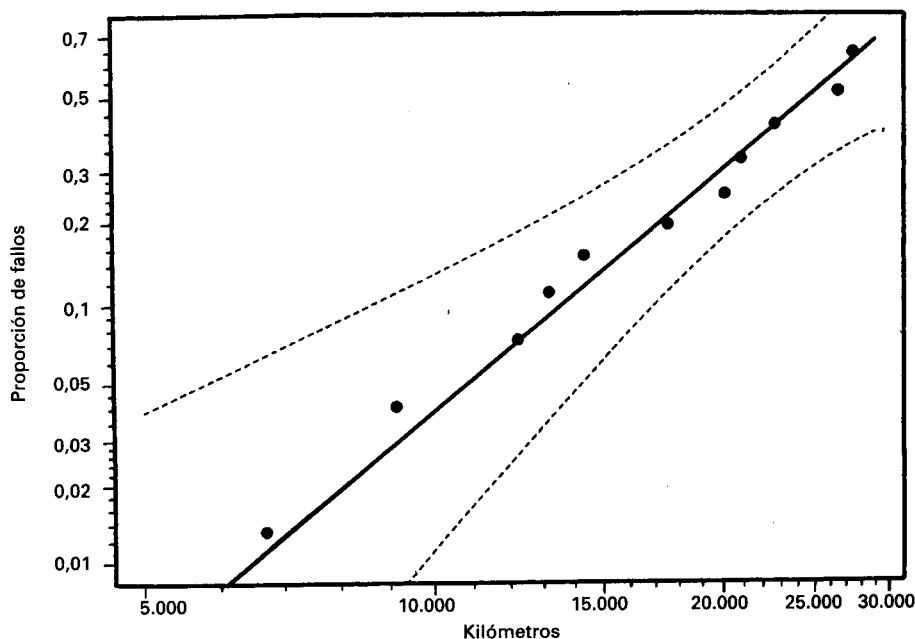


FIGURA 48.11 Representación de tiempos de fallos de amortiguadores en papel probabilístico de Weibull, con estimación por máxima verosimilitud e intervalos de confianza aproximados al 95% de $F(t)$.

modernos están diseñados para trabajar sin fallo durante años, décadas o incluso más tiempo. Por tanto, debemos esperar que fallen pocas unidades en un test de duración razonable en condiciones normales de uso. Por ejemplo, en el diseño y construcción de un nuevo satélite de comunicaciones o de un nuevo electrodoméstico, sólo se puede permitir 8 meses para chequear sus componentes, que se espera estarán en servicio durante 15 o 20 años. Para tales aplicaciones, los tests acelerados de vida (ALT) se utilizan ampliamente, particularmente para obtener tiempos de información de fiabilidad de componentes simples del producto, materiales y para suministrar una pronta identificación (y supresión) de modos de fallo, mejorando así la fiabilidad. Hay dificultades prácticas y problemas estadísticos involucrados con los tests de aceleración de vida, especialmente para productos complicados que puedan fallar de diferentes formas. Aquí se describen tests acelerados de vida para componentes, materiales o productos con un modo de fallo único. Extensiones de estos métodos se describen en el Capítulo 7 de Nelson (1990). Como se sugirió previamente, el análisis de datos de vida con varios modos de fallo independientes, con frecuencia considera un modo de fallo cada vez, tratando los fallos producidos por otros modos como si no hubiesen sido fallos, para posteriormente combinar los resultados.

Con frecuencia, la información de tests aplicados a elevados niveles de estrés (por ejemplo, velocidad, temperatura, voltaje o presión) se extrapola, a través de un modelo estadístico físicamente razonable, para obtener estimaciones de vida o funcionamiento en largos períodos de tiempo a niveles de estrés normales. En algunos casos, el estrés se incrementa o se cambia durante el curso de un test (estrés a pasos y estrés progresivo ALT). Los resultados ALT se utilizan en el proceso de diseño de fiabilidad para evaluar o demostrar la fiabilidad de un componente o

subsistema, certificar componentes, detectar modos de fallo, comparar diferentes productores, y todo esto *tan rápidamente* como sea posible. ALT han crecido en importancia por la rapidez en el cambio de las tecnologías, la utilización de productos más complicados con más componentes, las presiones para la introducción rápida de nuevos productos y las altas expectativas de los clientes de mejor fiabilidad (en vez del tradicional enfoque «enviar y arreglar más tarde»).

Métodos de aceleración. Hay tres métodos diferentes de acelerar la fiabilidad de un test:

- Incrementar el porcentaje de utilización. Una tostadora está diseñada para una vida media de 20 años con una proporción de utilización de dos veces cada día. Si en lugar de eso, la hacemos trabajar 365 veces cada día, reduciremos la vida media de la tostadora (para muchos modos potenciales de fallo) alrededor de 40 días. También, y dado que no es necesario que fallen todas las unidades en un test de vida, se puede obtener información de fiabilidad en unos días en vez de en unos meses. Esta forma de aceleración es sencilla de manejar, ya que los métodos para una distribución simple pueden, generalmente, ser aplicados directamente (después de hacer las apropiadas transformaciones de tiempo). Por tanto, esta situación no se discutirá más. El asunto clave es que el incremento de la proporción de uso no introduzca nuevos modos de fallo o cambie la proporción de daño por ciclo para los modos de fallo existentes (por ejemplo, debido al sobrecalentamiento de los componentes en el ciclo).
- Incrementar la edad del producto. Por ejemplo, el incremento de la temperatura o humedad puede acelerar el proceso químico de ciertos modos de fallo, como la degradación química (produciendo finalmente debilitamiento) de una junta mecanizada o el aumento de un filamento conductor a través de un aislante (causando finalmente un cortocircuito).
- Aumentar el nivel de estrés (por ejemplo, voltaje o presión) bajo el que operan las unidades del test. Una unidad fallará cuando su resistencia queda por debajo del estrés aplicado. Por tanto, una unidad con resistencia degradada por un nivel de estrés alto fallará generalmente más rápidamente de lo que hubiese fallado a un nivel de estrés más bajo.

Se pueden utilizar combinaciones de estos métodos de aceleración. Un factor como el voltaje podrá, en algunos modos de fallos, incrementar la proporción de reacción electroquímica (acelerando así la edad) e incrementar el estrés respecto a la resistencia. En tales situaciones, cuando el efecto del estrés es complicado, puede no haber conocimientos suficientes para proporcionar un adecuado modelo físico de la aceleración. Los modelos empíricos pueden o no ser útiles. Véase el Capítulo 2 de Nelson (1990) o el Capítulo 18 de Meeker y Escobar (1998) para una discusión más amplia.

Modelos de aceleración. Los tests de aceleración de vida, salvo los que incrementan la proporción de utilización, requieren un modelo físicamente razonable que relacione variables como temperatura, voltaje, presión y la escala del tiempo de fallo. Entonces se ajusta el modelo a los datos para describir el efecto que cada factor tiene en el fallo.

Modelos físicos de aceleración. Para una buena comprensión de los modos de fallo, puede ser posible utilizar un modelo basado en una teoría física o química capaz no sólo de describir la causa del fallo en el proceso en el intervalo de los datos, sino también permitir la extrapolación de las condiciones de utilización basándose en el test acelerado. Normalmente, la relación real entre las variables de aceleración y los verdaderos mecanismos de fallo es extremadamente complicada. Sin embargo, con frecuencia es posible encontrar una simplificación física que capture y describa adecuadamente los aspectos dominantes del proceso. Por ejemplo, el fallo puede ser debido a un mecanismo complicado con muchas etapas, pero puede haber una etapa dominante o limitante, y una buena comprensión de esta parte del proceso puede suministrar un modelo adecuado para la extrapolación. Ejemplos se pueden ver en Meeker y LuValle (1995) y en el Capítulo 2 de Nelson (1990).

Modelos empíricos de aceleración. Cuando hay poca comprensión del proceso químico o físico que conduce a un fallo, puede resultar imposible desarrollar un modelo basado en las teorías físicas y químicas. Un modelo empírico puede ser la alternativa. Sin embargo, este modelo puede suministrar un excelente ajuste de los datos disponibles, pero puede ser altamente incorrecto cuando se extrapola a otras condiciones de uso que pueden tener interés real. En algunas situaciones puede haber una gran experiencia con un modelo empírico, lo que puede suministrar la base necesaria para la extrapolación a las condiciones de uso.

Algunas líneas fundamentales para la utilización de modelos de aceleración incluyen:

- Utilización de tanta teoría física como sea posible, y elección de las variables de aceleración (es decir, temperatura, voltaje o humedad) que correspondan a los factores que causan los fallos realmente.
- Investigar los intentos anteriores de acelerar similares modos de fallo a los que actualmente tienen interés. Hay, por ejemplo, muchos artículos de investigación e informes sobre física de fallos. Ejemplos y referencias se encuentran en el Capítulo 2 de Nelson (1990) o en el Capítulo 18 de Meeker y Escobar (1998).
- Diseños de tests de aceleración para minimizar, tanto como sea posible, el grado de extrapolación requerido [véanse Meeker y Hahn (1985), el Capítulo 6 de Nelson (1990) y el Capítulo 20 de Meeker y Escobar (1998)]. Los tests altamente acelerados pueden ocasionar modos de fallo que no ocurren en las condiciones de uso. Si esos fallos extraños no son reconocidos, pueden llevar a graves conclusiones incorrectas. Nótese que los datos de vida de un producto pueden ser analizados, utilizando métodos de máxima verosimilitud, incluso aunque en las condiciones de algún test la mayoría, o incluso todas, las unidades del test no hayan fallado. Esto nos llevaría a ser mucho más conservadores en el establecimiento de las condiciones del test de lo que lo seríamos en otro caso (es decir, incluyendo tests en las condiciones de uso o en condiciones cercanas a dichas condiciones de uso). Véanse Meeker y Hahn (1985) o Nelson (1990) para más detalles.
- Muchos tests acelerados se utilizan para obtener información sobre modos de fallos simples o relativamente simples. Si hay más de un modo de fallo, es probable que los diferentes modos de fallo se aceleren en distintas proporciones, y a menos que esto sea considerado en el modelo, en las pruebas y en el análisis, las inferencias resultantes pueden ser seriamente incorrectas.
- En la práctica, las relaciones de la aceleración son difíciles de verificar en su totalidad. Los datos del test de vida acelerada deben ser utilizados para buscar desviaciones respecto al modelo de aceleración asumido. Es importante reconocer, sin embargo, que los datos disponibles sólo tienen potencia para detectar grandes desviaciones, y típicamente no hay diagnóstico útil para detectar desviaciones cerca de las condiciones de uso.
- Los modelos simples con distribución de forma correcta han probado ser generalmente más útiles para la extrapolación que los modelos elaborados dependientes de varios parámetros. Por ejemplo, incluso si hay evidencia de curvatura en datos ALT, un simple modelo lineal relacionando la variable de estrés acelerada con el tiempo de fallo suministra generalmente más exactitud en la extrapolación que el modelo cuadrático.
- Análisis sensitivos deben ser hechos para evaluar el efecto de la perturbación de ciertos inputs inciertos (es decir, inputs relacionados con las hipótesis del modelo). Por ejemplo, es útil comparar las extrapolaciones con la utilización de diferentes distribuciones de tiempo de fallo, o diferentes razonables modelos físicos relacionando el estrés con la vida.
- Incluir algunas unidades del test en condiciones en las que no deben esperarse fallos durante la duración del test (por ejemplo, en o cerca de las condiciones de uso). Si, en efecto, se producen fallos, anotar esas condiciones, pues aparecerán serios problemas con la fiabilidad (y sugiere que el modelo asumido es inadecuado).

- Los programas de test de vida acelerados deben ser planeados y ejecutados por equipos con individuos con conocimientos respecto al producto, a sus condiciones de utilización, a los aspectos físicos/químicos/mecánicos del modo de fallo, y a los aspectos estadísticos del diseño y análisis de la fiabilidad de experimentos.

La subsección siguiente describe un modelo sencillo de aceleración con temperatura e ilustra el análisis de datos con ALT.

Elevación de la temperatura. Se ha dicho que la alta temperatura es el enemigo de la fiabilidad. Incrementar la temperatura es uno de los métodos más comunes para acelerar los fallos. La fórmula de Arrhenius es un modelo bien conocido de describir el efecto que la temperatura tiene en R , la proporción de una simple reacción química. La razón de reacción para este modelo se puede escribir como

$$R(\text{temp}) = \gamma_0 \exp\left(\frac{-E_a}{k_B \times \text{temp K}}\right) = \gamma_0 \exp\left(\frac{-E_a \times 11.605}{\text{temp K}}\right)$$

donde $\text{temp K} = \text{temp } ^\circ\text{C} + 273,15$ es la temperatura en la escala absoluta Kelvin, $k_B = 1/11.605$ es la constante de Boltzmann en unidades de electrón voltio por grado Celsius y E_a es la energía de activación de la reacción en electrón voltios. Los parámetros E_a y γ_0 son generalmente características desconocidas del producto o material. En algunas situaciones simples, la causa del fallo del proceso se puede modelar adecuadamente por una simple reacción química. En tales casos, si $\log(T)$ sigue una distribución con unos parámetros de localización y de escala iguales a μ y σ (de manera que el tiempo de fallo T se puede describir por una distribución lognormal o por una distribución de Weibull), entonces la distribución de la vida se puede escribir en función de la temperatura:

$$\Pr(T \leq t; \text{temp}) = \Phi\left[\frac{\log(t) - \mu(\text{temp})}{\sigma}\right]$$

donde $\Phi = \Phi_{\text{nor}}$ y $\Phi = \Phi_{\text{sev}}$ (véase la discusión anterior) para las distribuciones lognormal y Weibull, respectivamente, $\mu(\text{temp}) = \beta_0 + \beta_1 x$, $x = 11.605/(\text{temp K})$ y $\beta_1 = E_a$. Esto es conocido como el modelo de tiempo de fallo de Arrhenius. Se deberían utilizar varias temperaturas aceleradas y los tiempos de fallo resultantes observados para estimar β_0 , β_1 y σ .

Si bien el modelo de Arrhenius no se aplica a todos los problemas de temperatura-aceleración y es adecuado sólo para un limitado rango de temperaturas (dependiendo de la aplicación particular), se le utiliza ampliamente en muchas áreas de aplicación. Nelson (1990, p. 76) comenta que «...en ciertas aplicaciones (por ejemplo, aislamiento de un motor), si la relación de Arrhenius no se ajusta a los datos, los datos son sospechosos más que la relación».

Similares relaciones de regresión vida-estrés han sido utilizadas para otras variables aceleradas, como el voltaje, presión, humedad, proporción de ciclos y tamaño de muestra. Véanse el Capítulo 2 de Nelson (1990) y el Capítulo 18 de Meeker y Escobar (1998) para ejemplos y otras referencias.

Planificación de un ALT. Normalmente, los tests de vida acelerada deben ser hechos dentro de rigurosos costes y restricciones de tiempo. Es esencial una planificación cuidadosa. Los recursos se deben utilizar eficientemente y el grado de extrapolación minimizado lo más posible. En Meeker y Hahn (1985), en el Capítulo 6 de Nelson (1990) y en el Capítulo 20 de Meeker y Escobar (1998) se describen métodos para una planificación estadística eficiente de los ALT que tenga en cuenta las restricciones prácticas. Durante la fase de estudio de planificación del test, los experimentadores deben tratar de explorar la bondad de los resultados que ellos pueden obtener como función del modelo asumido y del plan de test propuesto. Los métodos de simulación, tales como los descritos en las directrices para elegir el tamaño de muestra, también proporcionan útiles aspectos internos del proceso.

