RCM II

Mantenimiento Centrado en Confiabilidad

Edición en Español

John Moubray

Mantenimiento Centrado en Confiabilidad
(Reliability-centred Maintenance)

Edición en Español

John Moubray

Traducido por

Ellmann, Sueiro y Asociados

Publicado por Aladon Ltd
44 Regent Street, Lutterworth, Leicestershire LE 17 4BD, United Kingdom

Publicado por primera vez en 1991
Segunda edición en 1997
Edición en Español en 2004

© John Moubray 1991, 1997, 2000

Todos los derechos reservados. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida en cualquier forma material (incluyendo fotocopiado o almacenamiento electrónico sea o no transitoriamente o accidentalmente para algún otro uso de esta publicación) sin el permiso escrito del tenedor de los derechos de reproducción excepto de acuerdo con lo estipulado en el Acta de Publicación, Proyecto y Patentes de 1988. La solicitud al tenedor de los derechos de publicación del permiso escrito para reproducir cualquier parte de esta publicación debe ser dirigida al editor.

ISBN: **09539603-2-3**

Traducido por ELLMANN, SUEIRO Y ASOCIADOS
Buenos Aires, Argentina - Madrid, España

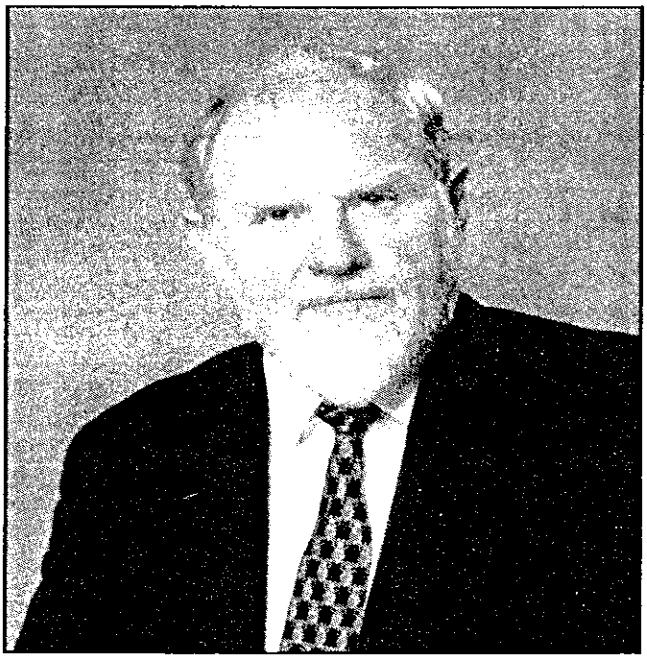
Compaginado por Rob Lockhart

Impreso y encuadernado en Gran Bretaña por Biddles Ltd,
Guildford and King´s Lynn

Para Edith

In Memory of

John Mitchell Moubray IV



Aladon Founder: 1949 - 2004

Contenido

Prólogo a la edición en español		viii
Prefacio		ix
Reconocimientos		xii
1	**Introducción al Mantenimiento Centrado en Confiabilidad**	**1**
1.1	El cambiante mundo del mantenimiento	1
1.2	Mantenimiento y RCM	6
1.3	RCM: Las siete preguntas básicas	7
1.4	Aplicando el proceso de RCM	16
1.5	Qué logra el RCM	19
2	**Funciones**	**22**
2.1	Describiendo funciones	23
2.2	Estándares de funcionamiento	23
2.3	El contexto operacional	29
2.4	Diferentes tipos de funciones	37
2.5	Cómo deben listarse las funciones	46
3	**Fallas Funcionales**	**48**
3.1	Falla	48
3.2	Fallas funcionales	49
4	**Análisis de Modos de Falla y sus Efectos**	**56**
4.1	¿Qué es un modo de falla?	56
4.2	¿Porqué analizar los modos de falla?	58
4.3	Categorías de modos de falla	61
4.4	¿Cuánto detalle?	68
4.5	Efectos de falla	76
4.6	Fuentes de información acerca de modos y efectos	81
4.7	Niveles de análisis y la hoja de información	84
5	**Consecuencias de Falla**	**94**
5.1	Técnicamente factible y merecer la pena	94
5.2	Funciones ocultas y evidentes	96

5.3	Consecuencias ambientales y para la seguridad	98
5.4	Consecuencias operacionales	107
5.5	Consecuencias no operacionales	112
5.6	Consecuencias de fallas ocultas	115
5.7	Conclusión	132
6	**Mantenimiento Proactivo 1: Tareas Preventivas**	**133**
6.1	Factibilidad técnica y tareas preventivas	133
6.2	Edad y deterioro	134
6.3	Fallas relacionadas con la edad y mantenimiento preventivo	137
6.4	Tareas de reacondicionamiento y sustitución cíclica	138
6.5	Fallas no asociadas con la edad	144
7	**Mantenimiento Proactivo 2: Tareas Predictivas**	**148**
7.1	Fallas potenciales y mantenimiento a condición	148
7.2	El intervalo P–F	149
7.3	Factibilidad técnica de tareas a condición	153
7.4	Categorías de técnicas a condición	153
7.5	Tareas a condición: algunos escollos	159
7.6	Curvas P-F lineales y no lineales	161
7.7	Cómo determinar el intervalo P-F	167
7.8	Cuándo vale la pena realizar tareas a condición	170
7.9	Selección de tareas proactivas	171
8	**Acciones "a Falta de" 1: Tareas de búsqueda de fallas**	**174**
8.1	Acciones "a falta de"	174
8.2	Búsqueda de falla	175
8.3	Intervalos de tareas de búsqueda de falla	179
8.4	La Factibilidad técnica de la búsqueda de falla	189
9	**Otras Acciones "a Falta de"**	**191**
9.1	Ningún mantenimiento programado	191
9.2	Rediseño	192
9.3	Recorridas de inspección	201
10	**El Diagrama de Decisión de RCM**	**202**
10.1	Integración de consecuencias y tareas	202
10.2	El Proceso de decisión de RCM	202
10.3	Llenado de la hoja de decisión	213
10.4	La computadora (el ordenador) y RCM	215

11 Implementando las Recomendaciones de RCM **216**
11.1 Implementación – Los pasos clave 216
11.2 La auditoria de RCM 218
11.3 Descripción de tareas 222
11.4 Implementando cambios a realizar por única vez 224
11.5 Grupos de tareas 225
11.6 Sistemas de planeamiento y control de mantenimiento 228
11.7 Reportando defectos 237

12 Análisis Actuarial y Datos de Falla **239**
12.1 Los seis patrones de falla 239
12.2 Datos de historia técnica 254

13 Aplicando el Proceso RCM **265**
13.1 ¿Quién sabe? 265
13.2 Los grupos de revisión RCM 270
13.3 Facilitadores 273
13.4 Estrategias de implementación 281
13.5 RCM perdurable 288
13.6 Cómo no debería aplicarse RCM 290
13.7 Desarrollo de habilidades en RCM 295

14 Qué logra el RCM (Beneficios del RCM) **296**
14.1 Midiendo el desempeño de mantenimiento 296
14.2 Efectividad del mantenimiento 297
14.3 Eficiencia del mantenimiento 309
14.4 Qué logramos con RCM 312

15 Una Breve Historia de RCM **322**
15.1 La experiencia de las líneas aéreas 322
15.2 La evolución de RCM2 325
15.3 Otras versiones de RCM y el estándar SAE 327

Apéndice 1: *Jerarquía de los activos y diagramas funcionales de bloque* 331
Apéndice 2: *Error humano* 339
Apéndice 3: *Una función continua de riesgo* 347
Apéndice 4: *Técnicas de monitoreo de condición* 352
Glosario 419
Bibliografía 422
Indice 425

Prólogo a la edición en ESPAÑOL

Este libro RCM2 por John Moubray ha sido traducido al español para satisfacer la creciente demanda de conocimiento aplicable de las avanzadas técnicas de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad en todo el mundo. En este caso en particular, a los lectores de habla hispana tanto en España como en iberoamérica.

Dada la evolución del idoma en las distintas regiones, es ambicioso y a veces imposible satisfacer con un texto único, todas las variantes idioámticas.

El lector podrá comprobar que si en algunos puntos la lectura no parece familiar, esto no dificulta la comprensión de su contenido.

Al pie de esta página, se indican algunos de los términos que difieren en distintas geografías.

Queremos expresar nuestro agradecimiento al autor John Moubray por autorizar y confiarnos la traducción de su libro, editado por primera vez en su versión original en inglés en 1991, para permitir a los innumerables lectores de habla hispana que se interesan por el tema, su lectura fluida en su propio idioma. También corresponde el agradecimiento al equipo de jóvenes profesionales de Ellmann, Sueiro y Asociados que han dedicado centenares de horas para que esta versión española se haga realidad: Luis Benoit, Santiago Sotuyo, Carlos Regueira, Ariel Zylberberg.

Que su lectura enriquezca con los hoy ineludibles conocimientos, la determinación correcta, confiable y costo-eficaz de estrategias de mantenimiento a gerentes y jefes de mantenimiento, de producción, de operaciones, así como a estudiantes y especialistas en otras ramas.

Henry Ellmann

Buenos Aires, enero 2004

España	**Latinoamérica**
el fallo	la falla
coste	costo
instalar	implementar
formar	capacitar
ordenador	computadora
agarrotado	engranado, trancado bloqueado, agripado

Prefacio

La humanidad continúa dependiendo cada día más de la riqueza generada por los negocios altamente mecanizados y automatizados. También dependemos más y más de servicios como la generación ininterrumpida de electricidad o trenes que marchen a horario. Más que nunca, esto depende a su vez de la continua integridad de los activos físicos.

Cuando estos activos fallan, no sólo se socava su capacidad de generar riquezas ni sólo se interrumpen los servicios, sino que nuestra propia supervivencia se ve amenazada. La falla de equipos ha sido una causa fundamental en algunos de los peores accidentes e incidentes ambientales en la historia de la industria –incidentes que le dieron un nuevo significado a nombres como *Amoco Cadiz*, Chernobyl, Bhopal y Piper Alpha. Como resultado de esto, se han vuelto realmente de alta prioridad los procesos por los cuales ocurren estas fallas y lo que debe hacerse para evitarlas, especialmente a medida que se vuelve más firmemente aparente la cantidad de este tipo de fallas que son causadas por las mismas actividades que se supone deben prevenirlas.

La primer industria en tener en cuenta esto fue la industria de la aviación civil internacional. Sobre la base de investigaciones que cambian muchas de nuestras creencias más firmes y sostenidas respecto del mantenimiento, esta industria desarrolló un marco estratégico completamente nuevo de manera que cada activo continúe haciendo aquello que sus usuarios quieren que haga. Esta metodología se conoce dentro de la industria de la aviación como MSG3, y fuera de esta como Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad, o RCM (Reliability-centred Maintenance).

El mantenimiento Centrado en la Confiabilidad se desarrolló durante un período de treinta años. Uno de los acontecimiento principales de su desarrollo fue un reporte comisionado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos para United Airlines y preparado por Stanley Nowlan y Howard Heap en 1978. El reporte brindó una descripción integral del desarrollo y la aplicación del RCM en la industria de la aviación civil, y sentó las bases de la mayoría del trabajo hecho en este campo fuera de la industria aeronáutica en los últimos 15 años.

Desde el comienzo de los 80's, el autor y sus asociados han ayudado a las compañías a aplicar el RCM en cientos de emprendimientos industriales de todo el mundo, trabajo que condujo al desarrollo en 1990 del RCM2 para otras industrias fuera de la industria de la aviación.

La primera edición de este libro (publicado en Inglaterra en 1991 y en USA en 1992) proveyó una comprensible introducción al RCM2.

Desde entonces, la filosofía del RCM continuó desarrollándose, al punto que fue necesario publicar una segunda edición que incorporara los últimos desarrollos. Se agregaron varios capítulos nuevos, mientras que otros se revisaron y ampliaron. Las principales modificaciones fueron:

- En los Capítulos 2 y 3, una revisión integral del rol del análisis funcional y la definición de estados de falla.
- En el Capítulo 4, una visión más amplia y profunda de los modos de falla y el análisis de los efectos en el contexto del RCM, con un énfasis especial en la cuestión de niveles de análisis y del grado de detalle requerido.
- En el Capítulo 5 y en el Anexo 3, se incorporó nuevo material sobre cómo establecer los niveles tolerables de riesgo.
- En el Capítulo 8, se incorporó un método más riguroso para determinar intervalos de búsqueda de fallas.
- El Capítulo 11 se completó con más información sobre recomendaciones en la implementación de RCM, poniendo énfasis en el proceso de auditoria de RCM.
- En el Capítulo 13 se incorporó más información acerca de cómo se debe (y cómo no) aplicar RCM, incluyendo un enfoque más integral sobre el papel del facilitador de RCM.
- Nuevo material sobre la medición del desempeño global del mantenimiento, en el Capítulo 14.
- En el Apéndice 1 se hizo una breve revisión sobre la jerarquía de los activos, junto con un sumario del papel (frecuentemente exagerado) que juegan en la aplicación de RCM la jerarquía funcional y los diagramas funcionales de bloque.
- En el Apéndice 2 se hace una revisión de los distintos tipos de errores humanos, y el papel que juegan en las fallas de los activos físicos.
- La adición de no menos de 50 nuevas técnicas al apéndice sobre monitoreo de condición (ahora Apéndice 4).

Este libro esta dirigido a gerentes de mantenimiento, producción y operaciones que deseen aprender qué es el RCM, qué logra y cómo es aplicado. También brinda a los estudiantes de negocios y administración un libro de texto comprensible sobre la formulación de estrategias para el manejo de activos físicos (como opuesto a activos financieros). Finalmente, el libro será de un valor incalculable para estudiantes de todas las ramas de la ingeniería que deseen entender acerca de la formulación de estrategias modernas de mantenimiento. Esta diseñado para ser leído en tres niveles:

- El Capítulo 1 fue escrito para aquellos que solo desean revisar los elementos claves del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.
- Los Capítulos 2 a 10 describen los elementos principales de la tecnología del RCM, y será de mayor valor para aquellos que deseen un entendimiento razonable de los aspectos técnicos de la materia.
- Los capítulos restantes son para aquellos que deseen saber más acerca de los aspectos técnicos e históricos del RCM (Capítulos 12 y 15), sobre los pasos fundamentales involucrados en la implementación de las recomendaciones del RCM (Capítulo 11), sobre cómo debe ser aplicado el proceso RCM, y qué se obtiene mediante el RCM (Capítulo 14).

JOHN MOUBRAY

Asheville, North Carolina
Mayo del 2000

Reconocimientos

Sólo ha sido posible escribir este libro con la ayuda de una gran cantidad de personas de todo el mundo. En especial, quisiera registrar mi permanente gratitud a cada uno de los cientos de personas con quienes he tenido el privilegio de trabajar en los últimos 10 años, cada uno de los cuales ha contribuido en algo con el material contenido en estas páginas.
Además, quisiera brindar un tributo especial a un número de personas que jugaron un papel fundamental, ayudando a desarrollar y refinar la filosofía RCM al punto discutido en esta edición de este libro.
Primero, un agradecimiento especial es debido al difunto Stan Nowlan, por sentar las bases para el desarrollo de ambas ediciones de este libro tan minuciosamente, tanto a través de sus escrituras como de su persona, y a todos sus colegas en la industria de la aviación civil, por su trabajo pionero en este campo.
También es debido un agradecimiento especial al Dr Mark Horton, por su ayuda en el desarrollo de varios de los conceptos volcados en los capítulos 5 y 8, y a Peter Stock por investigar y ayudar a realizar el Apéndice 4.
También estoy en deuda con todos los miembros de la red Aladon por su ayuda en la aplicación de los conceptos, y por su permanente retorno acerca de lo que funciona y de lo que no funciona, mucho de lo cual es también reflejado en estas páginas. Destacándose entre estos están mis colegas Joel Black, Chris James, Hugh Colman y Ian Hipkin, y mis asociados Alan Katchmar, Frat Amarra, Phil Clarke, Kleber Siqueira, Alun Roberts, Michael Hawdon, Henry Ellmann, Ray Peden, Simon Deakin, Tony Landi, Paul Mills y Theuns Koekemoer.
Entre los varios clientes que han probado y continúan probando que el RCM es una fuerza viable en la industria, estoy especialmente en deuda con los siguientes:
Gino Palarchio y Ron Thomas de Dofasco Steel
Mike Hopcraft, Terry Belton y Barry Camina de Ford de Europa
Joe Campbell de British Steel Corporation
Vincent Ryan y Frank O'Connor de Irish Electricity Supply Board
Francis Cheng de Hong Kong Electric
Nancy Regan de US Naval Air Command
Denis Udy, Roger Crouch, Kevin Weedon y Malcolm Regler de Royal Navy

Don Turner y Trevor Ferrer, de China Light & Power
Dick Pettigrew de Rohm & Haas
Los roles jugados por Don Humhrey, Richard Hall, Brian Davies, Tom Edwards, David Willson, y el fallecido Joe Versteeg ayudando a desarrollar o difundir los conceptos discutidos en este libro también son reconocidos con gratitud.
Quizás el desarrollo reciente más importante en el campo del RCM sea la publicación en Agosto de 1999 de la Norma SAE JA 1011: "*Evaluation Criteria for Reliability-centered Maintenance Processes*". Este estándar está jugando un rol fundamental en clarificar qué es (y qué no es) el RCM.
Estos reconocimientos serían incompletos sin un agradecimiento especial, de parte mía y de todo aquel interesado en el cuidado responsable de los activos físicos, al rol fundamental de Dana Netherton, presidente del comité RCM de la SAE, en la realización de la norma.
Finalmente, una especial palabra de agradecimiento a mi familia por crear una atmósfera en la que fuera posible escribir ambas ediciones de este libro, y a Aladon Ltd por el permiso para reproducir las Hojas de Información y Decisión RCM y el Diagrama de Decisión RCM2.

Addendum

John Moubray falleció de un ataque al corazón en enero 2004. Su contribución al mundo de gestión de activos físicos siempre será recordada.

1 Introducción al Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad.

1.1 El Cambiante Mundo del Mantenimiento

Durante los últimos veinte años, el Mantenimiento ha cambiado, quizás más que cualquier otra disciplina gerencial. Estos cambios se deben principalmente al enorme aumento en número y en variedad de los activos físicos (planta, equipamiento, edificaciones) que deben ser mantenidos en todo el mundo, diseños más complejos, nuevos métodos de mantenimiento, y una óptica cambiante en la organización del mantenimiento y sus responsabilidades.

El Mantenimiento también está respondiendo a expectativas cambiantes. Estas incluyen una creciente toma de conciencia para evaluar hasta qué punto las fallas en los equipos afectan a la seguridad y al medio ambiente; conciencia de la relación entre el mantenimiento y la calidad del producto, y la presión de alcanzar una alta disponibilidad en la planta y mantener acotado el costo.

Estos cambios están llevando al límite las actitudes y habilidades en todas las ramas de la industria. El personal de Mantenimiento se ve obligado a adoptar maneras de pensar completamente nuevas, y actuar como ingenieros y como gerentes. Al mismo tiempo las limitaciones de los sistemas de mantenimiento se hacen cada vez más evidentes, sin importar cuanto se hayan computarizado.