TABLA 48.2 Intervalos de fallo o tiempos censurados y temperaturas de test para un experimento ALT en un instrumento con un circuito integrado de nueva tecnología

Temperatura °C	Número de instrumentos	Horas		Estado
		Inferior	Superior	
150	50		1.536	Censurado
175	50		1.536	Censurado
200	50		96	Censurado
250	1	384	788	Fallado
250	3	788	1.536	Fallado
250	5	1.536	2.304	Fallado
250	41		2.304	Censurado
300	4	192	384	Fallado
300	27	384	788	Fallado
300	16	788	1.536	Fallado
300	3		1.536	Censurado

Estrategia para analizar datos ALT. Esta subsección perfila un procedimiento útil para analizar datos ALT cuando se chequean múltiples unidades en tres o más condiciones (por ejemplo, tres o más temperaturas). Véase, por ejemplo, los datos de la Tabla 48.2.

La idea básica es comenzar analizando los datos en cada condición separadamente, y entonces ajustar un modelo que vincula juntos a los datos de las diferentes condiciones. Brevemente, la estrategia, tal como se ilustra en el ejemplo, es:

1. Construir gráficos de probabilidad de los datos para cada condición del test (nivel de aceleración del factor) separadamente, para sugerir y explicar la adecuación de los posibles modelos de distribuciones.
2. En cada condición del test con dos o más fallos, ajustar modelos, como se sugiere en la primera etapa, individualmente a los datos utilizando el método ML. Representar las líneas ML en un gráfico de probabilidad múltiple para cada una de esas condiciones. Utilizar los puntos dibujados y las líneas ajustadas para evaluar que las hipótesis son razonables (como que la desviación estándar es constante en cada una de esas condiciones, por ejemplo, Figura 48.12).
3. Ajustar el modelo a las relaciones asumidas entre duración de vida y la variable acelerada. Dibujar el modelo ajustado en papel probabilístico, junto con un dibujo de los datos (por ejemplo, Figura 48.13).
4. Hacer el análisis de los residuos y otros tests de diagnósticos de las hipótesis del modelo (como en el análisis de regresión estándar). Véase el Capítulo 5 de Nelson (1990) (esto no se hace en el ejemplo que sigue).
5. Obtener las estimaciones deseadas y los intervalos de confianza, y evaluar su razonabilidad (por ejemplo, como en la Figura 48.14).

Para más ejemplos y discusiones de métodos de analizar datos ALT, véase Nelson (1990) o Meeker y Escobar (1998).

Ejemplo. La Tabla 48.2 da los resultados de un ALT en un instrumento con un circuito integrado (IC) de nueva tecnología. El proceso de inspección del instrumento se hace con un test de diagnóstico eléctrico hecho periódicamente para determinar si ha ocurrido o no fallo. Este test es caro, pues es manual y requiere mucho tiempo de una máquina especial. Por tanto, sólo se pueden hacer unas pocas inspecciones en cada instrumento. Un método común de planifi-

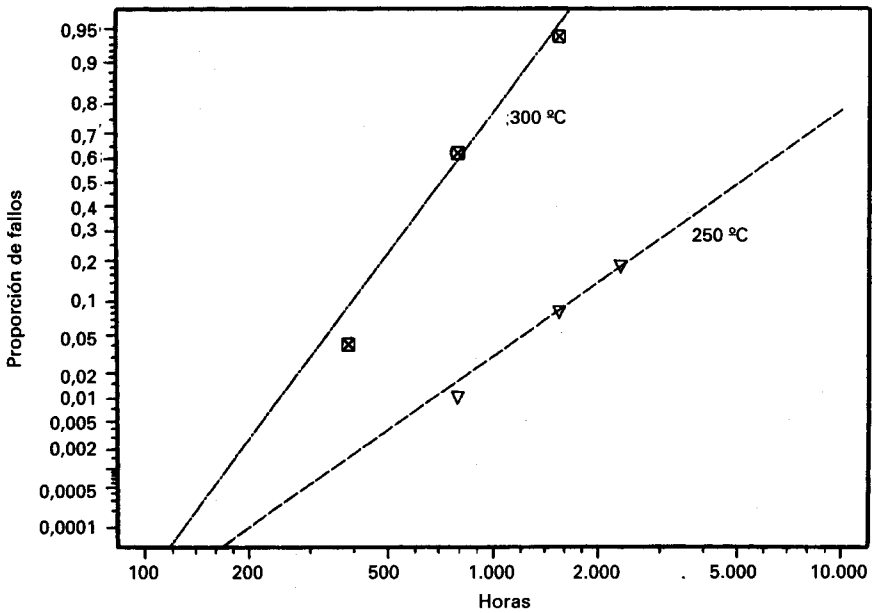


FIGURA 48.12 Representación en papel probabilístico lognormal y estimación por el método ML del cdf de fallos a 250 °C y a 300 °C en un experimento ALT de un instrumento con un circuito integrado de nueva tecnología.

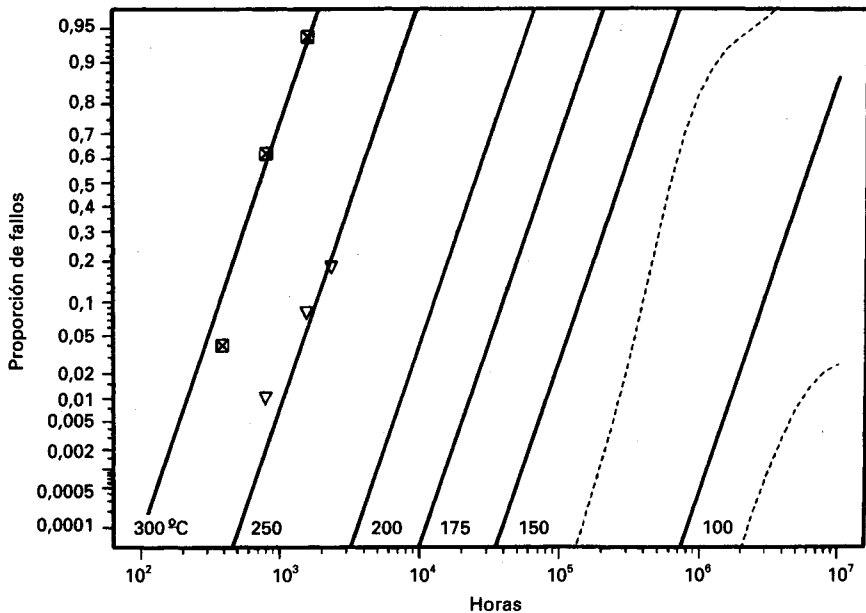


FIGURA 48.13 Representación en papel probabilístico lognormal mostrando el modelo de Arrhenius lognormal, estimando los resultados por el método ML, para un instrumento con un circuito integrado de nueva tecnología a las temperaturas del test y a 100 °C con un intervalo de confianza del 95 %.

car los tiempos de tales inspecciones es elegir un primer tiempo de inspección y luego determinar los tiempos de las posteriores inspecciones de manera que estén igualmente espaciadas en una escala logarítmica. En este caso la inspección fue un día después, con las subsiguientes inspecciones en los días 2, 4, y así sucesivamente (excepto un día en el que la persona que tenía que hacer la inspección tenía que irse pronto). Los tests se hicieron a 150, 175, 200, 250 y 300°C. Los fallos en los tests de vida se registran sólo en los tiempos de inspección y dan intervalos censurados (también llamados datos de «intervalo» o datos de «lectura de salida»). Cuando una unidad falla un test, todo lo que se sabe es que ha habido un fallo en el periodo de tiempo desde la inspección previa. Los intervalos de tiempo censurados requieren métodos estadísticos especiales que se describen en el Capítulo 9 de Nelson (1982), en el Capítulo 3 de Nelson (1990) y en los Capítulos 3, 7 y 19 de Meeker y Escobar (1998). La Tabla 48.2 da el intervalo en el que el fallo ha ocurrido para los instrumentos que han fallado. Igualmente, para los instrumentos que no han fallado, la Tabla 48.2 da los tiempos de la última inspección.

Durante el tiempo del análisis, los fallos se encontraron sólo en las dos temperaturas más altas. Después de que los primeros fallos fueron observados en 250 y 300°C, por lo que hubo alguna preocupación de que no se hubiesen observado fallos a 175°C antes del tiempo en que se debían de haber tomado las decisiones. Por tanto, el test de 200°C comenzó más tarde que los otros y sólo estuvo actuando durante un tiempo muy limitado del periodo de análisis.

Los investigadores estaban interesados en la estimación de la energía de activación del modo de fallo sospechado y en la fiabilidad de los componentes en un largo periodo de vida. En particular, deseaban estimar la proporción de instrumentos en la población del producto que fallaría en 100 horas de funcionamiento (alrededor de 11 años) con una condición de uso de 100°C.

La Figura 48.12 es la representación en papel probabilístico lognormal de la función cdf de los fallos a 250 y 300°C estimada por el método ML. La diferencia de pendientes en el gráfico sugiere la posibilidad de que el parámetro de forma sigma de la distribución lognormal cambie de 250 a 300°C. Tal cambio puede ser causado por un cambio en el modo de fallo. Modos de fallo con una energía de activación alta, que no pueden nunca ser vistos a bajos niveles de temperatura, pueden aparecer a niveles altos de temperatura (u otros factores de aceleración). Una aproximación con un intervalo de confianza al 95 por ciento de $\sigma_{250}/\sigma_{300}$ es [1,01, 3,53] (los cálculos no se muestran aquí), sugiere que la diferencia puede ser real. Estos resultados también sugieren que un detallado análisis de modos de fallo físicos debe hacerse al menos para algunas de las unidades que han fallado, y que quizás el test acelerado debe extenderse hasta que algunos fallos sean a bajos niveles de temperatura. Sin embargo, en los siguientes análisis, vamos a suponer que σ es constante a diferentes temperaturas.

La Tabla 48.3 da los resultados estimados por el método ML del modelo Arrhenius lognormal, con el intervalo de confianza, para el instrumento con circuito integrado (IC) de nueva tecnología, bajo el modelo asumido. La Figura 48.13 es un gráfico en papel probabilístico log-

TABLA 48.3 Resultados de la estimación lognormal por el método ML de valores individuales para un instrumento con un circuito integrado de nueva tecnología*

Parámetro	Estimación por el método ML	Error estándar	Aproximación por intervalos de confianza al 95%	
			Inferior	Superior
β_0	- 10,2	1,5	- 13,2	- 7,2
β_1	0,83	0,07	0,68	0,97
σ	0,52	0,06	0,42	0,64

* El logaritmo de la verosimilitud es $\mathcal{L} = -88,36$. Los intervalos de confianza se basan en el método normal de aproximación.

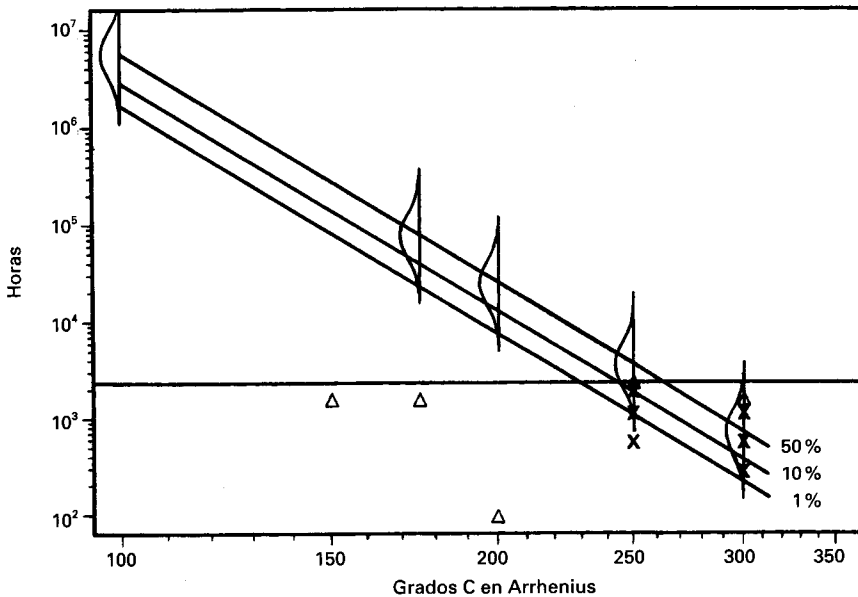


FIGURA 48.14 Gráfico de Arrhenius mostrando el modelo de Arrhenius lognormal, con estimación ML, para un instrumento con un circuito integrado de nueva tecnología. Los fallos y las observaciones de tiempos censuradas se indican por x y por Δ, respectivamente.

normal de los datos a 250°C y 300°C mostrando el modelo Arrhenius-lognormal de función cdf ajustada a los datos. Esta figura también muestra las estimaciones cdf lognormal del modelo ajustado a otras temperaturas test, así como la función estimada cdf, y una aproximación del intervalo de confianza al 95 por ciento en las condiciones de uso a los 100°C. Observemos que el límite superior del intervalo de confianza al 95 por ciento de la proporción de fallos por 100.000 horas a esta temperatura es inferior al 0,0001 (0,01 por ciento).

En la Figura 48.14 se da, en función del tiempo, el gráfico de Arrhenius del modelo lognormal ajustado a los datos ALT del instrumento con IC de nueva tecnología, mostrando los tiempos en los que se espera que fallen el 1, el 10 y el 50 por ciento de las unidades. Este gráfico muestra la bastante extrema extrapolación necesitada para hacer inferencias en las condiciones de uso de 100°C. Si las proyecciones están próximas a la realidad, parece improbable que haya fallos por debajo de los 200°C durante las 3.000 horas de nuestro test, y como se mencionó antes, esta fue la razón de probar unidades adicionales a 200°C.

CONCEPTOS DE FIABILIDAD DE SISTEMAS

La probabilidad de fallo de un sistema $F_T(t)$ es la probabilidad de que el sistema falle antes del tiempo t . La probabilidad de fallo de un sistema es una función del tiempo de operación t (u otra medida de uso), las condiciones de funcionamiento, la estructura del sistema, y la fiabilidad del sistema de componentes, interconexiones e interfases (incluyendo, por ejemplo, a los operadores humanos).



FIGURA 48.15 Un sistema con dos componentes en serie.

Esta subsección describe varios sistemas de estructuras simples. No todos los sistemas pertenecen a una de esas categorías, pero los ejemplos suministran construcción de bloques para ilustrar lo básico de la utilización de sistemas de estructuras para calcular la fiabilidad de un sistema. Los sistemas de estructuras complicados se pueden descomponer generalmente en colecciones de estructuras simples presentadas aquí. Por tanto, los métodos de evaluación de fiabilidad de sistemas se pueden adaptar a estructuras más complicadas. Para más información, véanse textos tales como O'Connor (1985), Høyland y Rausand (1994), o Meeker y Escobar (1998).

Terminología para fiabilidad de sistemas. Considérese el tiempo de fallo de un sistema (es decir, todas las componentes comenzando en el tiempo 0) con s componentes independientes. La función cdf para la componente i se denota por $F_i(t)$. La correspondiente fiabilidad (o probabilidad de supervivencia) es $S_i(t) = 1 - F_i(t)$. La cdf para el sistema se denota por F_T . Esta cdf está determinada por las F_i y por la estructura del sistema, es decir, $F_T(t) = g[F_1(t), \dots, F_s(t)]$. Para simplificar esta presentación, esta función se expresará por $F_T = g(F_1, \dots, F_s)$.

Sistemas con componentes en serie. Una estructura en serie con s componentes funciona si, y sólo si, todos los componentes funcionan. Ejemplos de sistemas con componentes en series incluyen cadenas, baterías multiceldas de alto voltaje, sistemas económicos de ordenadores, y los económicos árboles decorativos de luces con lámparas de bajo voltaje. Para un sistema con dos componentes independientes en serie (véase Figura 48.15), la cdf es

$$\begin{aligned} F_T(t) &= \Pr(T \leq t) = 1 - \Pr(T > t) = 1 - \Pr(T_1 > t \text{ y } T_2 > t) \\ &= 1 - [\Pr(T_1 > t) \Pr(T_2 > t)] = 1 - (1 - F_1)(1 - F_2) \end{aligned} \quad [48.3]$$

Para un sistema con s componentes independientes $F_T(t) = 1 - \prod_{i=1}^s (1 - F_i)$ y para un sistema con s componentes independientes, cada una de las cuales tiene la misma distribución de tiempos de fallo [por ejemplo, una batería con muchas células ($F = F_i$, $i = 1, \dots, s$)], $F_T(t) = 1 - (1 - F)^s$. La función de riesgo del sistema, para un sistema en serie con s componentes independientes, es la suma de las componentes de las funciones de riesgo:

$$h_T(t) = \sum_{i=1}^s h_i(t)$$

La Figura 48.16 muestra la relación entre la fiabilidad de un sistema $1 - F_T(t)$ y las componentes individuales de fiabilidad $1 - F_i(t)$ para sistemas con diferente número de componentes idénticas en serie. Esta figura muestra que se necesitan componentes de extrema alta fiabilidad para mantener alta fiabilidad en el sistema cuando tiene muchas componentes en serie. Si las componentes del sistema no son todas independientes, entonces la primera línea de [48.3] todavía da $F_T(t)$, pero la evaluación debe hacerse respecto a la distribución bidimensional de T_1 y T_2 , con una generalización similar para distribuciones multivariantes de más de dos componentes.

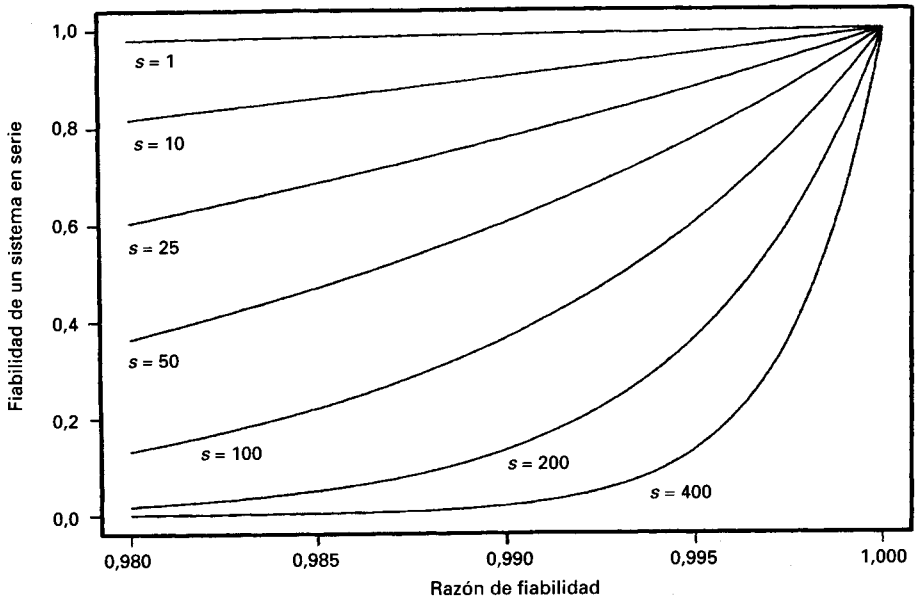


FIGURA 48.16 Fiabilidad de un sistema con s componentes independientes idénticas en serie.

Importancia del número de partes en el diseño de un producto. Una importante regla empírica en el diseño práctico de fiabilidad en ingeniería es «reducir al mínimo el número de partes», significando que se debe reducir el número de piezas individuales (o componentes en series) al mínimo». Además del costo de compra y de mantenimiento de piezas individuales adicionales, hay también una importante motivación de fiabilidad en tener un número pequeño de piezas en un producto. Por ejemplo, el diseño de un ordenador moderno de nueva tecnología utiliza un elevado nivel de integración microelectrónica y requiere sólo 20 partes discretas en lugar de las 40 partes requeridas en la generación anterior. Como un ejemplo específico, la función de riesgo del sistema $h_T(t)$ resulta particularmente sencilla si la función de riesgo constante (o equivalentemente, los tiempos de fallos siguen la distribución exponencial) proporciona un modelo adecuado para los tiempos de fallos de los sistemas componentes o piezas. En este caso, y como una aproximación inicial, asumiendo que los fallos son debidos a fallos de piezas y que las piezas tienen la misma función de riesgo, el nuevo diseño con 20 piezas tendrá sólo la mitad de fallos que el antiguo diseño. Reconociendo que los fallos pueden ocurrir en las interfases e interconexiones entre partes con la misma frecuencia en los diseños nuevo y viejo, esto aumentaría aún más la fiabilidad por ser mayor el número de interfases con un número mayor de piezas. Con funciones de riesgo no constantes (lo que es más común en la práctica) y piezas con diferentes funciones de azar, las ideas son similares.

En el ejemplo anterior de los ordenadores se asume, naturalmente, que la fiabilidad de las piezas en el nuevo sistema será la misma (o al menos similar) que la fiabilidad de las piezas individuales en el sistema antiguo, y que el estrés operativo en cada pieza es el mismo. Si el nuevo sistema utiliza piezas de un proceso productivo inmaduro con baja fiabilidad por pieza, o si se ha incrementado el estrés operativo en los componentes individuales, el nuevo sistema podría tener fiabilidad más baja.

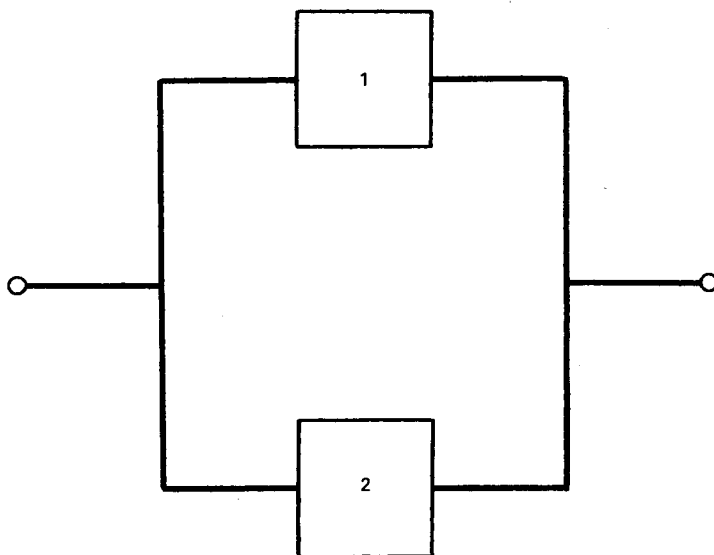


FIGURA 48.17 Un sistema con dos componentes en paralelo.

Sistemas con componentes en paralelo. La redundancia en paralelo se utiliza frecuentemente para mejorar la fiabilidad de enlaces débiles o partes críticas de grandes sistemas. Una estructura en paralelo con s componentes funciona si como mínimo uno de los componentes funciona. Ejemplos de sistemas con s componentes en paralelo son los faros de los automóviles, el procesador RAID matricial de un ordenador, las cajas de escaleras con luces de emergencia, retroproyectores con bombilla de repuesto y las múltiples luces en el margen de una clase. Para dos componentes independientes en paralelo, ilustrados en la Figura 48.17,

$$\begin{aligned} F_T(t) &= \Pr(T \leq t) = \Pr(T_1 \leq t \text{ y } T_2 \leq t) \\ &= \Pr(T_1 \leq t) \Pr(T_2 \leq t) = F_1 F_2 \end{aligned} \quad [48.4]$$

Para s componentes independientes $F_T(t) = \prod_{i=1}^s F_i$, y para s componentes independientes idénticamente distribuidas ($F_i = F$, $i = 1, \dots, s$), $F_T(t) = F^s$. La Figura 48.18 muestra las relaciones entre fiabilidad de un sistema $1 - F_T(t)$ y fiabilidad de los componentes individuales $1 - F(t)$ para diferente número de componentes independientes e idénticas en paralelo. La figura muestra la espectacular mejora en fiabilidad que la redundancia en paralelo proporciona. Si los componentes no son todos independientes, entonces tiene validez la primera línea de [48.4], pero la evaluación debe hacerse respecto a la distribución bivalente de T_1 y T_2 . Una generalización similar se aplica para más de dos componentes no independientes.

SISTEMAS REPARABLES

Lo anterior ha tratado de fiabilidad de componentes no reparables (o instrumentos). Dado que un componente no reparable puede fallar una vez, los tiempos de fallo de una muestra de componentes no reparables consiste en los tiempos del primer fallo de cada componente. En muchos ejemplos de componentes no reparables, la hipótesis de independencia e igual distri-

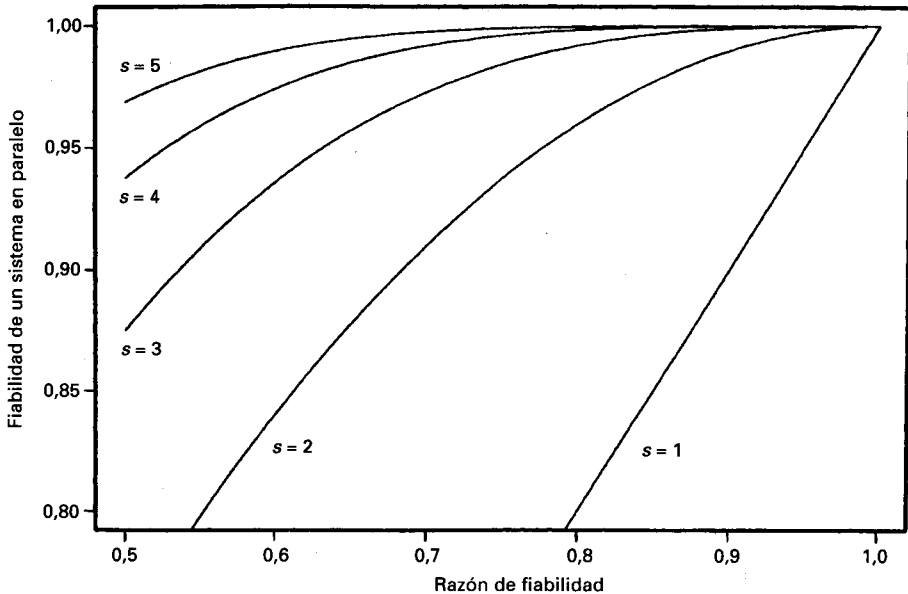


FIGURA 48.18 Fiabilidad de un sistema de s componentes independientes en paralelo con idéntica distribución de tiempos de fallo.

bución de los tiempos de fallo es razonable y se utilizan las distribuciones adecuadas de tiempo de vida (como la de Weibull o la lognormal) para describir la distribución de tiempos de fallo. En contraste, los datos de sistemas reparables consisten típicamente en muchos tiempos de reparación (o tiempos entre reparaciones) del mismo sistema, ya que un sistema reparable se vuelve a poner en servicio después de la reparación.

El propósito de muchos estudios de fiabilidad es describir las tendencias y modelos que siguen las reparaciones de fallos a lo largo de un tiempo para un *sistema en su conjunto* o para una colección de sistemas. Los datos consisten en una sucesión de tiempos de reparación del sistema en sistemas similares. Cuando una componente sencilla o subsistema en un sistema grande es reparado o reemplazado después del fallo, la distribución del tiempo hasta la próxima reparación del sistema dependerá del estado global del sistema en el instante anterior a la reparación y de la naturaleza de la reparación. Por tanto, los datos de los sistemas reparables, en muchas situaciones, deben ser descritos como modelos que deben tener en cuenta cambios en el estado del sistema a lo largo del tiempo o dependencias entre reparaciones a lo largo del tiempo.

Los datos de sistemas reparables deben verse como una sucesión de tiempos de reparación $T_1, T_2, \dots$. El modelo para tales datos se llama a veces un «proceso puntual». Algunas aplicaciones tienen datos reparados sólo en un sistema. En muchas aplicaciones hay datos de una colección de sistemas, típicamente controlados sobre un período de observación fijo (t_0, t_a), donde con frecuencia $t_0 = 0$. El período de observación difiere a menudo de un sistema a otro. En algunos casos se registran los tiempos exactos de reparación. En otros casos se informa a intervalos de tiempo del número de reparaciones.

A partir de datos reparados, típicamente, se desearía estimar:

- La distribución de los tiempos entre reparaciones, $\tau_j = T_j - T_{j-1}$ ($j = 1, 2, \dots$), donde $T_0 = 0$.
- El número de reparaciones en el intervalo $(0, t)$ en función de t .
- El número esperado de reparaciones en el intervalo $(0, t)$ en función de t .
- La razón de reemplazos en función del tiempo t .

TABLA 48.4 Edad de un motor Diesel y tiempo de sustitución de asientos de válvulas

Identificación del motor	Número de días observados	Edad del motor en días en las sustituciones	Identificación del motor	Número de días observados	Edad del motor en días en las sustituciones
251	761		403	593	
252	759		404	589	573
327	667	98	405	606	165 408 604
328	667	326 653 653	406	594	249
329	665		407	613	344 497
330	667	84	408	595	265 586
331	663	87	409	389	166 206 348
389	653	646	410	601	
390	653	92	411	601	410 581
391	651		412	611	
392	650	258 328 377 621	413	608	
393	648	61 539	414	587	
394	644	254 276 298 640	415	603	367
395	642	76 538	416	585	202 563 570
396	641	635	417	587	
397	649	349 404 561	418	578	
398	631		419	578	
399	596		420	586	
400	614	120 479	421	585	
401	582	323 449	422	582	
402	589	139 139			

Fuente: Nelson y Doganaksoy (1989).

Estas cuestiones llevan a los análisis del siguiente ejemplo.

Ejemplo: Tiempos de sustitución de asientos de válvulas en los motores Diesel. El siguiente ejemplo se utilizará para ilustrar los métodos. Los registros de reparación para una flota de 41 motores Diesel se guardaron a lo largo del tiempo. La Tabla 48.4 da los tiempos de reemplazos (en número de días de servicio) de los asientos de válvulas de los motores. Esto es un ejemplo de datos en un grupo de sistemas. Los datos fueron dados originalmente en Nelson y Doganaksoy (1989) y también aparecen en Nelson (1995). Las preguntas a responder a partir de esos datos (no discutidas todas aquí) incluyen:

- ¿Cuántas sustituciones puede esperar el propietario de la flota, en promedio, durante el primer año de funcionamiento?
- El porcentaje de sustitución, ¿crece o decrece con la edad del motor Diesel y en qué proporción?
- ¿Cuántos reemplazos de válvulas se necesitarán en los próximos dos años para esta flota?
- El número de veces que se reemplaza una válvula, ¿se puede modelar como un proceso de renovación (para que el posterior análisis y predicción se pueda hacer con métodos simples para observaciones independientes)?