Frente a esta sucesión de grandes cambios, los gerentes en todo el mundo están buscando un nuevo acercamiento al Mantenimiento. Quieren evitar arranques fallidos y callejones sin salida que siempre acompañan a los grandes cambios. *Buscan en cambio una estructura estratégica que sintetice los nuevos desarrollos en un modelo coherente, para luego evaluarlo y aplicar el que mejor satisfaga sus necesidades y las de la compañía.*

Este libro describe una filosofía que provee ciertamente dicha estructura, llamada Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad, o RCM.

Si es aplicado correctamente, el RCM transforma las relaciones entre los activos físicos existentes, quienes lo usan y las personas que los operan y mantienen. A su vez permite que nuevos bienes o activos sean puestos en servicio con gran efectividad, rapidez y precisión.

Éste capítulo provee una breve introducción al RCM, empezando con un vistazo sobre la evolución del mantenimiento en los últimos cincuenta años.

Desde la década del '30 se puede seguir el rastro de la evolución del mantenimiento a través de tres generaciones. El RCM está tornándose rápidamente en la piedra fundamental de la Tercera Generación, pero esta generación sólo se puede ver en perspectiva, y a la luz de la Primera y Segunda Generación.

La Primera Generación

La Primera Generación cubre el período que se extiende hasta la Segunda Guerra Mundial. En esos días la industria no estaba altamente mecanizada, por lo que el tiempo de parada de máquina no era de mayor importancia. Esto significaba que la prevención de las fallas en los equipos no era una prioridad para la mayoría de los gerentes. A su vez la mayor parte de los equipos era simple, y la gran mayoría estaban sobredimensionados. Esto los hacía confiables y fáciles de reparar. Como resultado no había necesidad de un mantenimiento sistemático más allá de una simple rutina de limpieza, servicio y lubricación. Se necesitaban menos habilidades para realizar el mantenimiento que hoy en día.

La Segunda Generación

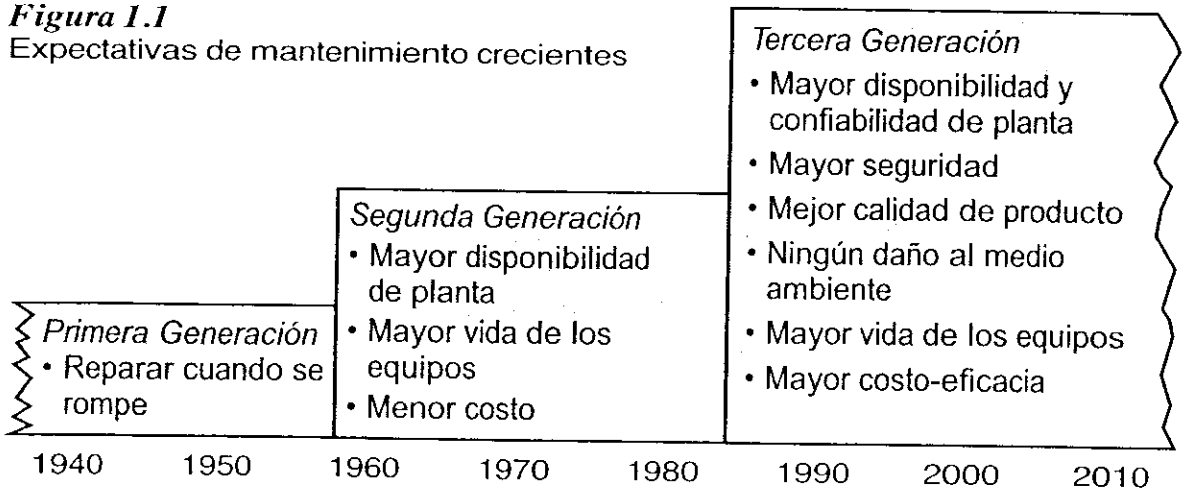
Durante la Segunda Guerra Mundial todo cambió drásticamente. La presión de los tiempos de guerra aumentó la demanda de todo tipo de bienes, al mismo tiempo que decaía abruptamente el número de trabajadores industriales. Esto llevó a un aumento en la mecanización. Ya en los años '50 había aumentado la cantidad y complejidad de todo tipo de máquinas. La industria estaba empezando a depender de ellas.

Al incrementarse esta dependencia, comenzó a concentrarse la atención en el tiempo de parada de máquina. Esto llevó a la idea de que las fallas en los equipos podían y debían ser prevenidas, dando lugar al concepto de *mantenimiento preventivo*. En la década del sesenta esto consistió principalmente en reparaciones mayores a intervalos regulares prefijados.

El costo del mantenimiento comenzó a crecer rápidamente con relación a otros costos operacionales. Esto llevó al desarrollo de *sistemas de planeamiento y control del mantenimiento*. Estos ciertamente ayudaron a tener el mantenimiento bajo control y han sido establecidos como parte de la práctica del mantenimiento.

Por último, la suma de capital ligado a activos fijos junto con un elevado incremento en el costo de ese capital, llevó a la gente a buscar la manera de maximizar la vida útil de estos activos/ bienes.

Figura 1.1
Expectativas de mantenimiento crecientes



La Tercera Generación

Desde mediados de la década del setenta el proceso de cambio en la industria ha adquirido aún más impulso. Los cambios han sido clasificados en: *nuevas expectativas, nuevas investigaciones*, y *nuevas técnicas*.

Nuevas Expectativas

La figura 1.1 muestra la evolución de las expectativas de mantenimiento.

El *tiempo de parada de máquina* afecta la capacidad de producción de los activos físicos al reducir la producción, aumentar los costos operacionales, y afectar el servicio al cliente. En las décadas del sesenta y setenta esto ya era una preocupación en los sectores mineros, manufactureros y de transporte. Los efectos del tiempo de parada de máquina fueron agravados por la tendencia mundial hacia sistemas "just-in-time", donde los reducidos inventarios de material en proceso hacen que una pequeña falla en un equipo probablemente hiciera parar toda la planta. Actualmente el crecimiento en la mecanización y la automatización han tornado a la *confiabilidad* y a la *disponibilidad* en factores clave en sectores tan diversos como el cuidado de la salud, el procesamiento de datos, las telecomunicaciones y la administración de edificios.

Una mayor automatización también significa que más y más fallas afectan nuestra capacidad de mantener *parámetros de calidad* satisfactorios. Esto se aplica tanto para parámetros de servicio como para la calidad del producto. Por ejemplo, las fallas en los equipos pueden afectar el control del clima en los edificios o la puntualidad de las redes de transporte, así como interferir con el logro de las tolerancias deseadas en la producción.

Más y más fallas acarrean serias consecuencias para *el medio ambiente* o *la seguridad*, al tiempo que se elevan los requisitos en estas áreas. En algunas partes del mundo se ha llegado a un punto en que las organizaciones deben,

o bien adecuarse a las expectativas de seguridad y cuidado ambiental de la sociedad, o dejar de operar. Nuestra dependencia a la integridad de nuestros activos físicos cobra ahora una nueva magnitud que va más allá del costo, y que se torna una cuestión de supervivencia de la organización.

Al mismo tiempo que crece nuestra dependencia a los activos físicos, crece también el *costo de tenerlos y operarlos*. Para asegurar el máximo retorno de la inversión que representa tenerlos, deben mantenerse trabajando eficientemente tanto tiempo como se requiera. Por último el *costo de mantenimiento* aún está aumentando, tanto en términos absolutos como en proporción del gasto total. En algunas industrias representa ahora el segundo ítem más alto, o hasta el más alto costo operativo. En consecuencia, en sólo treinta años ha pasado de ser un costo casi sin importancia a estar en la más alta prioridad en el control de costos.

Nuevas Investigaciones

Más allá de la existencia de mayores expectativas, las nuevas investigaciones están cambiando muchas de nuestras creencias más profundas referidas a la edad y las fallas. En particular, parece haber cada vez menos conexión entre la edad de la mayoría de los activos y la probabilidad de que estos fallen.

La figura 1.2 muestra como en un principio la idea era simplemente que a medida que los elementos envejecían eran más propensos a fallar. Una creciente conciencia de la "mortalidad infantil" llevó a la Segunda Generación a creer en la curva de "bañera", o "bañadera".

Sin embargo, investigaciones en la Tercera Generación revelan no uno ni dos sino *seis* patrones de falla que realmente ocurren en la práctica. Como se discutirá con mayor detalle en este capítulo, una de las conclusiones más importantes que se deduce de estos estudios es que un gran número de tareas que surgen de los conceptos tradicionales de mantenimiento, a pesar de que se realicen exactamente como se planeó, no logran ningún resultado, mientras que otras son contraproducentes y hasta peligrosas. Esto es especialmen-

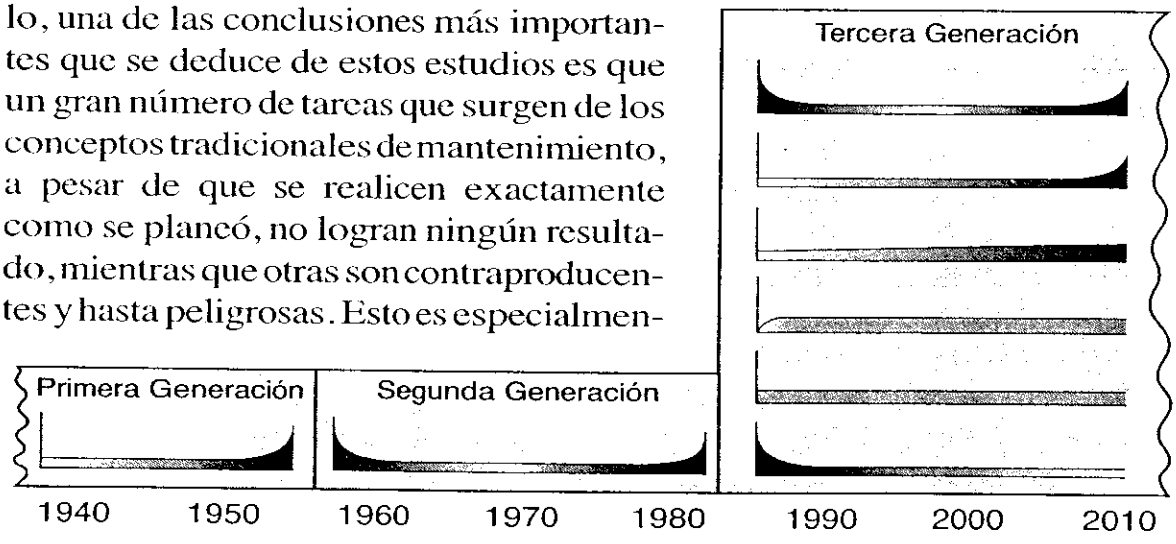


Figura 1.2 Cambios en los puntos de vista sobre la falla de equipos

te cierto con muchas de las tareas que se hacen en nombre del mantenimiento preventivo. Por otro lado, para operar con seguridad los sistemas industriales más modernos y complejos se necesitan realizar un gran número de tareas que no figuran en los programas de mantenimiento.