La representación de los datos es un buen punto de partida para el análisis del sistema de datos de reparaciones. La Figura 48.19 es una representación de eventos de los datos de reparación del asiento de válvula, mostrando el período de observación y los tiempos de sustitución. Obsérvese que la longitud del período de observación difiere de motor a motor.

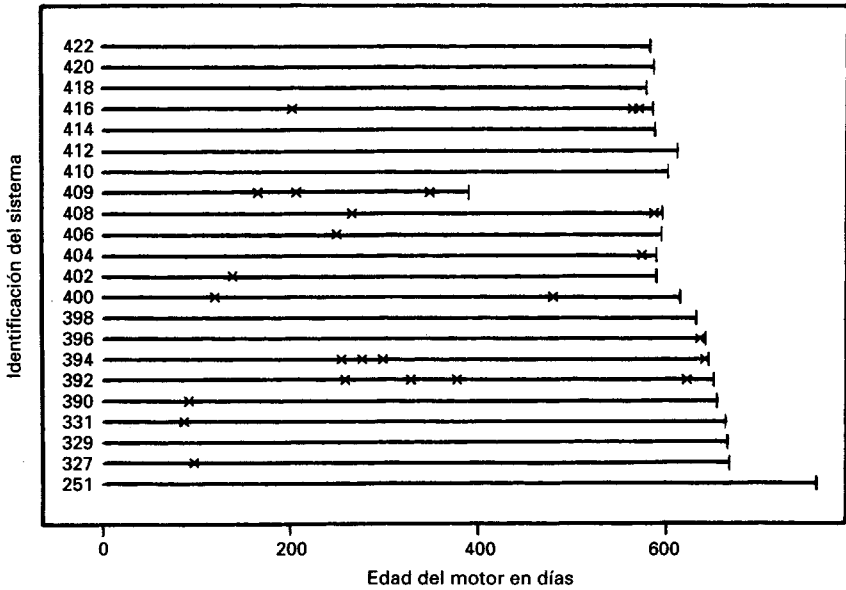


FIGURA 48.19 Gráfico eventos de la sustitución de asientos de válvulas de un subconjunto de 22 de 43 motores Diesel.

Las evaluaciones iniciales de los datos sugieren diferencias en la vulnerabilidad de la reparación entre diferentes motores. Esto es un objeto diferente de estudio, y va a ser ignorado en las siguientes evaluaciones.

Modelos no paramétricos para procesar datos. Para datos de un único sistema, el número acumulado de reparaciones hasta el tiempo t se denota por $N(t)$. El modelo correspondiente, utilizado para describir una población de sistemas de una misma población, está basado en la función acumulada media (MCF) en el tiempo t . La función MCF se define como la media o el número esperado de reparaciones por sistema hasta el tiempo t , es decir, $\mu(t) = E[N(t)]$, donde la esperanza es sobre la totalidad de sistemas. Suponiendo que $\mu(t)$ es diferenciable,

$$v(t) = \frac{dE[N(t)]}{dt} = \frac{d\mu(t)}{dt}$$

define la razón de repetición de reparaciones por sistema para la población de sistemas. Esto puede interpretarse como una razón *media* de ocurrencia de reparaciones para sistemas individuales.

Si bien los datos de número de reparaciones (u otros específicos eventos relacionados con la fiabilidad) se encuentran frecuentemente, los métodos dados aquí se pueden utilizar para modelar otras cantidades acumuladas con el tiempo, incluyendo variables continuas, como el costo. Entonces, por ejemplo, si $C(t)$ es el costo acumulado de reparaciones de un sistema hasta el tiempo t , entonces $\mu(t) = E[C(t)]$ es la media acumulada de costo por sistema en el intervalo $(0, t)$.

Estimación no paramétrica del MCF. Dados $n \geq 1$ sistemas reparables, puede utilizarse el siguiente método para estimar el MCF. El modelo es no paramétrico, en el sentido de que no

requiere especificación del modelo paramétrico del proceso de tiempos de reparación. El método asume que la muestra está tomada aleatoriamente de una población de funciones MCF. También se asume que el tiempo en el que detenemos la observación del sistema no depende del proceso. De este modo, es importante que el tiempo en el que una unidad es censurada no esté sistemáticamente relacionada con ningún factor relacionado con la distribución del tiempo de reparación. Los estimadores resultarán sesgados si, por ejemplo, las unidades siguen una entrada escalonada en servicio (es decir, se pone en servicio una unidad cada mes) y si ha habido un cambio de diseño que ha incrementado la probabilidad de reparación de los sistemas más recientes puestos en funcionamiento. Entonces los nuevos sistemas tienen una vida con más estrés y fallarán más pronto, causando una tendencia demasiado optimista sobre el tiempo en la relación estimada de repetición $v(t)$. En tales casos, los datos de diferentes periodos de producción deben ser analizados separadamente o el cambio en la razón de repetición debe ser modelado como una función de la edad del sistema y de la fecha.

Sea $N_i(t)$ el número acumulado de reparaciones del sistema i hasta el tiempo t , y sea t_{ij} , $j = 1, \dots, m_i$, los tiempos de fallo (o reparación, u otro evento) para el sistema i . Un estimador simple de la función MCF en el tiempo t sería la media aritmética de los valores $N_i(t)$ para los sistemas en funcionamiento en el tiempo t . Por tanto, este método se puede utilizar en el ejemplo de los motores Diesel hasta $t = 389$ días, o hasta 578 días si ignoramos el dato del motor 409. Un estimador más apropiado, aplicable en censura múltiple y que nos suministra un estimador insesgado de MCF, es descrito en Nelson (1988), Nelson (1995), Lawless y Nadeau (1995) y Meeker y Escobar (1998). Una representación del MCF estimado frente al tiempo indica si la fiabilidad del sistema crece, decrece o no cambia en el tiempo.

Estimación del MCF para sustitución de asientos de válvulas. La Figura 48.20 muestra la estimación de MCF para los asientos de válvulas como una función de la edad en días. La estimación crece rápidamente después de 650 días, pero está basada en un pequeño número (sólo 10) de sistemas que tienen un período operativo total que excede los 650 días. La incertidumbre en la estimación para tiempos mayores se refleja en la anchura del intervalo de confianza [el cálculo de la estimación más allá de los 389 días y de los límites de confianza se explica en Nelson (1995) y en el Capítulo 16 de Meeker y Escobar (1998)].

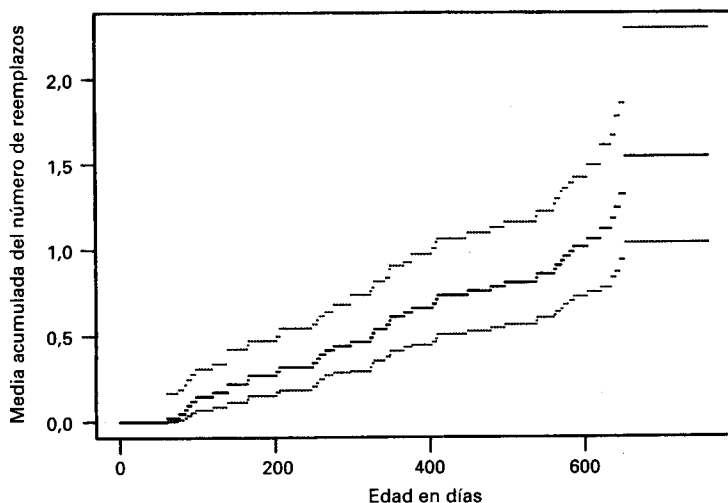


FIGURA 48.20 Estimación del número medio acumulado de asientos de válvulas reparados de motores Diesel, con un intervalo de confianza del 95%.

Comparación no paramétrica de dos muestras de datos de reparaciones. Con frecuencia, las decisiones deben hacerse sobre la base de una comparación entre dos fabricantes, o dos diseños de producto, o dos condiciones de trabajo, etc. Doganaksoy y Nelson (1998) dan métodos para comparar muestras de dos grupos de sistemas diferentes.

OTROS TÓPICOS EN FIABILIDAD

Fuentes de datos e información de fiabilidad. La información de fiabilidad de componentes y subsistemas se necesita como un input para los modelos de fiabilidad. Tal información proviene de diferentes fuentes. Por ejemplo:

- Los tests de laboratorios se utilizan ampliamente, especialmente para probar nuevos materiales y componentes, cuando hay poca experiencia anterior. Tales tests son generalmente costosos y pueden tener una aplicación muy limitada en el estudio de la fiabilidad del producto, pero pueden proporcionar avisos inmediatos sobre problemas de fiabilidad. Se debe tener cuidado en asegurar que los modos de fallo relevantes se han obtenido y que, si la finalidad es la predicción de fiabilidad, las condiciones del test se pueden relacionar con exactitud con las condiciones reales de trabajo. Como se describió antes en este capítulo, los tests de laboratorio con frecuencia se aceleran, con la finalidad de obtener con más rapidez información de fiabilidad.
- Cuando estén disponibles, recoger cuidadosamente datos de campo puede proporcionar la información más exacta sobre cómo se comportan los componentes y sistemas en el campo (condiciones de trabajo). Es importante, sin embargo, asegurar que los datos de campo son consistentes y que se han registrado sin ambigüedad para permitir rápidamente un análisis sencillo. Los datos de reparaciones por garantía con frecuencia no contienen información de unidades que no fallan y pueden estar sesgados, por ejemplo, dado que las unidades en las condiciones más duras tienden a fallar pronto. También, los datos de campo vienen generalmente demasiado tarde para ayudar a evitar problemas de fiabilidad.
- Los manuales de fiabilidad y los bancos de datos pueden ser útiles [por ejemplo, Klinger, Nakada y Menéndez (1990) y MIL-HDBK 217F (1991)]. Una queja común respecto a los manuales, sin embargo, es que los datos se quedan obsoletos en cuanto son publicados, o poco después.
- Se utiliza el conocimiento de los expertos cuando no hay otra fuente de información disponible.

La cuantificación de la incertidumbre puede ser imposible, a menos que los datos se recojan con planes cuidadosos, dentro de estudios dirigidos, se actualicen y analicen, obteniendo estimaciones insesgadas.

FMEA y FMECA. Con frecuencia, los productos y sistemas tienen diseños complicados que son el resultado de los esfuerzos de varios equipos de diseño. La administración del sistema de fiabilidad requiere un proceso global para asegurar por adelantado que la fiabilidad del producto/sistema satisfará las exigencias de los clientes.

El análisis de modos de fallos y efectos (FMEA) es un método sistemático y estructurado para identificar modos de fallo de un sistema y evaluar los efectos o consecuencias de los modos de fallo identificados. El análisis de modos de fallos y análisis crítico de los efectos (FMECA) considera, adicionalmente, la importancia de los modos de fallo identificados respecto a la seguridad, éxito completo de la misión del sistema, u otros criterios. La finalidad del FMEA/FMECA es identificar y si se puede quitar posibles modos de fallo a un nivel específico de la arquitectura del sistema. Estos métodos se utilizan típicamente en los procesos de

revisión de los diseños de productos/sistemas. La utilización del FMEA/FMECA normalmente comienza en las primeras etapas de la conceptualización y diseño del producto/sistema. Luego el FMEA/FMECA evoluciona en el tiempo con los cambios en el diseño del producto/sistema y la acumulación de información sobre la actuación del producto/sistema en los tests de preproducción y con la experiencia de campo. FMEA/FMECA se utiliza durante la fase de diseño del producto/sistema para ayudar y guiar en las decisiones a tomar. También se utiliza en el desarrollo de las directrices para reparación de sistemas y conservación de procedimientos, para mejorar sistemas de seguridad y para proporcionar orientación para mejorar la fiabilidad.

Operativamente, FMEA/FMECA comienza definiendo la finalidad del análisis, especificado por el nivel del sistema al que se van a considerar los fallos. FMEA/FMECA se puede ejecutar a varios niveles en un producto o sistema. Se puede dar inicialmente para subsistemas individuales. Entonces se pueden integrar los resultados para dar un FMEA/FMECA para el sistema completo comprendiendo muchos subsistemas. Por ejemplo, un FMEA para estudiar la fiabilidad de un relé repetidor de telecomunicaciones puede considerar, como componentes básicos, cada instrumento discreto en un circuito electrónico [por ejemplo, circuitos integrados (IC), condensadores, resistencias, diodos]. En otro nivel, un FMEA para una gran red de telecomunicaciones puede considerar como componentes todos los nodos de la red y las interconexiones de los nodos (ignorando los detalles electrónicos dentro de cada nodo).

La siguiente etapa en el proceso FMEA/FMECA es la identificación de todos los componentes que pueden fallar durante la vida del producto. Esto es seguido por la identificación de todas las interfaces o conexiones que pueden fallar. En muchas aplicaciones, se consideran las condiciones de trabajo y los factores humanos relacionados en la definición de modos de fallo. Finalmente, se definen los efectos de los modos de fallo identificados. En la determinación de los efectos de modos de fallo y de combinaciones de modos de fallo se utiliza una detallada especificación de las relaciones entre las componentes del producto/sistema (estructura del sistema). Hojas especiales de trabajo y/o software informático se pueden utilizar para organizar toda la información.

MIL-STD-1629A (1980) y libros como Høyland y Rausand (1994) y Sundarajan (1991) explican con más detalle y suministran ejemplos para hacer un análisis FMEA/FMECA. Høyland y Rausand (1994) dan una lista de varios programas de ordenador destinados a facilitar estos análisis.

Árboles de fallos. El proceso FMEA/FMECA descrito arriba es a veces referido como un enfoque «de abajo hacia arriba» del modelo de fiabilidad. El análisis de árboles de fallos, por otra parte, cuantifica el sistema de fallos utilizando un método «de arriba hacia abajo». Primeramente, se definen uno o más «eventos de arriba» críticos (tales como pérdida de funcionalidad del sistema). Entonces, de una forma sistemática, se delimitan la combinación (o combinaciones) de condiciones requeridas para que ocurra ese evento. Generalmente, esto se hace identificando cómo los fallos relacionados con eventos al nivel más alto son causados por «eventos primarios» de nivel más bajo (por ejemplo, fallo de un componente individual) y «eventos intermediarios» (por ejemplo, fallo de un subsistema). La información de un análisis FMEA se puede utilizar como input en esta etapa. La información se organiza en la forma de un «diagrama de árbol de fallos» con el evento de arriba en la parte de arriba del diagrama. Los eventos en diferentes niveles del árbol se conectan por enlaces lógicos definidos por la lógica booleana (es decir, Y, O, O exclusivo).

Un árbol completo de fallos se puede utilizar para modelar la probabilidad de los eventos de un sistema crítico. Este análisis requiere como inputs adicionales las probabilidades o probabilidades condicionales de los eventos primarios. Con esta información y la especificación detallada de la estructura del sistema proporcionada por el árbol de fallos, es posible calcular probabilidades de los eventos críticos. Para ejemplos, véanse O'Connor (1985), Sundararajan (1991), Høyland y Rausand (1994), o Lewis (1996).

Los diagramas de árboles de fallos son, en un sentido, similares a los diagramas de bloques de fiabilidad, presentados antes en esta subsección. Generalmente es posible pasar de uno a otro. El análisis de árboles de fallos, sin embargo, difiere en su enfoque básico del sistema de fiabilidad. Los diagramas de bloques de fiabilidad están estructurados alrededor del evento de que el sistema *no* falla. El análisis de árboles de fallos se centra en los eventos críticos de arriba, como la pérdida de funcionalidad del sistema y otros eventos críticos de seguridad. El árbol muestra directamente las causas raíz de estos eventos de arriba, y otros eventos que contribuyen, en todos los niveles dentro del radio de acción del análisis. La estructura y lógica del propio árbol de fallos proporciona no sólo el mecanismo para la evaluación cuantitativa de la fiabilidad, sino que también ilumina posibles enfoques de mejora de la fiabilidad.