En otras palabras, la industria en general es devota a prestar mucha atención para hacer las tareas de mantenimiento correctamente (hacer correctamente el trabajo), pero se necesita hacer mucho más para asegurarse que los trabajos que se planean son los trabajos que deben hacerse (hacer el trabajo correcto).

Nuevas Técnicas

Ha habido un crecimiento explosivo de nuevos conceptos y técnicas de mantenimiento. Cientos de ellos han sido desarrollados en los últimos veinte años, y emergen aún más cada semana.

La Figura 1.3 muestra como ha crecido el énfasis en los clásicos sistemas administrativos y de control para incluir nuevos desarrollos en diferentes áreas. Los nuevos desarrollos incluyen:

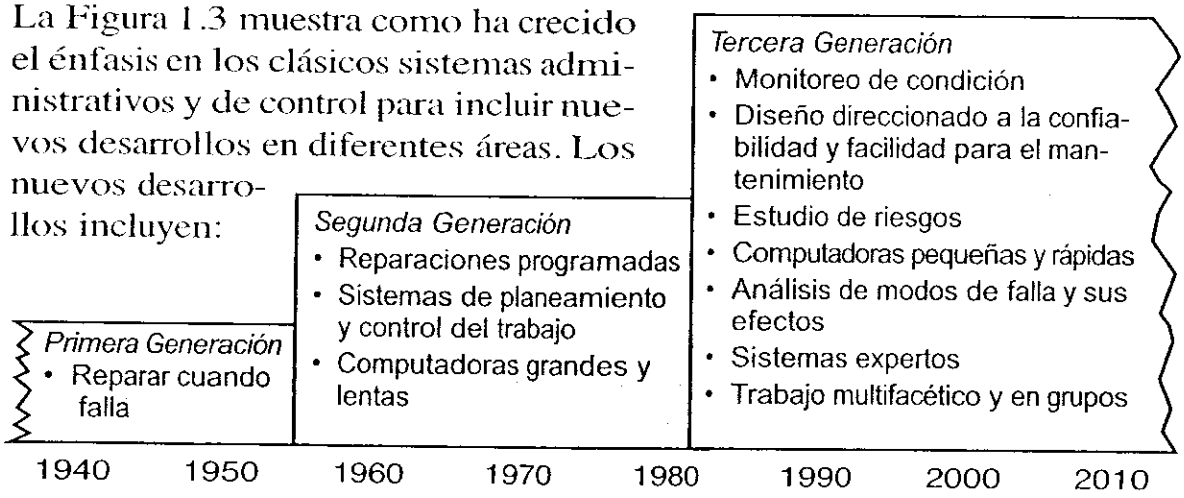


Figura 1.3: Cambios en las técnicas de Mantenimiento

- *Herramientas de soporte para la toma de decisiones,* tales como el estudio de riesgo, análisis de modos de falla y sus efectos, y sistemas expertos.
- *Nuevos métodos de mantenimiento,* tal como el monitoreo de condición.
- *Diseño de equipos,* con un mayor énfasis en la confiabilidad y facilidad para el mantenimiento.
- *Un drástico cambio en el modo de pensar la organización* hacia la participación, trabajo en grupo y flexibilidad.

Como se dijo anteriormente, uno de los mayores desafíos que enfrenta el personal de mantenimiento es no sólo aprender qué son estas técnicas sino decidir cuáles valen la pena y cuáles no para sus propias organizaciones. Si hacemos elecciones adecuadas es posible mejorar el rendimiento de los

activos *y al mismo tiempo* contener y hasta reducir el costo del mantenimiento. Si hacemos elecciones inadecuadas se crean nuevos problemas mientras empeoran los que ya existen.

Los desafíos que enfrenta el mantenimiento
La primer industria que enfrentó estos desafíos sistemáticamente fue la industria de la aviación comercial. El elemento crucial que provocó esta reacción, fue el darse cuenta que se debe dedicar tanto esfuerzo en asegurarse que se están realizando las tareas correctamente como en asegurarse que se están haciendo las tareas correctas. El darse cuenta de esto dio lugar al desarrollo de procesos de tomas de decisión comprensivos que se conocieron dentro de la industria aeronáutica con el nombre de MSNG3 y fuera de esta como Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad o RCM.

En casi todos los campos de esfuerzos humanos organizados, RCM se está volviendo fundamental para la custodia responsable de los activos físicos de la misma manera que lo es la contabilidad de doble entrada para la custodia responsable de los activos financieros. No existe ninguna otra técnica comparable para determinar la cantidad mínima segura de tareas que deben ser hechas para preservar las funciones de los activos físicos, especialmente en situaciones críticas o peligrosas. El creciente reconocimiento mundial del papel fundamental que juega el RCM en la formulación de las estrategias de administración de activos físicos -- y la importancia de aplicar RCM correctamente – condujo a la American Society of Automotive Engineers[1999] a publicar la norma SAE JA1011: *"Criterio de Evaluación del Proceso de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)"*.

El proceso descripto en los capítulos 2 a 10 de este libro cumple con esta norma. El resto del libro discute la manera en que debe aplicarse RCM y como pueden implementarse las políticas de manejo de fallas basadas en RCM, además de dar más sustento a los puntos técnicos clave.

1.2 Mantenimiento y RCM

Desde el punto de vista de la ingeniería hay dos elementos que hacen al manejo de cualquier activo físico. Debe ser mantenido y de tanto en tanto quizás también necesite ser modificado.

Los diccionarios más importantes definen *mantener* como *causar que continúe* (Oxford), o *conservar su estado existente* (Webster), *o conservar cada cosa en su ser* (Real Academia Española). Esto sugiere que "mantenimiento" significa preservar algo. Por otro lado, están de acuerdo con que

modificar algo significa *cambiarlo* de alguna manera. Esta diferencia entre mantener y modificar tiene profundas implicancias que se discutirán con detenimiento en los capítulos siguientes. De cualquier manera, en este momento nos centralizamos en el mantenimiento.

Cuando nos disponemos a mantener algo, ¿Qué es eso que deseamos *causar que continúe*?, ¿Cuál es el *estado existente* que deseamos preservar?

La respuesta a estas preguntas está dada por el hecho de que todo activo físico es puesto en funcionamiento porque alguien quiere que haga algo, en otras palabras, se espera que cumpla una función o ciertas funciones específicas. Por ende al mantener un activo, el estado que debemos preservar es aquel en el que continúe haciendo aquello que los usuarios quieran que haga.

Mantenimiento: asegurar que los activos físicos continúen haciendo lo que sus usuarios quieren que hagan

Los requerimientos de los usuarios van a depender de dónde y cómo se utilice el activo (contexto operacional). Esto lleva a la siguiente definición formal de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad:

Mantenimiento Centrado en Confiabilidad: un proceso utilizado para determinar qué se debe hacer para asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que haga en su contexto operacional actual.

1.3 RCM: Las siete preguntas básicas

El proceso de RCM formula siete preguntas acerca del activo o sistema que se intenta revisar:

- ***¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociados al activo en su actual contexto operacional?***
- ***¿De qué manera falla en satisfacer dichas funciones?***
- ***¿Cuál es la causa de cada falla funcional?***
- ***¿Qué sucede cuando ocurre cada falla?***
- ***¿En qué sentido es importante cada falla?***
- ***¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir cada falla?***
- ***¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada?***

Estas preguntas son desarrolladas brevemente en los párrafos siguientes, y abordadas en detalle en los capítulos 2 a 10.

Funciones y Parámetros de Funcionamiento

Antes de poder aplicar un proceso para determinar qué debe hacerse para que cualquier activo físico continúe haciendo aquello que sus usuarios quieren que haga en su contexto operacional, necesitamos hacer dos cosas:

- determinar qué es lo que sus usuarios quieren que haga
- asegurar que es capaz de realizar aquello que sus usuarios quieren que haga

Por esto el primer paso en el proceso de RCM es definir las funciones de cada activo en su contexto operacional, junto con los parámetros de funcionamiento deseados. Lo que los usuarios esperan que los activos sean capaces de hacer puede ser dividido en dos categorías:

- *funciones primarias*, que en primera instancia resumen el por qué de la adquisición del activo. Esta categoría de funciones cubre temas como velocidad, producción, capacidad de almacenaje o carga, calidad de producto y servicio al cliente.
- *funciones secundarias*, la cual reconoce que se espera de cada activo que haga más que simplemente cubrir sus funciones primarias. Los usuarios también tienen expectativas relacionadas con las áreas de seguridad, control, contención, confort, integridad estructural, economía, protección, eficiencia operacional, cumplimiento de regulaciones ambientales, y hasta de apariencia del activo.

Los usuarios de los activos generalmente están en la mejor posición por lejos para saber exactamente qué contribuciones físicas y financieras hace el activo para el bienestar de la organización como un todo. Por ello es esencial que estén involucrados en el proceso de RCM desde el comienzo.

Si es hecho correctamente, este paso toma alrededor de un tercio del tiempo que implica un análisis RCM completo. Además hace que el grupo que realiza el análisis logre un aprendizaje considerable - muchas veces una cantidad alarmante - acerca de la forma en que realmente funciona el equipo.

Las Funciones serán exploradas en mayor detalle en el Capítulo 2.

Fallas Funcionales

Los objetivos del mantenimiento son definidos por las funciones y expectativas de funcionamiento asociadas al activo en cuestión. Pero, ¿Cómo puede el mantenimiento alcanzar estos objetivos?

El único hecho que puede hacer que un activo no pueda desempeñarse conforme a los parámetros requeridos por sus usuarios es alguna clase de

falla. Esto sugiere que el mantenimiento cumple sus objetivos al adoptar una política apropiada para el manejo de una falla. Sin embargo, antes de poder aplicar una combinación adecuada de herramientas para el manejo de una falla, necesitamos identificar qué fallas pueden ocurrir.
El proceso de RCM lo hace en dos niveles:

- En primer lugar, identifica las circunstancias que llevaron a la falla
- Luego se pregunta qué eventos pueden causar que el activo falle.

En el mundo del RCM, los estados de falla son conocidos como ***fallas funcionales*** porque ocurren cuando el activo *no puede cumplir una función de acuerdo al parámetro de funcionamiento que el usuario considera aceptable*.

Sumado a la incapacidad total de funcionar, esta definición abarca fallas parciales en las que el activo todavía funciona pero con un nivel de desempeño inaceptable (incluyendo las situaciones en las que el activo no puede mantener los niveles de calidad o precisión). Evidentemente estas sólo pueden ser identificadas luego de haber definido las funciones y parámetros de funcionamiento del activo.

El Capítulo 3 explicará las fallas funcionales con detenimiento.

Modos de Falla

Como se mencionó en el párrafo anterior, una vez que se ha identificado cada falla funcional, el próximo paso es tratar de identificar todos los *hechos que de manera razonablemente posible puedan haber causado cada estado de falla*. Estos hechos se denominan ***modos de falla***. Los modos de falla "razonablemente posibles" incluyen aquellos que han ocurrido en equipos iguales o similares operando en el mismo contexto, fallas que actualmente están siendo prevenidas por regímenes de mantenimiento existentes, así como fallas que aún no han ocurrido pero son consideradas altamente posibles en el contexto en cuestión.

La mayoría de las listas tradicionales de modos de falla incorporan fallas causadas por el deterioro o desgaste por uso normal. Sin embargo, para que todas las causas probables de fallas en los equipos puedan ser identificadas y resueltas adecuadamente, esta lista debería incluir fallas causadas por errores humanos (por parte de los operadores y el personal de mantenimiento), y errores de diseño. También es importante identificar la causa de cada falla con suficiente detalle para asegurarse de no desperdiciar tiempo y esfuerzo intentando tratar síntomas en lugar de causas reales. Por otro lado es igualmente importante asegurarse de no malgastar el tiempo en el análisis mismo al concentrarse demasiado en los detalles.

Efectos de Falla

El cuarto paso en el proceso de RCM tiene que ver con hacer un listado de los **efectos de falla,** que describen lo que ocurre con cada modo de falla. Esta descripción debería incluir toda la información necesaria para apoyar la evaluación de las consecuencias de la falla, tal como:

- Qué evidencia existe (si la hay) de que la falla ha ocurrido
- De qué modo representa una amenaza para la seguridad o el medio ambiente (si la representa)
- De qué manera afecta a la producción o a las operaciones (si las afecta)
- Qué daños físicos (si los hay) han sido causados por la falla
- Qué debe hacerse para reparar la falla

Los modos y efectos de falla son abordados en detalle en el Capítulo 4.

El proceso de identificar funciones, fallas funcionales, modos de falla, y efectos de falla trae asombrosas y muchas veces apasionantes oportunidades de mejorar el rendimiento y la seguridad, así como también de eliminar el desperdicio.

Consecuencias de la Falla

Un análisis detallado de la empresa industrial promedio probablemente muestre entre tres mil y diez mil posibles modos de falla. Cada una de estas fallas afecta a la organización de algún modo, pero en cada caso, los efectos son diferentes. Pueden afectar operaciones. También pueden afectar a la calidad del producto, el servicio al cliente, la seguridad o el medio ambiente. Todas para ser reparadas tomarán tiempo y costarán dinero.

Son estas consecuencias las que más influencian el intento de prevenir cada falla. En otras palabras, si una falla tiene serias consecuencias, haremos un gran esfuerzo para intentar evitarla. Por otro lado, si no tiene consecuencias o tiene consecuencias leves, quizás decidamos no hacer más mantenimiento de rutina que una simple limpieza y lubricación básica.

Un punto fuerte del RCM es que reconoce que las consecuencias de las fallas son más importantes que sus características técnicas. De hecho reconoce que la única razón para hacer cualquier tipo de mantenimiento proactivo no es evitar las fallas *per se* sino evitar o reducir las *consecuencias* de las fallas. El proceso de RCM clasifica estas consecuencias en cuatro grupos, de la siguiente manera:

- ***Consecuencias de fallas ocultas:*** las fallas ocultas no tienen un impacto directo, pero exponen a la organización a fallas múltiples con consecuencias serias y hasta catastróficas. (La mayoría están asociadas a sistemas de protección sin seguridad inherente)

- ***Consecuencias ambientales y para la seguridad:*** una falla tiene consecuencias para la seguridad si es posible que cause daño o la muerte a alguna persona. Tiene consecuencias ambientales si infringe alguna normativa o reglamento ambiental tanto corporativo como regional, nacional o internacional.
- ***Consecuencias Operacionales:*** Una falla tiene consecuencias operacionales si afecta la producción (cantidad, calidad del producto, atención al cliente, o costos operacionales además del costo directo de la reparación).
- ***Consecuencias No-Operacionales:*** Las fallas que caen en esta categoría no afectan a la seguridad ni la producción, sólo implican el costo directo de la reparación.

Como veremos luego el proceso de RCM hace uso de estas categorías como la base de su marco de trabajo estratégico para la toma de decisiones en el mantenimiento. Obligando a realizar una revisión de las consecuencias de cada modo de falla en relación con las categorías recién mencionadas, integra los objetivos operacionales, ambientales, y de seguridad a la función mantenimiento. Esto contribuye a colocar a la seguridad y al medio ambiente dentro de las prioridades principales de la administración del mantenimiento.

El proceso de evaluación de las consecuencias también cambia el énfasis de la idea de que *toda* falla es negativa y debe ser prevenida. De esta manera focaliza la atención sobre las actividades de mantenimiento que tienen el mayor efecto sobre el desempeño de la organización, y resta importancia a aquellas que tienen escaso resultado. También nos alienta a pensar de una manera más amplia acerca de diferentes maneras de manejar las fallas, más que concentrarnos en prevenir fallas. Las técnicas de manejo de fallas se dividen en dos categorías:

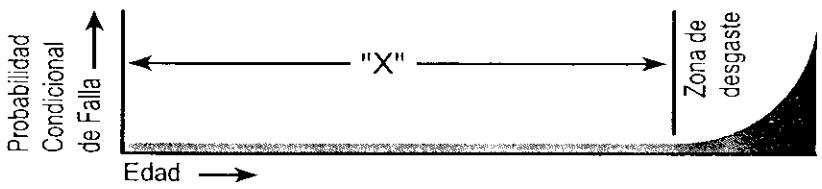
- *Tareas proactivas:* estas tareas se emprenden antes de que ocurra una falla, para prevenir que el ítem llegue al estado de falla. Abarcan lo que se conoce tradicionalmente como mantenimiento "predictivo" o "preventivo", aunque veremos luego que el RCM utiliza los términos *reacondicionamiento cíclico*, *sustitución cíclica*, y *mantenimiento a condición*.
- *Acciones a falta de:* estas tratan directamente con el estado de falla, y son elegidas cuando no es posible identificar una tarea proactiva efectiva. Las acciones *a falta de* incluyen *búsqueda de falla*, *rediseño*, y *mantenimiento a rotura*.

El proceso de evaluación de las consecuencias es abordado brevemente en otra parte de este capítulo y en detalle luego en el Capítulo 5. La sección siguiente en este capítulo trata el tema de las tareas proactivas en mayor profundidad.

Tareas Proactivas

Mucha gente todavía cree que la mejor manera de optimizar la disponibilidad de la planta es hacer algún tipo de mantenimiento proactivo de rutina. El pensamiento de la Segunda Generación sugería grandes reparaciones, o reposición de componentes a intervalos fijos. La figura 1.4 muestra la perspectiva de la falla a intervalos regulares.

Figura 1.4: La perspectiva tradicional de la falla



La figura 1.4 se basa en la presunción de que la mayoría de los equipos operan confiablemente por un período "X", y luego se desgastan. El pensamiento clásico sugiere que los registros extensivos acerca de las fallas nos permiten determinar y planear acciones preventivas un tiempo antes de que ellas ocurran.

Este patrón es cierto para algunos tipos de equipos simples, y para algunos ítems complejos con modos de falla dominantes. En particular las características de desgaste se encuentran a menudo en casos en los que el equipo tiene contacto directo con el producto. Las fallas relacionadas con la edad frecuentemente van asociadas a la fatiga, corrosión, abrasión y evaporación.