Diseño de experimentos para aumentar la fiabilidad. Los diseños de experimentos son una importante herramienta para la mejora de la fiabilidad. Con diferentes clases de experimentos, podemos obtener información para evaluar y mejorar la fiabilidad. Éstos incluyen tests de vida y tests de vida acelerados, como los descritos anteriormente en este capítulo, para evaluar la distribución de tiempos de vida de materiales y componentes, para los que hay uno o un pequeño número de modos de fallo identificables. Información de tales tests se utiliza para hacer modificaciones de diseño de las que resultará una fiabilidad aceptable (o mejor) para los componentes sometidos a los tests.

A otro nivel se pueden hacer experimentos para definir configuraciones del sistema o factores operativos para aumentar la fiabilidad haciendo los componentes más robustos a la variación de las condiciones de producción o a las condiciones operativas o medioambientales que se pueden encontrar durante su funcionamiento. Generalmente, tales experimentos se centran en un modo de fallo único o en unos pocos modos de fallo para un único componente o subsistema. Los diseños de experimentos robustos multifactoriales (RDE) suministran métodos para la sistemática y eficiente mejora de la fiabilidad. Éstos se hacen frecuentemente en unidades prototipo y subsistemas y se centran en los modos de fallos donde intervienen interfases e interacciones entre componentes y subsistemas. Entre los muchos posibles factores que pueden tener influencia en el sistema de fiabilidad, el método RDE identifica empíricamente los importantes y encuentra valores de esos factores que suministran alta calidad y fiabilidad. Graves y Menten (1996) suministran una excelente descripción de las estrategias experimentales que pueden ser utilizadas para ayudar en el diseño de productos con alta fiabilidad. Byrne y Quinlan (1993) describen un experimento para diseñar un cable flexible de empuje que tenga larga vida bajo condiciones operativas variables. Tseng, Hamada y Chiao (1995) describen la utilización de experimentos factoriales para elegir variables de producción que alargasen la vida de las bombillas fluorescentes. Phadke (1989) describe un experimento para optimizar el funcionamiento, y por tanto la fiabilidad, de un subsistema de una máquina copiadora.

La necesidad del desarrollo rápido de nuevos productos de alta fiabilidad ha motivado el desarrollo de otros métodos de probar nuevos productos. El propósito de estos métodos de test es la rápida identificación y la pronta eliminación de problemas potenciales de fiabilidad (modos de fallo u otras debilidades) en la etapa de diseño de desarrollo del producto. Uno de tales métodos de test se conoce como el test STRIFE (*stress-life*). La idea básica del test STRIFE es aplicar estrés agresivo durante el test hecho a prototipos o a primeras unidades de producción (utilizando, por ejemplo, variaciones de temperatura, revoluciones o vibración) para forzar los fallos. Si bien puede ser útil a una o dos unidades, la selección de unidades apropiadas puede suministrar información adicional sobre la variación unidad a unidad. Bayley y Gilbert (1981) describen un ejemplo en el que un test STRIFE completo y un programa de mejora fue exitosamente completado en tres semanas. Kececioglu y Sun (1995) también describen un test STRIFE y presentan varios interesantes casos de estudio. Schinner (1996) suministra una descripción detallada de preproducción de «tests acelerados» que se pueden utilizar para descubrir o evaluar el impacto potencial de modos de fallo del producto.

Prueba de fiabilidad. La prueba de fiabilidad se utiliza para evaluar si la fiabilidad del producto cumple las especificaciones. La especificación de fiabilidad se establece con frecuencia dando la vida media o un percentil especificado de la distribución de vida de un producto. Por ejemplo, un comprador industrial de un componente puede exigir que el porcentaje de piezas falladas durante los primeros cinco años de servicio no debe exceder el 5 por ciento.

La prueba de la fiabilidad de un producto normalmente supone cierto tipo de test de vida. Las consideraciones básicas al planificar los tests de prueba de fiabilidad son similares a los de muestreo de aceptación (véase Capítulo 46), si bien aparecen algunos aspectos especiales que se indican más adelante. Un plan de test de prueba de fiabilidad especifica el número de unidades que deben colocarse en cada test, la duración del test y los criterios de pruebas sucesivas. Los planes de test de aceptación que hacen referencia a datos de atributos [como las MIL-STD-105E (1989) o el correspondiente modelo civil ANSI/ASQC (1993a) Z1.4] son aplicables a veces a las pruebas de fiabilidad cuando el resultado del test es o éxito o fallo, como en una demostración de fiabilidad de funcionamiento de un sistema. De forma similar, los planes estándar de test de aceptación de una distribución normal [MIL-STD-414 (1957) o el correspondiente civil ANSI/ASQC (1993b) Z1.9] pueden utilizarse para pruebas de fiabilidad cuando se prueban todas las unidades hasta que fallan, si las hipótesis del plan se satisfacen (por ejemplo, que los logaritmos de los tiempos de fallo se ajusten a una distribución normal). Sin embargo, se necesitan planes de tests especiales para pruebas de fiabilidad en situaciones en las que el test debe terminar antes de que fallen todas las unidades. Abernethy (1996) describe planes de pruebas para pequeñas muestras basados en la distribución de Weibull. Se necesitan planes de test especiales de fiabilidad para acomodar distribuciones de vida no normales (como la de Weibull) que son de amplio uso en análisis de fiabilidad.

Los planes de tests para pruebas de fiabilidad para un amplio rango de situaciones han sido documentados en varios manuales y publicaciones estándar, recogidos por el Departamento de Defensa de EE.UU., como el *Manual de control de calidad y fiabilidad H-108* (1960), que suministra planes de tests de número de fallos limitado (se detiene el test después de ocurrir un número determinado de fallos), tests de tiempo limitado (se predetermina la duración del test) y planes de tests secuenciales para la distribución exponencial. Planes de tests similares para la distribución de Weibull están contenidos en el *Manual TR 7* del Departamento de Defensa de EE.UU. (1965). Schilling (1982) proporciona una completa visión de conjunto de los planes de tests utilizados en las pruebas de fiabilidad.

Filtrado (inspección al 100 por ciento) y quemado (burn-in). Muchos productos, desde componentes electrónicos hasta sistemas electrónicos para automóviles, experimentan problemas de fiabilidad en la primera parte de su vida. Esos fallos de «mortalidad infantil» ocurren con frecuencia en una pequeña proporción de unidades con defectos de fabricación. Cuando todas o muchas de estas unidades con defectos han fallado, es típico que la proporción de fallos de la población alcance un bajo nivel hasta que comiencen a ocurrir los fallos de desgaste (véase la discusión anterior de la «curva bañera»). Para algunos productos (por ejemplo, ordenadores personales), la fase de envejecimiento de su vida está más allá de la vida técnica del producto. Sin embargo, en muchas aplicaciones a sistemas críticos o donde la reparación es imposible o muy cara (por ejemplo, sistemas de satélites, sistemas submarinos, o sistemas críticos de aviación), los fallos de mortalidad infantil representan un importante obstáculo en la obtención del nivel necesitado de fiabilidad.

Los productores, en sus programas de mejora de calidad y fiabilidad, se esfuerzan en eliminar o al menos reducir la proporción de fallos de mortalidad infantil. En tales aplicaciones, la inspección al 100 por ciento o las técnicas de quemado se utilizan con frecuencia para identificar y quitar componentes defectuosas o para quitar productos con defectos antes de que sean enviados a los clientes.

Los tests de quemado se pueden ver como un tipo de inspección al 100 por ciento o filtrado de la población del producto. Todas las unidades se prueban durante un periodo de tiempo

antes de su envío o instalación. Para acelerar el proceso, componentes tales como circuitos integrados se hacen funcionar a altos niveles de temperatura y/u otros tipos de estrés. La posibilidad de utilizar aceleración está mucho más limitada para sistemas y subsistemas [véanse Jensen y Petersen (1982) para un enfoque de ingeniería de este sujeto; véase también Nelson (1990, p. 43), para más información y referencias.

El filtrado o estrés ambiental (ESS = Environmental Stress Screening) fue desarrollado como un medio de acelerar el quemado de las unidades al nivel de sistema o subsistema (por ejemplo, un circuito integrado). ESS utiliza estrés suave, pero complicado, generado por combinaciones de variaciones de temperatura, vibraciones físicas, y quizá regímenes operativos estresantes (por ejemplo, hacer trabajar los chips de un ordenador a velocidad mayor de la usual y con voltaje menor del normal) para identificar las unidades débiles. Tustin (1990) da una descripción motivacional de la metodología y varias referencias. MIL-STD-2164 (1985) da una visión de conjunto útil de los procedimientos ESS. Kececioglu y Sun (1995) dan un tratamiento comprensivo de ESS. Nelson (1990, p. 39) da referencias adicionales, incluyendo las militares estándar.

Burn-in y ESS son esquemas de inspección/filtrado. En línea con el objetivo moderno de la calidad de eliminar la dependencia de la inspección en masa, muchos productores prefieren no hacer el quemado o el ESS. Tales métodos también son caros y pueden ser no totalmente efectivos. Mejorando la fiabilidad hacia la mejora continua del diseño del producto y del proceso de producción, puede ser posible reducir o eliminar la dependencia de los tests de filtrado, excepto, quizás, en las aplicaciones más críticas.

Aumento de fiabilidad. La fiabilidad de un sistema evoluciona continuamente durante su diseño, desarrollo, pruebas, producción y utilización. Este cambio continuo se le referencia como «crecimiento de la fiabilidad» (si bien, de hecho, la fiabilidad puede realmente mejorarse o deteriorarse). El crecimiento normalmente resulta del esfuerzo de descubrir fallos de diseño (o de producción) y de fijar mejoras que afectarán a todas las futuras unidades producidas. Por tanto, sistemas de generación posterior deberían tener mejor fiabilidad que sus predecesores. A veces nos referimos a este proceso como «probar, analizar y fijar» (TAAF = test, analyze, and fix). La idea básica es encontrar y fijar problemas de fiabilidad que no habían sido encontrados antes. Los modelos de fiabilidad creciente y los métodos de ajuste de datos permiten predicciones de fiabilidad del producto debida a tales mejoras. El análisis de fiabilidad creciente normalmente se hace ajustando un modelo de fiabilidad creciente (como el popular gráfico de Duane) a los datos de fallos en sistemas a lo largo del tiempo. Los modelos empíricos se utilizan para predecir la fiabilidad de futuras generaciones de sistemas. Para más información y referencias en aumento de fiabilidad, véanse MIL-HDBK-189 (1981), Klion (1992), Ascher y Feingold (1984) y el Capítulo 11 de Pecht (1995).

Software de fiabilidad. La custodia de obras de arte, cuentas bancarias, valores, contabilidad y otros sistemas financieros y de empresas dependen de complicados sistemas de software. Adicionalmente, modernos sistemas de hardware de todas las clases, automóviles, televisiones, redes de comunicaciones y naves espaciales contienen complicados circuitos. Muchos de estos sistemas electrónicos dependen fuertemente del software para su funcionalidad y flexibilidad. Para muchos sistemas, la fiabilidad del software se ha convertido en un importante factor limitante del sistema de fiabilidad.

El Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica define la fiabilidad del software como «la probabilidad de que el software no cause un fallo en el sistema durante un tiempo especificado bajo condiciones especificadas». La fiabilidad del software difiere de la fiabilidad del hardware como mínimo en un importante aspecto. Los fallos de hardware se pueden describir frecuentemente por una combinación de fallos físicos y/o degradación físico-química que progresa en el tiempo, quizá acelerada por estrés, choques u otras condiciones operativas o de medio ambiente. Los fallos en el software, por otra parte, están generalmente causados por fallos

inherentes al software que están siempre presentes. Puede ocurrir que estos fallos no ocurran hasta que se utilice un conjunto particular de inputs o hasta que se alcance un estado particular del sistema o un nivel de carga. El estado del software no cambia sin intervención.

Los errores de software difieren en su criticidad. Quienes trabajan con ordenadores personales saben que de tiempo en tiempo el sistema detiene su funcionamiento por razones desconocidas. La causa está frecuentemente relacionada con el software (es decir, no habría ocurrido si el software se hubiese diseñado para anticiparse a las condiciones que causan el problema). Volver a arrancar el ordenador y la aplicación suele hacer que el problema desaparezca. Importantes datos que estuviesen siendo utilizados en la aplicación cuando ocurrió el fallo pueden perderse. Futuras versiones del sistema operativo o del software de la aplicación pueden corregir tales problemas. En sistemas de seguridad críticos (por ejemplo, en medicina, tráfico de control aéreo o sistemas militares), los fallos de software pueden tener consecuencias mucho más serias (como peligro de muerte).

Para algunos propósitos, los métodos estadísticos de fiabilidad de software son similares a los utilizados en predicción del aumento de la fiabilidad de un sistema o en el análisis de datos de un sistema reparable, tratados anteriormente en esta subsección. Los datos para analizar la fiabilidad de un software suelen consistir en una sucesión de tiempos de fallos (u otros específicos eventos de interés) durante la ejecución del sistema de software. Los datos de fiabilidad del software se recogen por varias razones, incluyendo la evaluación de la distribución de tiempos entre fallos, seguir la pista del efecto de los continuos esfuerzos para encontrar y corregir los errores de software, tomando decisiones de cuándo lanzar una nueva versión de software, evaluando el efecto de los cambios en la mejora del proceso de desarrollo del software, etc.

Numerosos modelos han sido sugeridos y desarrollados para explicar los datos de fiabilidad del software en función de distintas variables, con el objeto de mejorar la fiabilidad. El más sencillo de estos modelos describe la proporción de fallos del software como una función suave del tiempo de servicio y de otros factores, como la carga del sistema, el total de tests a que el software ha sido sometido y el tiempo de utilización a que el sistema ha sido expuesto. En un intento de ser más mecanicista y de incorporar información del proceso directamente en el modelo de fiabilidad del software, muchos de estos modelos tienen un parámetro correspondiente al número de errores que quedan en el software. En algunos modelos, la proporción de fallos sería proporcional al número de errores. Cuando se hace una «reparación», siempre hay una probabilidad de que el error no desaparezca, y quizá una probabilidad de que se introduzca un nuevo error.

Para más información en fiabilidad de software y en modelos de fiabilidad de software, véanse Musa, Iannino y Okumoto (1987), Schooman (1983), Neufelder (1993), Capítulo 6 de Pecht (1995), o Azem (1995).

AGRADECIMIENTOS

Parte de este capítulo se ha tomado de Meeker y Escobar (1998), con permiso de John Wiley & Sons, Inc. Queremos agradecer a Elaine Miller y Denise Riker por su ayuda en mecanografiar y editar partes del manuscrito.

REFERENCIAS

- Abernethy, R. B. (1996). *The New Weibull Handbook*. Self-published, 536 Oyster Road, North Palm Beach, FL 33408-4328.
- ANSI/ASQC (1993a). Z1.4-1993: *Sampling Procedures and Tables for Inspection by Attributes*. Available from American National Standards Institute, Customer Service, 11 West 42nd St., New York, NY 10036.