Sin embargo, los equipos en general son mucho más complejos de lo que eran hace veinte años atrás. Esto ha traído aparejado sorprendentes cambios en los patrones de falla, como lo muestra la Figura 1.5. Los gráficos muestran la probabilidad condicional de la falla con relación a la edad operacional para una variedad de elementos mecánicos y eléctricos.

El patrón A es la ya conocida curva de la "bañadera". Comienza con una gran incidencia de fallas (llamada *mortalidad infantil*), se-

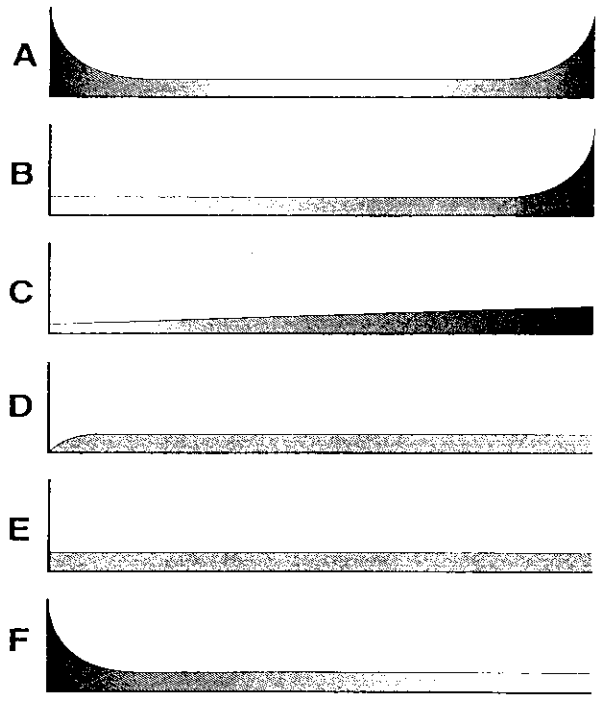


Figura 1.5: Seis patrones de falla

guida por un incremento constante o gradual de la probabilidad condicional de falla, y por último una zona de desgaste.

El patrón B muestra una probabilidad condicional de falla constante o de lento incremento, y que termina en una zona de desgaste (igual que la Figura 1.4).

El patrón C muestra una probabilidad condicional de falla que crece lentamente, pero no tiene una edad de desgaste claramente identificable. El patrón D muestra una baja probabilidad condicional de falla cuando el equipo es nuevo o recién salido de la fábrica y luego un veloz incremento a un nivel constante, mientras que el patrón E muestra una probabilidad condicional de falla constante a todas las edades por igual (falla al azar). El patrón F comienza con una alta mortalidad infantil que finalmente cae a una probabilidad de falla constante o que asciende muy lentamente.

Estudios realizados en aeronaves comerciales demostraron que un 4% de los elementos correspondían al patrón A, un 2% al B, un 5% al C, un 7% al D, un 14% al E, y no menos de un *68% al patrón F*. (El número de veces que estos patrones ocurren en aeronaves no es necesariamente el mismo que en la industria, pero no cabe duda de que a medida que los elementos se hacen más complejos, encontramos cada vez más patrones E y F).

Estos descubrimientos contradicen la creencia de que siempre hay conexión entre la confiabilidad y la edad operacional. Esta creencia dio origen a la idea de que cuanto más seguido un ítem es reparado, menos posibilidades tiene de fallar. Actualmente esto es cierto en muy pocos casos. A menos que exista un modo de falla dominante relacionado con la edad, los límites de edad tienen que ver poco o nada con mejorar la confiabilidad de los componentes complejos. De hecho las reparaciones pueden en realidad aumentar los promedios de fallas generales al introducir la mortalidad infantil en sistemas que de otro manera serían estables.

La toma de conciencia de estos hechos ha llevado a algunas organizaciones a abandonar por completo la idea de mantenimiento proactivo. Y esto puede que sea lo más acertado para fallas con consecuencias menores. Pero cuando las consecuencias de las fallas son importantes, *algo* debe hacerse para prevenir o predecir las fallas, o al menos para reducir las consecuencias.

Esto nos lleva nuevamente a la cuestión de las tareas proactivas. Como ya mencionamos anteriormente el RCM divide a las tareas proactivas en tres categorías:

- Tareas de reacondicionamiento cíclicas
- Tareas de sustitución cíclicas
- Tareas a condición

Tareas de reacondicionamiento y sustitución cíclicas

El reacondicionamiento cíclico implica refabricar un componente o reparar un conjunto antes de un límite de edad específico sin importar su condición en ese momento. De manera parecida, las tareas de sustitución cíclica implican sustituir un componente antes de un límite de edad específico, más allá de su condición en ese momento.

En conjunto estos dos tipos de tareas son conocidos generalmente como mantenimiento *preventivo*. Solían ser los tipos de mantenimiento proactivo más ampliamente usados. Sin embargo, debido a las razones mencionadas anteriormente, se usan mucho menos que veinte años atrás.

Tareas a condición

El crecimiento de nuevos tipos de manejo de falla se debe a la continua necesidad de prevenir ciertos tipos de falla, y la creciente ineficacia de las técnicas clásicas para hacerlo. La mayoría de las nuevas técnicas se basan en el hecho de que la mayoría de las fallas dan algún tipo de advertencia de que están por ocurrir. Estas advertencias se denominan ***fallas potenciales***, y se definen como *condiciones físicas identificables que indican que una falla funcional está por ocurrir o están en el proceso de ocurrir*.

Las nuevas técnicas son utilizadas para detectar fallas potenciales y permitir actuar evitando las posibles consecuencias que surgirían si se transformaran en fallas funcionales. Se llaman tareas *a condición* porque los componentes se dejan en servicio *a condición* de que continúen alcanzando los parámetros de funcionamiento deseados. (El mantenimiento a condición incluye el *mantenimiento predictivo*, *mantenimiento basado en la condición* y *monitoreo de condición*)

Si son utilizadas correctamente, las tareas a condición son una muy buena manera de manejar las fallas, pero a la vez pueden ser una pérdida de tiempo costosa. RCM permite tomar decisiones en esta área con certeza particular.

Acciones a falta de

El RCM reconoce tres grandes categorías de acciones *a falta de*:

- *búsqueda de fallas:* las tareas de búsqueda de falla implican revisar periódicamente funciones ocultas para determinar si han fallado (mientras que las tareas basadas en la condición implican revisar si algo está por fallar)
- *rediseño:* rediseñar implica hacer cambios de una sola vez a las capacidades iniciales de un sistema. Esto incluye modificaciones al equipo y también cubre los cambios de una sola vez a los procedimientos.

- *ningún mantenimiento programado*: como su nombre lo indica, aquí no se hace esfuerzo alguno en tratar de anticipar o prevenir los modos de falla y se deja que la falla simplemente ocurra, para luego repararla. Esta tarea *a falta de* también es llamada mantenimiento "a rotura".

El Proceso de Selección de Tareas de RCM

Un punto fuerte del RCM es la manera en que provee criterios simples, precisos y fáciles de entender, para decidir cuál de las tareas proactivas es *técnicamente factible* en el contexto operacional dado (si existe alguna), y para decidir quién debería hacerlas y con qué frecuencia. Estos criterios son abordados en detalle en los Capítulos 6 y 7.

Si una tarea proactiva es técnicamente factible o no, está determinado por las *características técnicas* de la tarea y de la falla que pretende prevenir. Si vale la pena hacerlo o no depende de la manera en que maneja las *consecuencias* de la falla. De no hallarse una tarea proactiva que sea técnicamente factible y que valga la pena hacerse, entonces debe tomarse una acción *a falta de* adecuada. La esencia del proceso de selección de tareas es el siguiente:

- Para *fallas ocultas*, la tarea proactiva vale la pena si reduce significativamente el riesgo de falla múltiple asociado con esa función a un nivel tolerablemente bajo. Si esto no es posible, debe realizarse una tarea ***de búsqueda de falla***. De no hallarse una tarea de búsqueda de falla que sea adecuada, la decisión *a falta de* secundaria indicará que el componente pueda ser rediseñado (dependiendo de las consecuencias de la falla múltiple).
- Para fallas con consecuencias *ambientales* o para la *seguridad*, una tarea proactiva sólo vale la pena si por sí sola reduce el riesgo de la falla a un nivel muy bajo, o directamente lo elimina. Si no puede encontrarse una tarea que reduzca el riesgo a niveles aceptablemente bajos, entonces ***el componente debe ser rediseñado o debe cambiarse el proceso.***
- Si la falla tiene consecuencias *operacionales*, una tarea proactiva sólo vale la pena si el costo total de realizarla *a lo largo de un cierto período de tiempo* es menor al costo de las consecuencias operacionales más el costo de la reparación en el mismo período de tiempo. En otras palabras, la tarea debe tener *justificación en el terreno económico*. Si no se justifica, la decisión *a falta de* inicial es ***ningún mantenimiento programado.*** (Si esto ocurre y las consecuencias operacionales siguen siendo inaceptables, entonces la decisión *a falta de* secundaria es nuevamente el rediseño).
- Si una falla tiene consecuencias *no operacionales* sólo vale la pena una tarea proactiva si el costo de la tarea a lo largo de un período de tiempo es menor al costo de reparación en el mismo tiempo. Entonces estas tareas

también deben tener *justificación en el terreno económico*. Si no se justifica, la decisión *a falta de* inicial es otra vez ***ningún mantenimiento programado***, y si los costos son demasiado elevados entonces la siguiente decisión *a falta de* secundaria es nuevamente el rediseño.

Este enfoque significa que las tareas proactivas son sólo definidas para las fallas que realmente lo necesitan, lo que a su vez lleva a reducciones sustanciales en cargas de trabajo de rutina. Un menor trabajo de rutina también significa que es más probable que las tareas restantes sean realizadas correctamente. Esto, sumado a la eliminación de tareas contraproducentes, lleva a un mantenimiento más efectivo.