- ANSI/ASQC (1993b). Z1.9-1993: *Sampling Procedures and Tables for Inspection by Variables for Percent Nonconforming*. Available from American National Standards Institute, Customer Service, 11 West 42nd St., New York, NY 10036.
- Ascher, H., and Feingold, H. (1984). *Repairable Systems Reliability*. Marcel Dekker, New York.
- Azem, A. (1995). *Software Reliability Determination for Conventional and Logic Programming*. Walter de Gruyter, New York.
- Bailey, R. A., and Gilbert, R. A. (1981). «STRIFE Testing for Reliability Improvement». *Proceedings of the Institute of Environmental Sciences*, pp. 119-121.
- Byrne, D., and Quinlan, J. (1993). «Robust Function for Attaining High Reliability at Low Cost». 1993 *Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*, pp. 183-191.
- Condra, L. W. (1993). *Reliability Improvement with Design of Experiments*. Marcel Dekker, New York.
- Doganaksoy, N., and Nelson, W. (1998). «A Method to Compare Two Samples of Recurrence Data». *Life Data Analysis*, vol. 4, pp. 51-63.
- Graves, S., and Menten, T. (1996). «Designing Experiments to Measure and Improve Reliability». *Handbook of Reliability Engineering and Management*, 2nd ed. W. G. Ireson, C. F. Coombs, and R. Y. Moss, eds. McGrawHill, New York, Chapter 11.
- Hahn, G. J., and Shapiro, S. S. (1967). *Statistical Models in Engineering*. John Wiley & Sons, New York.
- Høyland, A., and Rausand, M. (1994). *System Reliability Theory: Models and Statistics Methods*. John Wiley & Sons, New York.
- Jensen, F., and Petersen, N. E. (1982). *Burn-in, An Engineering Approach to Design and Analysis of Burn-in Procedures*. John Wiley & Sons, New York.
- Kececioglu, D., and Sun, F. (1995). *Environmental Stress Screening: Its Quantification, Optimization and Management*. PTR Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Klinger, D. J., Nakada, Y., and Menendez, M. A. (1990). *AT&T Reliability Manual*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Klion, J. (1992). *Practical Electronic Reliability Engineering*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Lawless, J. F., and Nadeau, C. (1995). «Some Simple Robust Methods for the Analysis of Recurrent Events». *Technometrics*, vol. 37, pp. 158-168.
- Lewis, E. E. (1996). *Introduction to Reliability Engineering*. John Wiley & Sons, New York.
- Meeker, W. Q., and Escobar, L. A. (1998). *Statistical Methods for Reliability Data*. John Wiley & Sons, New York.
- Meeker, W. Q., and Hahn, G. J. (1985). «How to Plan Accelerated Life Tests: Some Practical Guidelines». *ASQC Basic References in Quality Control: Statistical Techniques*. Available from the American Society for Quality, 310 W. Wisconsin Ave., Milwaukee, WI 53203, vol. 10.
- Meeker, W. Q., and LuValle, M. J. (1995). «An Accelerated Life Test Model Based on Reliability Kinetics». *Technometrics*, vol. 37, pp. 133-146.
- MIL-HDBK-189 (1981). *Reliability Growth Management*. Available from Naval Publications and Forms Center, 5801 Tabor Ave., Philadelphia, PA 19120.
- MIL-HDBK-217F (1991). *Reliability Prediction for Electronic Equipment*. Available from Naval Publications and Forms Center, 5801 Tabor Ave., Philadelphia, PA 19120.
- MIL-STD-105E (1989). *Military Standard, Sampling Procedures and Tables for Inspection by Attributes*. Available from Naval Publications and Forms Center, 5801 Tabor Ave., Philadelphia, PA 19120.
- MIL-STD-414 (1957). *Military Standard, Sampling Procedures and Tables for Inspection by Variables for Percent Defective*. Available from Naval Publications and Forms Center, 5801 Tabor Ave., Philadelphia, PA 19120.
- MIL-STD-1629A (1980). *Failure Modes and Effects Analysis*. Available from Naval Publications and Forms Center, 5801 Tabor Ave., Philadelphia, PA, 19120.
- MIL-STD-2164 (1985). *Environmental Stress Screening Process for Electronic Equipment*. Available from Naval Publications and Forms Center, 5801 Tabor Ave., Philadelphia, PA 19120.
- Minitab (1997). *Version 12 User's Guide*, Minitab Inc., State College, PA.
- Musa, J. D., Iannino, A., and Okumoto, K. (1987). *Software Reliability: Measurement, Prediction, Application*. McGraw-Hill, New York.
- Nair, V. N. (1984). «Confidence Bands for Survival Functions with Censored Data: a Comparative Study». *Technometrics*, vol. 26, pp. 265-275.
- Nelson, W. (1982). *Applied Life Data Analysis*. John Wiley & Sons, New York.
- Nelson, W. (1988). «Graphical Analysis of System Repair Data». *Journal of Quality Technology*, vol. 20, pp. 24-35.

- Nelson, W. (1990). *Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses*. John Wiley & Sons, New York.
- Nelson, W. (1995). «Confidence Limits for Recurrence Data—Applied to Cost or Number of Product Repairs». *Technometrics*, vol. 37, pp. 147-157.
- Nelson, W., and Doganaksoy, N. (1989). «A Computer Program for an Estimate and Confidence Limits for the Mean Cumulative Function for Cost or Number of Repairs of Repairable Products». TIS Report 89CRD239, General Electric Company Research and Development, Schenectady, NY.
- Neufelder, A. (1993). *Ensuring Software Reliability*. Marcel Dekker, New York.
- O'Connor, P. D. T. (1985). *Practical Reliability Engineering*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York.
- Parida, N. (1991). «Reliability and Life Estimation from Component Fatigue Failures below the Go-No-Go Fatigue Limit». *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 19, pp. 450-453.
- Pecht, M., ed. (1995). *Product Reliability, Maintainability, and Supportability Handbook*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Phadke, M. S. (1989). *Quality Engineering Using Robust Design*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- SAS Institute (1995). *JMP User's Guide*, Version 31. SAS Institute Inc., Cary, NC.
- SAS Institute (1996). *SAS/STAT™ Software: Changes and Enhancements through Release 6.11*. SAS Institute Inc., Cary, NC. (Proc RELIABILITY is part of the SAS/QC software).
- Schilling, E. G. (1982). *Acceptance Sampling in Quality Control*. Marcel Dekker, New York.
- Schinner, C. (1996). «Accelerated Testings». *Handbook of Reliability Engineering and Management*, 2nd ed., W. G. Ireson, C. F. Coombs, and R. Y. Moss, eds. McGraw-Hill, New York, Chapter 12.
- Shooman, M. L. (1983). *Software Engineering: Design, Reliability, and Management*. McGraw-Hill, New York.
- Statistical Sciences (1996). *S-PLUS User's Manual*, Volumes 1, 2, Version 3.4. Statistical Sciences, Inc., Seattle.
- Sundararajan, C. (1991). *Guide to Reliability Engineering*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Tseng, T. S., Hamada, M., and Chiao, C. H. (1995). «Using, Degradation Data from a Factorial Experiment to Improve Fluorescent Lamp Reliability». *Journal of Quality Technology*, vol. 27, pp. 363-369.
- Tustin, W. (1990). «Shake and Bake the Bugs Out». *Quality Progress*, September 1990, pp. 61-64.
- U.S. Department of Defense (1960). «Sampling Procedures and Tables for Life and Reliability Testing». *Quality Control and Reliability (Interim) Handbook (H-108)*. Office of the Assistant Secretary of Defense (Supply and Logistics), Washington, DC.
- U.S. Department of Defense (1965). «Factors and Procedures for Applying MIL-STD-105D Sampling Plans to Life and Reliability Testing». *Quality Control and Reliability Assurance Technical Report (TR 7)*. Office of the Assistant Secretary of Defense (Installations and Logistics), Washington, DC.

Apéndice V

HERRAMIENTAS DE MEJORA DE LA CALIDAD*

INTRODUCCIÓN

Se considera a la clásica *Guide to Quality Control* (1972), de Ishikawa, como el primer manual de formación sobre herramientas para solucionar problemas, presentado específicamente para su uso en la mejora de la calidad. El libro original japonés era una referencia de formación para trabajadores de fábricas que eran miembros de círculos de control de la calidad (QC). A las «siete herramientas» de este volumen (diagramas de flujo, tormenta de ideas, diagramas causa-efecto, diagramas de barras, análisis de Pareto, histogramas y diagramas de dispersión), añadimos aquí tres más. Dos están implícitas, pero no están tratadas con detalle en la obra de Ishikawa: recogida de datos y gráficos y tablas. La tercera, gráfico de cuartiles, es de origen más reciente (Tukey 1977), pero se ha demostrado que es un complemento digno o un sustituto para los histogramas en determinadas condiciones. Existen otras varias herramientas; esta lista no es exhaustiva, ninguna lista podría serlo. Pero la lista presentada es un punto de partida útil para la actividad de mejora de la calidad. Los equipos de mejora de la calidad que dominan estas herramientas estarán bien preparados para enfrentarse a la mayoría de los problemas.

Tal como las presenta Juran Institute en el curso *Quality Improvement Tools*, las herramientas están integradas en un proceso estructurado de mejora de la calidad (Fig. V.1). Cada herramienta está descrita y se dan instrucciones para su uso. Además, se identifican los pasos del proceso en que se utiliza la herramienta. Esta información se concreta en un mapa de aplicación en forma de matriz (Fig. V.1), en el que cada columna corresponde a una herramienta y cada fila a un paso del proceso. En cada intersección hay un símbolo que indica la frecuencia de uso de esa herramienta en ese paso del proceso (frecuente, infrecuente y muy raro).

El mapa de proceso constituye una guía valiosa para los equipos de solución de problemas en los modos siguientes:

1. Recuerda al equipo que existe un orden estructurado en el proceso de solución de problemas y le ayuda a mantenerse en la pista.

* Como respuesta a las peticiones de usuarios de ediciones anteriores de este manual, los editores incluyen en esta introducción algunas de las herramientas de la calidad más importantes, populares y utilizadas. El material de este apéndice se ha adaptado del proporcionado en el curso *Quality Improvement Tools*, presentado por el Juran Institute, Inc., Wilton, CT.

1. **Identificar un proyecto**
 - a. Designar los proyectos
 - b. Evaluar los proyectos
 - c. Seleccionar un proyecto
 - d. Preguntar: ¿Es esto una mejora?
2. **Establecer el proyecto**
 - a. Preparar una declaración
 - b. Seleccionar un equipo
 - c. Verificar la misión
3. **Diagnosticar la causa**
 - a. Analizar los síntomas
 - b. Confirmar o modificar la misión
 - c. Formular teorías
 - d. Probar las teorías
 - e. Identificar las causas raíz
4. **Poner remedio a la causa**
 - a. Evaluar las alternativas
 - b. Diseñar la solución
 - c. Diseñar los controles
 - d. Diseñar la cultura de empresa
 - e. Comprobar la eficacia
 - f. Implantar
5. **Estabilizar las ganancias**
 - a. Diseñar controles efectivos
 - b. Elaborar una solución
 - c. Auditar los controles
6. **Replicar los resultados y designar nuevos proyectos**
 - a. Replicar los resultados
 - b. Designar nuevos proyectos

	Diagrama de barras	Tormenta de ideas	Diagrama de causa-efecto	Recogida de datos	Diagrama de flujo	Gráficos y tablas	Histogramas	Análisis de Pareto	Diagramas de dispersión	Estratificación
1. Identificar un proyecto										
a. Designar los proyectos		■		■	■					
b. Evaluar los proyectos		✱	✱	■	□	□		■		
c. Seleccionar un proyecto				■				■		□
d. Preguntar: ¿Es esto una mejora?	✱		✱	■	□		✱	■	✱	□
2. Establecer el proyecto										
a. Preparar una declaración					□	□		□		□
b. Seleccionar un equipo					□					
c. Verificar la misión				□	□	□				
3. Diagnosticar la causa										
a. Analizar los síntomas	□	✱	✱	■	■	□	□	■		■
b. Confirmar o modificar la misión		✱	✱	■	■	■		■		□
c. Formular teorías		■	■		□					□
d. Probar las teorías	■	✱	✱	■	■	■	■	■	■	■
e. Identificar las causas raíz	■	✱	✱	■	■	■	■	■	■	■
4. Poner remedio a la causa										
a. Evaluar las alternativas		■	□	■	■		□	□	□	□
b. Diseñar la solución	□	✱	✱	□	■	■	□	□	□	□
c. Diseñar los controles	□	✱	✱		■		□	□	□	
d. Diseñar la cultura de empresa		■								
e. Comprobar la eficacia				■	■		□	□	□	
f. Implantar					■					
5. Estabilizar las ganancias										
a. Diseñar controles efectivos	□	✱	✱		■		□	□	□	
b. Elaborar una solución					■					
c. Auditar los controles				■		■		■		
6. Replicar los resultados y designar nuevos proyectos										
a. Replicar los resultados				■	■		□	□	□	
b. Designar nuevos proyectos					■			■		



Usado frecuentemente



Usado ocasionalmente



Usado raramente



Nunca usado

FIGURA V.1 Aplicaciones de las herramientas de mejora de la calidad (Juran Institute).

2. En un paso determinado, si el equipo no sabe qué hacer a continuación, una de las herramientas usadas frecuentemente puede sugerirle la acción inmediata.
3. En un paso determinado, el uso de una herramienta que se indica como raramente usada es una señal para el equipo de que reconsidere el curso de su acción. Un buen ejemplo es el uso de la tormenta de ideas (que es un modo eficaz de desarrollar una lista de teorías, ideas y opiniones de miembros del grupo) para probar teorías (que lo que requiere siempre es datos, no las opiniones de miembros del grupo).

Las herramientas están descritas e ilustradas aquí brevemente. Un tratamiento más completo se puede encontrar en varios textos, incluidas las notas del curso *Quality Improvement Tools* o el libro *Modern Methods for Quality Control and Improvement*, de Wadsworth, Stephens y Godfrey.

Diagrama de flujo. Una representación gráfica de la secuencia de pasos necesarios para producir alguna salida. La salida puede ser un producto físico, un servicio, cierta información o una combinación de los tres. Los símbolos del diagrama de flujo son específicos de la función y se explican en la Figura V.2. La Figura V.3 muestra el uso de estos símbolos en el diagrama de flujo de un proceso de venta de billetes de avión y registro de los pasajeros.



El *símbolo de actividad* es un rectángulo que indica un solo paso en el proceso. Dentro del rectángulo se muestra una breve descripción de la actividad.



El *símbolo de decisión* es un rombo que designa un punto de decisión o de ramificación en el proceso. La descripción del punto de decisión o de ramificación está escrita dentro del símbolo, normalmente en forma de pregunta. La respuesta a la pregunta determina el camino que se seguirá. Cada camino está etiquetado para corresponder con una respuesta.



El *símbolo terminal* es un rectángulo redondeado que identifica el principio o el fin del proceso. «Inicio» o «Final» se muestran dentro del símbolo.



Las *líneas de flujo* se usan para representar el progreso de los pasos en la secuencia. La punta de la flecha en la línea de flujo indica la dirección del flujo del proceso.



El *símbolo de documento* representa la información escrita relativa al proceso. El título o descripción del documento se muestra dentro del símbolo.



El *símbolo de base de datos* representa la información relativa al proceso almacenada electrónicamente. El título o descripción de la base de datos se muestra dentro del símbolo.



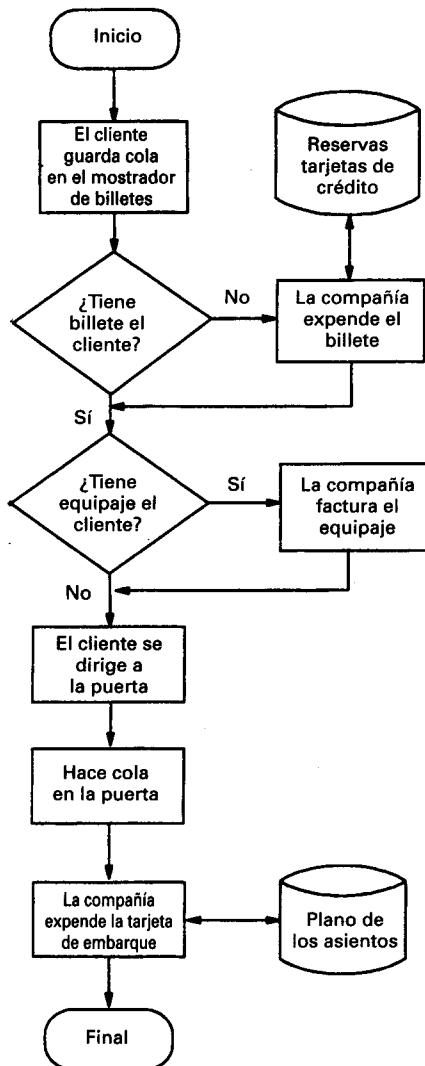
El *conector* es un círculo usado para indicar una continuación del diagrama de flujo. Dentro del círculo se muestra una letra o un número. La misma letra o número se usa en un símbolo de conector del diagrama de flujo siguiente para indicar cómo están conectados los procesos.

Estos símbolos básicos se disponen de modo que muestren la secuencia real de pasos de un proceso, yendo, coherentemente, de arriba abajo y de izquierda a derecha de la página. Como hemos visto, los rombos de decisión pueden llevarnos a una ramificación que retrocede y repite un camino previo.

FIGURA V.2 Símbolos usados en el trazado de diagramas de flujo.

El cliente llega al aeropuerto y necesita comprar un billete o facturar el equipaje

VIEJO



NUEVO

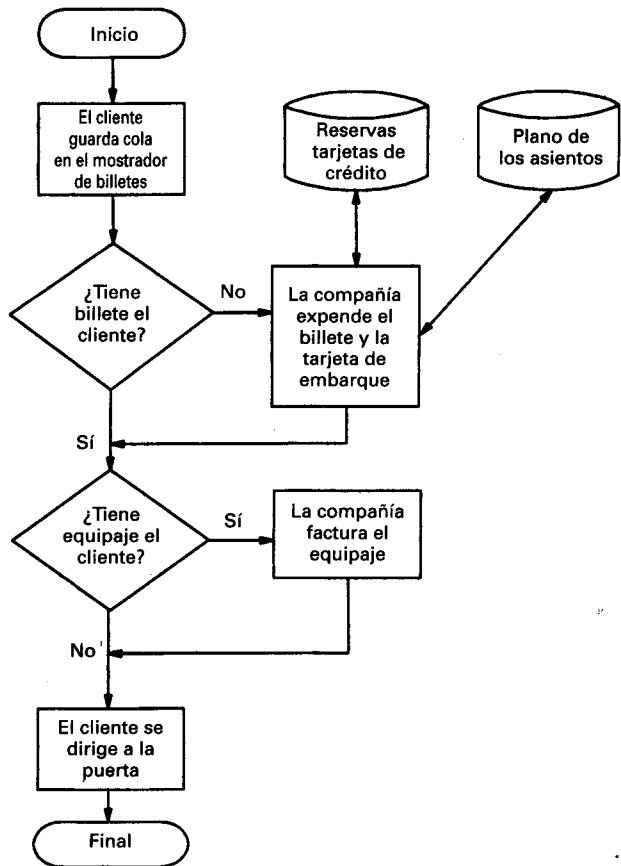


Figura V.3 Antes y después del uso de los diagramas de flujo en el proceso de billetes de una compañía aérea (Juran Institute).

- Las buenas ideas no son aplaudidas ni respaldadas. Inicialmente no se hace ningún juicio, dando la preferencia a la generación de ideas.
- El pensamiento debe ser no convencional, imaginativo e incluso escandaloso. Se suspenden la autocritica y el autoenjuiciamiento.
- Para desanimar el pensamiento analítico o crítico, se informa a los miembros del equipo de que el objetivo está en un gran número de ideas nuevas en el menor tiempo posible.
- Los miembros del equipo deberán «aprovecharse» de las ideas de otros, ampliándolas, modificándolas o produciendo por asociación otras nuevas.

FIGURA V.4 Técnica de la tormenta de ideas (*Juran Institute*).

Tormenta de ideas. Una técnica de grupo para generar ideas constructivas y creativas de todos los participantes. El uso de esta herramienta deberá proporcionar nuevas ideas o nuevas aplicaciones y uso novedoso de ideas ya existentes. La técnica se esboza en la Figura V.4.

Diagrama de causa-efecto («espina de pescado»). Desarrollada por Kaoru Ishikawa, a esta herramienta se le llama a menudo, en su honor, diagrama de Ishikawa. Su objeto es organizar y desplegar las interrelaciones de varias teorías sobre las causas raíz de un problema. Al centrar la atención en las causas de un problema específico de un modo estructurado y sistemático, el diagrama permite a un equipo de solución de problemas clarificar su pensamiento sobre las causas potenciales y le permite trabajar más productivamente en el descubrimiento de la verdadera causa o causas raíz. En la Figura V.5 se da un ejemplo.

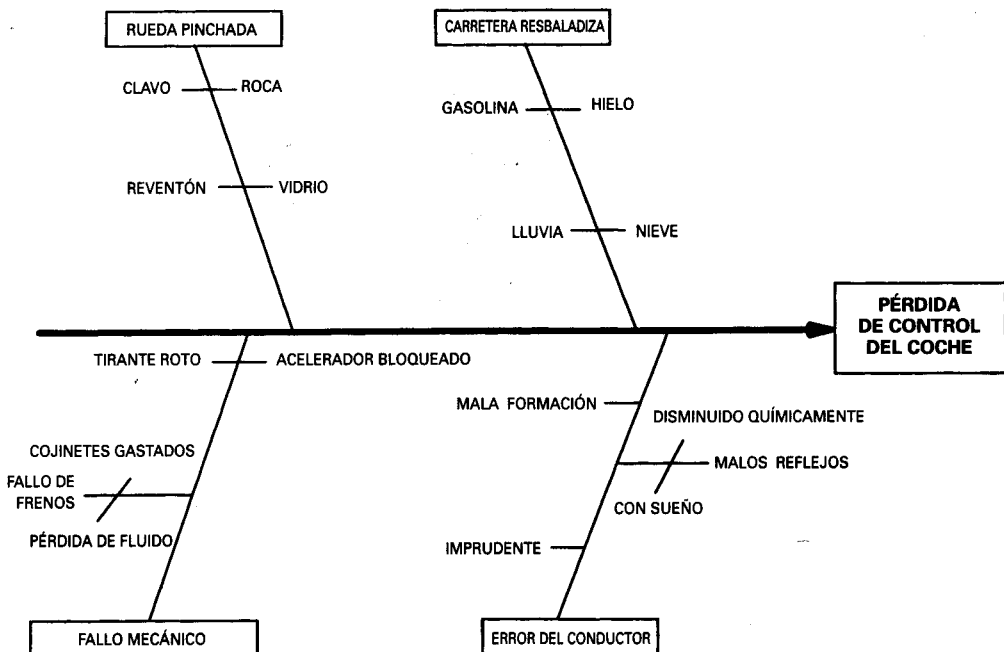


FIGURA V.5 Diagrama causa-efecto de la pérdida de control de un coche (*Juran Institute*).

Recogida de datos. La reunión de los datos objetivos necesarios para arrojar luz sobre el problema en cuestión y de una forma adecuada para la herramienta seleccionada para el análisis de los datos. Entre los tipos de recogida de datos, están las hojas de verificación (que proporcionan datos y tendencias), las hojas de datos (formato sencillo tabular o en columnas) y las listas de chequeo (listas sencillas de pasos a realizar). Las Figuras V.6 y V.7 constituyen ejemplos de esto.

COMPONENTES SUSTITUIDOS POR EL LABORATORIO

Hacer una raya por cada componente sustituido. Marcar del modo siguiente: / // /// //// //H

Periodo de tiempo: 22 feb. a 27 de feb. 1988

Técnico reparador: Bob

MODELO DE APARATO DE TV 1013

Circuitos integrados	///H
Condensadores	///H ///H ///H ///H ///H //
Resistencias	//
Transformadores	////
Mandos	
CRT (tubo de rayos catódicos)	/

MODELO DE APARATO DE TV 1017

Circuitos integrados	///
Condensadores	///H ///H ///H ///H ///H //
Resistencias	/
Transformadores	//
Mandos	///H ///H ///H //
CRT (tubo de rayos catódicos)	/

MODELO DE APARATO DE TV 1019

Circuitos integrados	/
Condensadores	///H ///H ///H ///H ///
Resistencias	/
Transformadores	//
Mandos	
CRT (tubo de rayos catódicos)	/

FIGURA V.6 Hoja de verificación de fallos de componentes de TV (Juran Institute).

- Leer la temperatura aproximando al grado más cercano en medidor n.º 5.
- Registrar la temperatura en la tabla de abajo.
- La lectura se tomará cada hora (± 5 minutos).
- Usar la sección de «Notas» para registrar cualquier cosa anormal.

Fecha: 6-7-88Línea #: 13Inspector: Ginny Smith

* ¿Preguntas? Contactar con Larry Fine x2222

Hora del día	Temperatura (°F)
0800	240
0900	242
1000	236
1100	236
1200	236

Hora del día	Temperatura (°F)
1300	227
1400	230
1500	224
1600	220
1700	220

Notas:

- Lectura de las 1100 horas tomada a las 1112
- La línea se paró entre las 1310 y las 1330

FIGURA V.7 Una hoja de datos mostrando la temperatura del baño de soldadura (Juran Institute).

Gráficos y cuadros. Son una clase muy amplia de herramientas usadas para resumir los datos cuantitativos en representaciones pictóricas. Tres tipos de gráficos y cuadros que han resultado especialmente útiles en la mejora de la calidad son los gráficos lineales, los gráficos de barras y los gráficos de tartas. Un *gráfico lineal* conecta puntos que representan pares de datos numéricos, para desplegar las relaciones entre dos variables numéricas continuas (por ejemplo, coste y tiempo). En la Figura V.8, cada par de datos consiste en un año y en el coste

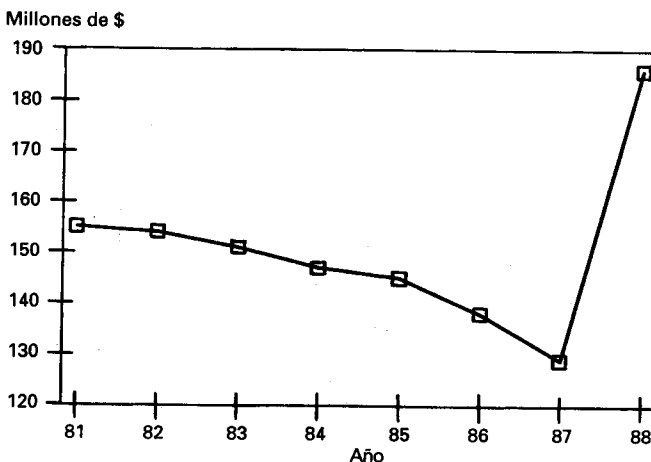


FIGURA V.8 Una escala vertical engañosa, propuesta para mostrar el coste de la mala calidad (Juran Institute).

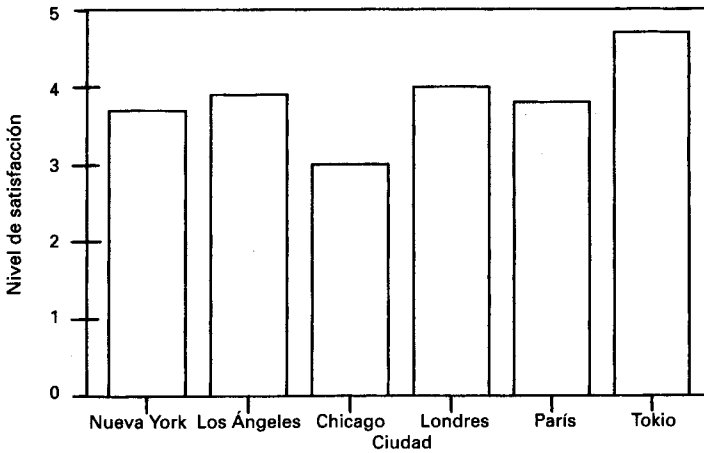


FIGURA V.9 Un gráfico de barra que muestra el promedio de satisfacción de los clientes por ciudad (*Juran Institute*).

de la mala calidad registrado en ese año. El coste de la mala calidad se muestra en función de los años. Un *gráfico de barras* también retrata las relaciones entre pares de variables, pero sólo una de las variables necesita ser numérica (Fig. V.9). Un *gráfico de tarta* (Fig. V.10) muestra las proporciones de las varias clases del conjunto de un fenómeno en estudio.

Estratificación. Consiste en la separación de datos en categorías. Se utiliza para identificar qué categorías contribuyen a la solución del problema y qué categorías son dignas de una mayor investigación. Es una técnica de análisis que ayuda a señalar el lugar o la fuente de un problema de calidad. Puede ser necesario estratificar los datos de muchas maneras diferentes.

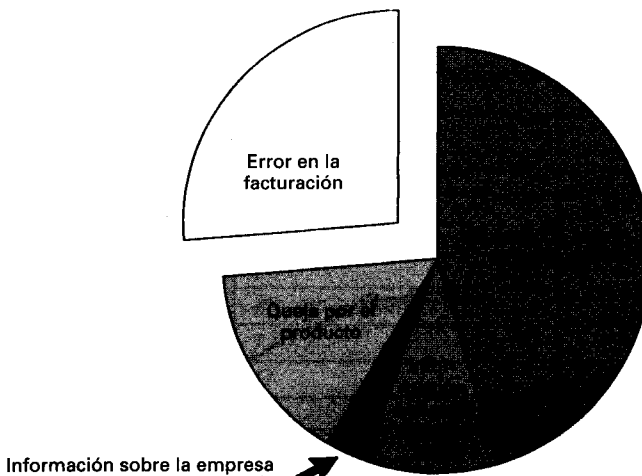


FIGURA V.10 Un gráfico de tarta que muestra las llamadas telefónicas recibidas por el servicio al cliente durante un mes (*Juran Institute*).

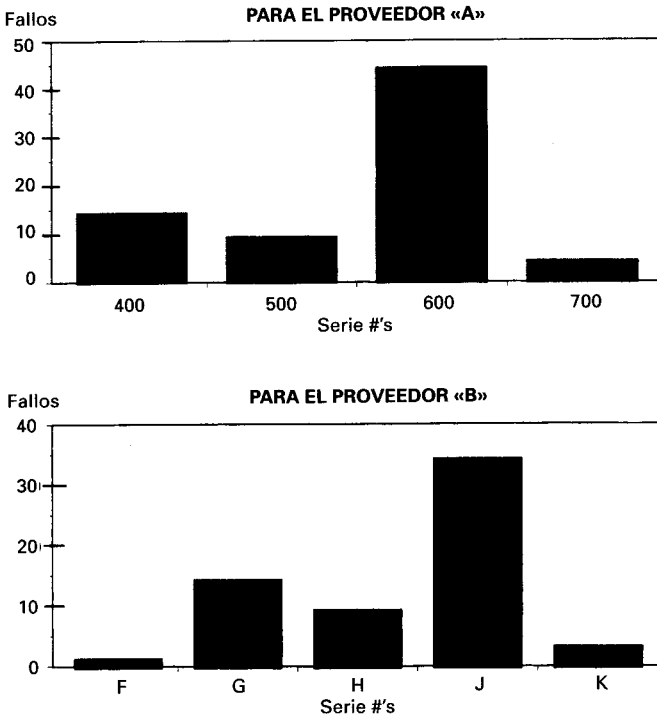


FIGURA V.11 Estratificación de segunda etapa de fallos. Muestra los fallos del circuito de entrada RF por número de serie (*Juran Institute*).