Comparemos esto con el enfoque tradicional usado para el desarrollo de políticas de mantenimiento. Tradicionalmente, los requerimientos de mantenimiento de cada activo son definidos en términos de sus características técnicas reales o asumidas, sin considerar las consecuencias de la falla. El programa resultante es utilizado para todos los activos similares, nuevamente sin considerar que se aplican a diferentes consecuencias en diferentes contextos operacionales. Esto tiene como resultado un gran número de programas desperdiciados, no porque estén 'mal' en el sentido técnico, sino porque no logran ningún resultado.

Debemos notar además que el proceso de RCM considera los requerimientos de mantenimiento de cada activo antes de preguntarse si sería necesario reconsiderar el diseño. Esto es así simplemente porque el ingeniero de mantenimiento que está a cargo *hoy* tiene que mantener el equipo tal como está *hoy*, y no pensando en lo que quizás sea en algún otro momento en el futuro.

1.4 Aplicando el proceso de RCM

Antes de comenzar a analizar los requerimientos de mantenimiento de los activos físicos de cualquier organización, necesitamos saber de qué activos se trata y decidir cuáles de ellos serán sometidos al proceso de revisión de RCM. Esto significa que debe prepararse un registro de planta, si es que no existe actualmente. De hecho la gran mayoría de las organizaciones industriales poseen hoy día registros de planta que son adecuados para este propósito, con lo que este libro sólo hace un repaso de cuáles serían los atributos más deseables de estos registros en el Apéndice 1.

Planeamiento

Si es aplicado correctamente, RCM logra grandes mejoras en la efectividad del mantenimiento, y a menudo lo hace sorprendentemente rápido. Sin embargo, la

aplicación exitosa de RCM depende de un meticuloso planeamiento y preparación. Los elementos centrales del proceso de planeamiento son:

- Decidir cuáles activos físicos se beneficiarán más con el proceso RCM, y exactamente de qué manera lo harán
- Evaluar los recursos requeridos para la aplicación del proceso a los activos seleccionados
- En los casos en los que los beneficios justifican la inversión, decidir detalladamente quién realizará y quién auditará cada análisis, cuándo y dónde, y hacer los arreglos para que dichas personas reciban el entrenamiento apropiado.
- Asegurar que el contexto operacional de cada activo físico esté claramente comprendido.

Grupos de revisión

Hemos visto que el proceso RCM enmarca siete preguntas básicas. En la práctica, el personal de mantenimiento no puede responder a todas estas preguntas por sí solo. Esto es porque muchas de las respuestas (o la mayoría) sólo pueden ser dadas por personal de producción o de operaciones. Esto se aplica especialmente a las preguntas relacionadas con las funciones, efectos de falla, funcionamiento deseado, y consecuencias de falla.

Por esta razón la revisión de los requerimientos de mantenimiento de cualquier activo debería ser llevada a cabo en pequeños grupos que incluyan *al menos* a una persona de la función de mantenimiento, y una de la función de operaciones. La veteranía de los miembros del grupo es menos importante que el hecho de tener un conocimiento profundo del activo físico bajo revisión. Cada miembro del grupo a su vez debe haber sido entrenado en RCM. La conformación típica de un grupo de revisión RCM se muestra en la Figura 1.6.

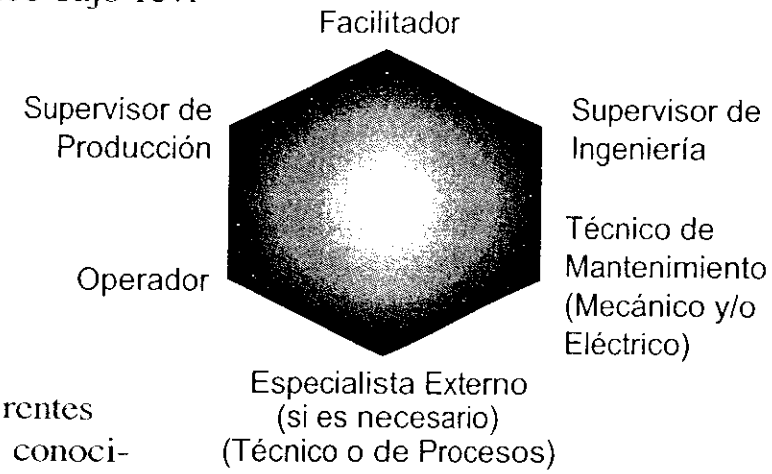


Figura 1.6:
Un típico grupo de revisión RCM

El uso de estos grupos no sólo permite a los gerentes un acceso sistemático al conocimiento y la experiencia de cada miembro del grupo, sino que los

mismos miembros del grupo incrementan marcadamente su entendimiento del activo físico en el contexto operacional.

Facilitadores

Los grupos de revisión RCM trabajan bajo la guía de especialistas en RCM, llamados facilitadores. Son los integrantes más importantes del proceso de revisión RCM. Su rol es asegurar que:

- El análisis RCM se lleve a cabo en el nivel correcto, que los límites del sistema sean claramente definidos, que ningún ítem importante sea pasado por alto, y que los resultados del análisis sean debidamente registrados.
- RCM sea claramente comprendido y correctamente aplicado por parte de los miembros del grupo.
- El grupo llegue al consenso en forma rápida y ordenada, manejando el entusiasmo individual de los miembros.
- El análisis progrese razonablemente rápido y termine a tiempo.

Los facilitadores también trabajan con los directores de proyectos o auspiciantes para asegurar que cada análisis sea debidamente planeado y reciba el apoyo directivo y logístico apropiado.

El tema de los facilitadores y los grupos de revisión RCM se aborda en mayor detalle en el Capítulo 13.

Los resultados de un análisis RCM

Si es aplicado en la forma sugerida anteriormente, un análisis RCM da tres resultados tangibles:

- planes de mantenimiento a ser realizados por el departamento de mantenimiento
- procedimientos de operación revisados, para los operadores del activo
- una lista de cambios que deben hacerse al diseño del activo físico, o a la manera en que es operado, para lidiar con situaciones en las que el mismo no puede proporcionar el funcionamiento deseado con su configuración actual.

Dos resultados menos tangibles son que los participantes del proceso aprenden mucho acerca de como funciona el activo físico, y que suelen tender a funcionar mejor como equipo.

Auditoría e implementación

Inmediatamente después de haber completado la revisión para cada activo físico, los gerentes responsables del equipo deben comprobar que las decisiones tomadas por el grupo sean razonables y defendibles.

Luego de que cada revisión es aprobada, las recomendaciones son implementadas incorporando los planes de mantenimiento a los sistemas de control y planeamiento, incorporando cambios en los procedimientos operacionales estándar del activo físico, y entregando recomendaciones para cambios de diseño a los encargados de realizarlos. Los aspectos centrales de la auditoría y la implementación son tratados en el Capítulo 11.

1.5 Qué logra el RCM

Por más atractivos que sean, los resultados enunciados anteriormente sólo deberían ser vistos como medios para un fin. Específicamente deberían permitir que las funciones de mantenimiento satisfagan las expectativas nombradas en la Figura 1.1 al comienzo de este capítulo. La manera en que lo hacen es resumida en los siguientes párrafos y abordada luego con más detalle en el Capítulo 14.

- ***Mayor seguridad*** e ***integridad ambiental:*** RCM considera las implicancias ambientales y para la seguridad de cada patrón de falla antes de considerar su efecto en las operaciones. Esto significa que se actúa para minimizar o eliminar todos los riesgos identificables relacionados con la seguridad de los equipos y el ambiente. Al incorporar la seguridad a la toma de decisiones de mantenimiento, el RCM también mejora la actitud de las personas en relación con esta tema.
- ***Mejor funcionamiento operacional (cantidad, calidad de producto y servicio al cliente):*** RCM reconoce que todos los tipos de mantenimiento tienen algún valor y provee reglas para decidir cuál es el más adecuado en cada situación. De esta manera se asegura que sólo se elegirán las formas de mantenimiento más efectivas para cada activo físico, y que se tomarán las medidas necesarias en los casos que el mantenimiento no pueda ayudar. Este esfuerzo de ajustar y focalizar el mantenimiento lleva a grandes mejoras en el desempeño de los *activos físicos existentes* donde se las requiere.

  RCM fue desarrollado para ayudar a las aerolíneas a diseñar los programas de mantenimiento para nuevos tipos de aeronaves *antes* que entraran en servicio. Por lo tanto resulta ser una manera ideal de desarrollar programas de este tipo para *nuevos activos físicos*, especialmente equipos complejos para los que no existe información histórica disponible. Esto ahorra mucho de la prueba y error que tan frecuentemente forma parte del desarrollo de nuevos programas de mantenimiento; pruebas que son frustrantes, demandan tiempo y producen errores que pueden ser muy costosos.

- ***Mayor costo-eficacia del mantenimiento:*** RCM continuamente focaliza su atención en las actividades de mantenimiento que tienen mayor efecto en el desempeño de la planta. Esto ayuda a asegurar que todo lo que se gasta para mantenimiento se invierta en las áreas en las que pueda tener los mejores resultados.