Las Figuras V.11 y V.12 ilustran la estratificación de datos relativos a un fallo en operación de un componente electrónico. La primera estratificación es por proveedor; la segunda, por expedidor. El análisis revela que el problema está relacionado con los expedidores (un expedidor nuevo, en concreto) y no con los proveedores. La estratificación es la base de aplicación de otras herramientas, como el análisis de Pareto y los diagramas de dispersión.

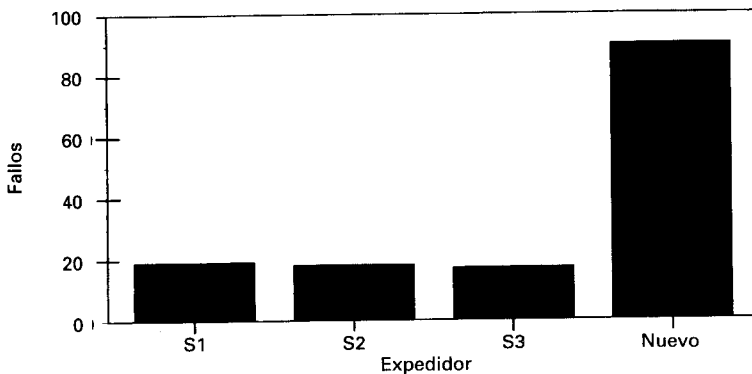


FIGURA V.12 Estratificación por una nueva variable. Muestra los fallos del circuito de entrada RF por expedidor (*Juran Institute*).

①	②	③	
Formulario de petición del ítem	Número de errores	Porcentaje del total	Porcentaje del total acumulado
G	44	29	
J	38	25	29
M	31	21	54
Q	16	11	75
B	8	5	86
D	5	3	91
C	3	2	95
A	1	0,67	97
O	1	0,67	98
R	1	0,67	98
N	1	0,67	99
L	1	0,66	99
I	0	0	100
E	0	0	100
H	0	0	100
K	0	0	100
F	0	0	100
P	0	0	100
Total	150	100	100

FIGURA V.13 Tabla de Pareto de errores en formularios de petición (*Juran Institute*).

Análisis de Pareto. Se trata de una herramienta utilizada para establecer prioridades, dividiendo los efectos concurrentes en unos «pocos vitales» y «muchos útiles». Un diagrama de Pareto incluye tres elementos básicos: (1) los contribuyentes al efecto total, ordenados por la magnitud de su contribución; (2) la magnitud de la contribución de cada uno expresada numéricamente, y (3) el efecto acumulado en tanto por ciento del total de los contribuyentes según su orden. La Figura V.13 muestra una tabla de Pareto. La Figura V.14 muestra los mismos datos en un diagrama de Pareto. Advértase cómo se reflejan los tres elementos básicos en cada figura.

Histograma. Se trata de una imagen de la distribución de un conjunto de medidas. Un histograma es un resumen gráfico de la variación en un conjunto de datos. Cuatro conceptos relativos a la variación en un conjunto de datos subrayan la utilidad del histograma: (1) los valores en un conjunto de datos casi siempre muestran variación; (2) la variación muestra un patrón; (3) los patrones de una variación son difíciles de ver en las tablas numéricas, y (4) los patrones de una variación son más fáciles de ver cuando los datos se resumen de forma gráfica en un histograma. El análisis consiste en identificar y clasificar el patrón de una variación que muestra el histograma, relacionando luego lo que se sabe del patrón característico con las condiciones físicas en que se crearon los datos, para explicar qué ha podido dar lugar al patrón en dichas condiciones. Los datos de la Figura V.15a muestran los días transcurridos entre la petición interdepartamental de una entrevista y la celebración de la entrevista. En la Figu-

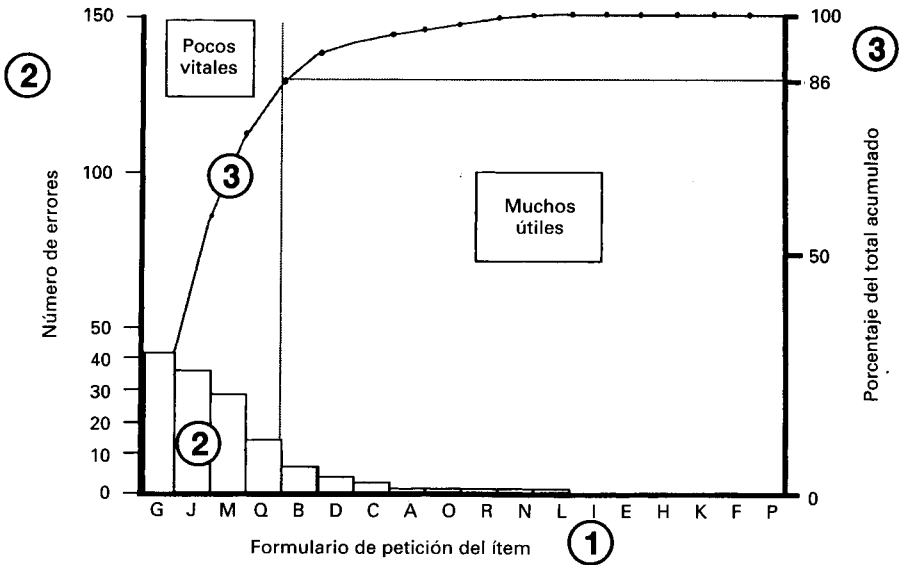


FIGURA V.14 Diagrama de Pareto de errores en formularios de petición (*Juran Institute*).

ra V.15b el histograma ayudó al equipo a reconocer el lapso de tiempo inaceptable transcurrido desde la petición a la entrevista. También proporcionó al equipo una demostración vivida de un fenómeno de origen humano: la prisa del día 15 para conseguir cumplir con las peticiones dentro de la meta de los 15 días. El histograma dirigió la atención del equipo hacia los pasos para reducir la duración (y con ello la dispersión) del proceso.

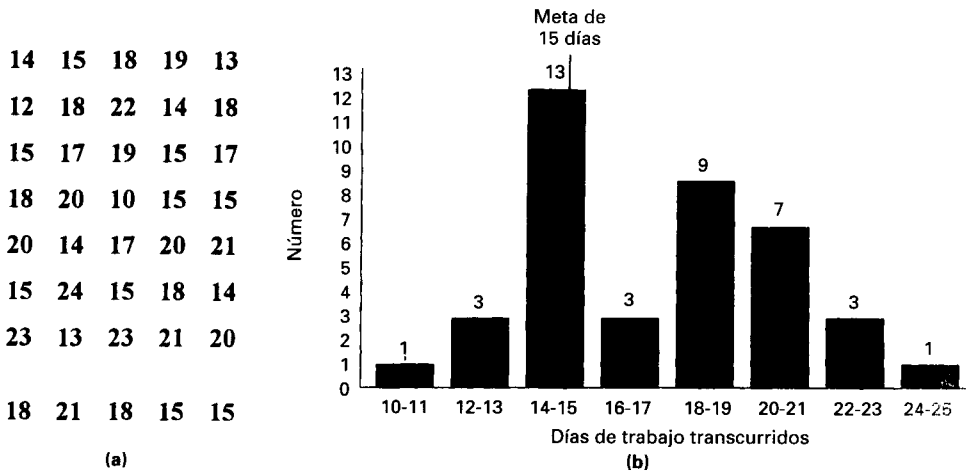


FIGURA V.15 Respuesta a las peticiones de evaluación de tareas. (a) Datos que muestran el tiempo transcurrido (en días de trabajo) desde la recepción de la petición hasta la revisión preliminar y el contacto con el directivo. (b) Histograma (*Juran Institute*).

Diagrama de dispersión. Se trata de una herramienta para dibujar las relaciones entre dos variables y determinar si existe una correlación entre ellas que pueda indicar una relación causa-efecto (o indicar que no existe esa relación causa-efecto). La Figura V.16 muestra los diagramas de dispersión usados para explorar tres causas potenciales de errores administrativos. Estas causas potenciales seleccionadas de un diagrama de causa-efecto son: la fatiga, el trabajar con caracteres de teclado alfabéticos y numéricos y la distracción provocada por el ruido de fondo. Los diagramas indican que la mezcla alfanumérica aparece como la causa más probable originaria de los errores administrativos.

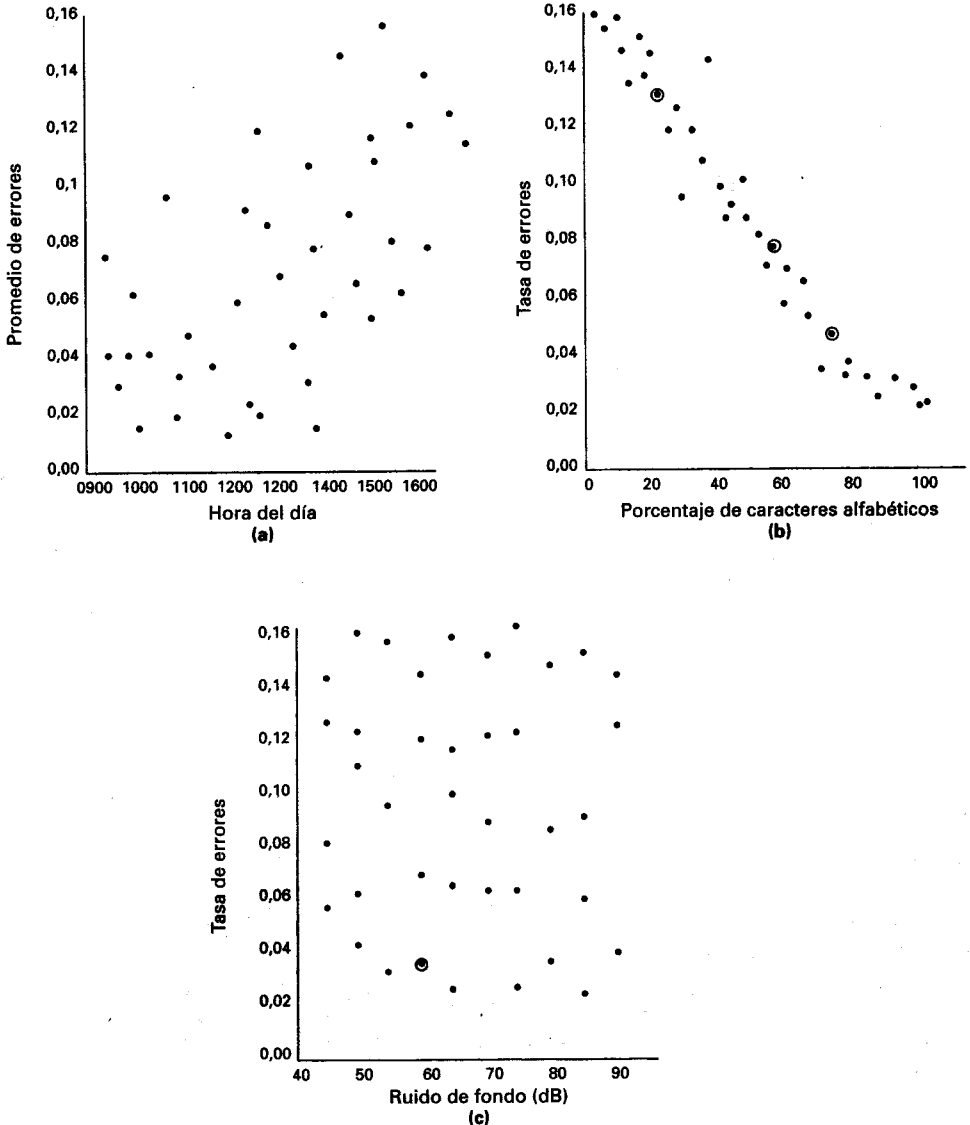


FIGURA V.16 Diagramas dispersos usados para explorar las causas potenciales de los errores en la entrada de datos administrativos. (a) Hora del día; (b) el porcentaje de caracteres alfabéticos, y (c) el ruido de fondo (*Juran Institute*).

Gráfico de cuartiles. Se trata de un resumen gráfico, con cinco números de la variación en un conjunto de datos. Los datos se resumen en: el valor menor, el segundo cuartil, la mediana, el tercer cuartil y el valor mayor. El gráfico de cuartiles se puede usar para mostrar la variación en una pequeña muestra de datos para comparar la variación en un número grande de distribuciones relacionadas. El gráfico de cuartiles (a veces llamado «gráfico de caja y patillas») puede

A		B	
243	345	192	251
207	268	156	102
272	290	228	215
45	251	125	145
226	183	279	188

(a)

Contratista	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	45	183	207	226	243	251	268	272	290	345
B	102	125	145	156	188	192	215	228	251	279

(b)

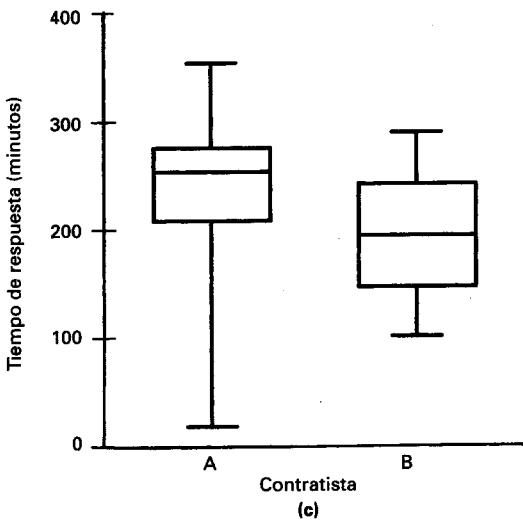


FIGURA V.17 Gráfico de cuartiles usado para comparar los tiempos de respuesta (en minutos) de dos contratistas de reparación de copiadoras, A y B. (a) Datos brutos; (b) conjunto de datos ordenador, y (c) gráfico de cuartiles básico (*Juran Institute*).

resultar útil incluso cuando el número de datos es demasiado pequeño para producir un histograma significativo. Al analizar el rendimiento de dos contratistas de reparación de copiadoras, un cliente potencial creó el análisis de la Figura V.17. Está basado en 10 llamadas para reparaciones a cada uno de los contratistas A y B. Las Figuras V.17a y b muestran el tiempo de respuesta de los dos contratistas de copiadoras como datos brutos y como datos «ordenados» (secuenciales). La Figura V.17c muestra los mismos datos como un gráfico de cuartiles. La comparación entre los dos dibujos gráficos favorece al contratista B: la mediana del tiempo de respuesta de B es menor que la de A y muestra menos variación.

REFERENCIAS

- Turkey, J. W. (1977). *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley, Reading, MA.
Wadsworth, Harrison M., Stephens, Kenneth S., and Godfrey, A. Blanton (1986). *Modern Methods for Quality Control and Improvement*. John Wiley and Sons, New York.