  Además, si RCM es aplicado correctamente a los sistemas de mantenimiento ya existentes, reduce la cantidad de trabajo *de rutina* (en otras palabras las tareas de mantenimiento hechas *cíclicamente*) de cada período, habitualmente entre en un 40 y un 70%. Por otro lado, si RCM se utiliza para desarrollar un programa de mantenimiento nuevo, la carga de trabajo resultante es mucho más baja que si el programa es desarrollado con los métodos tradicionales.
- ***Mayor vida útil de componentes costosos:*** debido al cuidadoso énfasis en el uso de técnicas de mantenimiento a condición.
- ***Una base de datos global:*** una revisión de RCM finaliza con un registro global y extensivamente documentado de los requerimientos de mantenimiento de todos los activos físicos utilizados por la organización. Esto posibilita *la adaptación a circunstancias cambiantes* (como cambios de modelos o aparición de nuevas tecnologías) sin tener que reconsiderar todas las políticas de mantenimiento desde un comienzo. También permite a quienes utilizan el equipo demostrar que sus programas de mantenimiento están construidos sobre una base racional (la *traza de auditoría* requerida por cada vez más organismos de regulación). Finalmente, la información almacenada en las hojas de trabajo de *RCM reduce los efectos de la rotación de personal* y la pérdida de experiencia que esto provoca.

  Una revisión RCM sobre los requerimientos de mantenimiento de cada activo físico a su vez provee una clara visión de las *habilidades necesarias para mantener cada activo físico*, y para decidir *qué repuestos deben tenerse en stock*. Un producto secundario valioso es la *mejora de planos y manuales*.
- ***Mayor motivación del personal:*** especialmente las personas involucradas en el proceso de revisión. Esto lleva a un mayor entendimiento general del activo en su contexto operacional, junto con un 'sentido de pertenencia' más amplio de los problemas de mantenimiento y sus soluciones. También aumenta la probabilidad de que las soluciones perduren.
- ***Mejor trabajo de equipo:*** RCM provee un lenguaje técnico que es fácil de entender para cualquier persona que tenga alguna relación con el mante-

nimiento. Esto da al personal de mantenimiento y de operaciones un mejor entendimiento de lo que el mantenimiento puede (y de lo que no puede) lograr, y qué debe hacerse para lograrlo.

Todos estos temas son parte central de la administración del mantenimiento y muchos ya son los objetivos de los programas de mejora. Un rasgo importante en RCM es que provee un encuadre efectivo y paso a paso para tratar a *todos* ellos al mismo tiempo, y para involucrar a todos aquellos que tengan relación con el equipo y con el proceso del que forman parte.

RCM da resultados rápidamente. De hecho, si son enfocadas y aplicadas correctamente, las revisiones de RCM se repagan en cuestión de meses y hasta semanas, como se menciona en el Capítulo 14. Estas revisiones transforman tanto la percepción de los requerimientos de mantenimiento de los activos físicos utilizados por la organización y la manera en que es percibida la función de mantenimiento como un todo. El resultado es un mantenimiento más costo-eficaz, más armonioso y más exitoso.

2 Funciones

Muchas personas se hacen ingenieros porque sienten al menos cierta afinidad por las cosas, sean estas mecánicas, eléctricas o estructurales. Esta afinidad los lleva a que les gusten los activos en buenas condiciones y a sentirse molestos si los activos están en malas condiciones.

Esta inclinación siempre se reflejó en el espíritu del concepto de mantenimiento preventivo. Hizo que surgieran conceptos tales como "custodia de activos" (asset care), que como su nombre lo muestra, busca el cuidado del activo *per sé*. También condujo a muchos especialistas en estrategias de mantenimiento a creer que mantenimiento es todo aquello relacionado a preservar la confiabilidad inherente o la capacidad de diseño de un activo.

De hecho esto no es tan así.

A medida que logramos entender más profundamente el rol de los activos dentro del mundo de los negocios, comenzamos a apreciar el significado de que todo activo físico se pone en servicio porque alguien quiere que haga algo determinado. Con lo que surge que cuando mantenemos un activo, *el estado que queremos preservar debe ser aquel en el cual continúe haciendo lo que sea que sus usuarios quieran que haga*. Veremos más adelante en este capítulo, que ese estado - el que los usuarios quieren- es muy diferente a la capacidad nominal del activo.

Este énfasis en lo que el activo *hace* más que en lo que el activo *es* descubre una forma completamente nueva de definir los objetivos de mantenimiento para cualquier activo –enfocado hacia aquello que los usuarios desean que haga. Esa es la característica más importante del proceso RCM, y es por lo cual mucha gente considera al RCM como el "TQM (Administración de Calidad Total) aplicado a los activos físicos".

Para definir los objetivos del mantenimiento según los requerimientos de los usuarios debemos obtener un claro entendimiento de las funciones de cada activo físico junto con los parámetros de funcionamiento asociados. Es por esta razón que el proceso RCM comienza preguntando:

- **¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento del activo físico en su contexto operacional actual?**

Este capítulo explora esta pregunta con mayor detalle. Describe cómo deben

definirse las funciones, explica los dos tipos de estándares de funcionamiento principales, repasa las diferentes categorías de funciones y muestra cómo se deben listar las funciones.

2.1 Describiendo funciones

Un principio bien establecido por la ingeniería es que las definiciones de funciones deben consistir de un verbo y de un objeto. También ayuda mucho iniciar las definiciones con un verbo en infinitivo ("bombear agua", "transportar gente", etc.).

Sin embargo, y como se explica con detenimiento a continuación, los usuarios no esperan sólo que el activo cumpla con una función. También esperan que lo haga con un nivel de funcionamiento aceptable. Entonces la definición de una función – y por ende la definición de los objetivos de mantenimiento para ese activo físico- no está completa a menos que especifique el nivel de funcionamiento deseado por el usuario, tan precisamente como le sea posible (en oposición a su capacidad de diseño).

Por ejemplo, la función primaria de la bomba en la figura 2.1 podría ser enunciada así:

- Bombear agua del tanque X al tanque Y a no menos de 800 litros por minuto.

Este ejemplo muestra que una definición completa de una función consiste de un verbo, un objeto y el estándar de funcionamiento deseado por el usuario.

La definición de una función consiste de un verbo, un objeto y el estándar de funcionamiento deseado por el usuario

2.2 Estándares de funcionamiento

El objetivo del mantenimiento es asegurarse que los activos físicos continúen haciendo lo que sus usuarios quieren que haga. La magnitud de aquello que los usuarios quieren que el activo haga puede definirse a través de un estándar mínimo de funcionamiento. Si pudiésemos construir un activo físico capaz de rendir según este funcionamiento mínimo sin deteriorarse en ningún modo, ese sería el fin de la cuestión. La máquina funcionaría continuamente sin necesidad de mantenimiento.

Sin embargo el mundo real no es tan simple.

Las leyes de la física nos dicen que cualquier sistema organizado que es expuesto al mundo real se deteriorará. El resultado final de este deterioro es

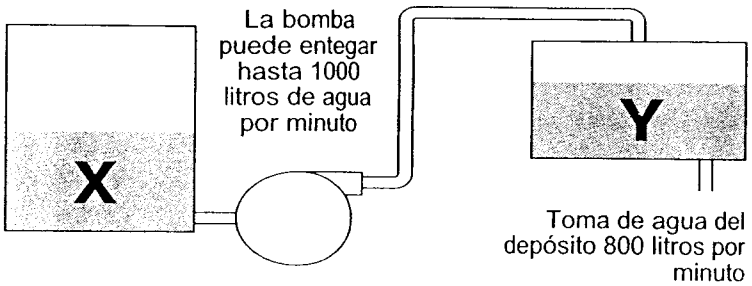


Figura 2.1:
Capacidad inicial vs funcionamiento deseado

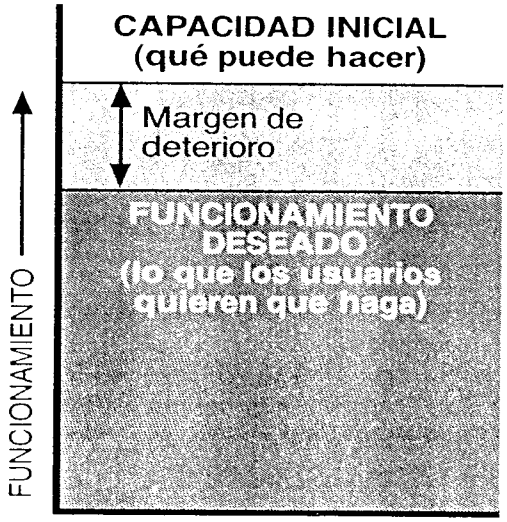


Figura 2.2: Margen de deterioro

la desorganización total (también conocido como 'caos' o 'entropía'), a menos que se tomen acciones para frenar el proceso que esté causando el deterioro del sistema.

Por ejemplo, la bomba en la figura 2.1 está bombeando agua hacia un tanque del que se saca agua a razón de 800 litros por minuto. Un proceso que causa el deterioro de la bomba (modo de falla) es el desgaste de las paletas. Esto sucede sin importar si está bombeando ácido o aceite lubricante, y sin que influya si las paletas están hechas de titanio o de acero. La única pregunta es cuánto tiempo le tomará deteriorarse al punto de no poder enviar 800 litros por minuto.

Entonces si el deterioro es inevitable, debe ser tolerable. Esto significa que cuando cualquier activo físico es puesto en funcionamiento debe ser capaz de rendir *más* que el estándar mínimo de funcionamiento deseado por el usuario. Lo que el activo físico es capaz de rendir es conocido como *capacidad inicial* (o confiabilidad inherente). La figura 2.2 ilustra la relación correcta entre esta capacidad y el funcionamiento deseado.

Por ejemplo, para asegurarnos que la bomba que muestra la figura 2.1 hace lo que sus usuarios desean y además dejar lugar para el deterioro, los diseñadores del sistema deben especificar una bomba cuya capacidad inicial sea mayor a 800 litros por minuto. En el ejemplo, esta capacidad inicial es de 1000 litros por minuto.

Esto significa que el funcionamiento puede ser definido de las siguientes dos maneras:

- Funcionamiento deseado (lo que el usuario quiere que haga): Desempeño
- Capacidad propia (lo que puede hacer)

Los próximos capítulos explican de qué manera el mantenimiento contribuye a asegurar que los activos físicos continúen cumpliendo con las funciones

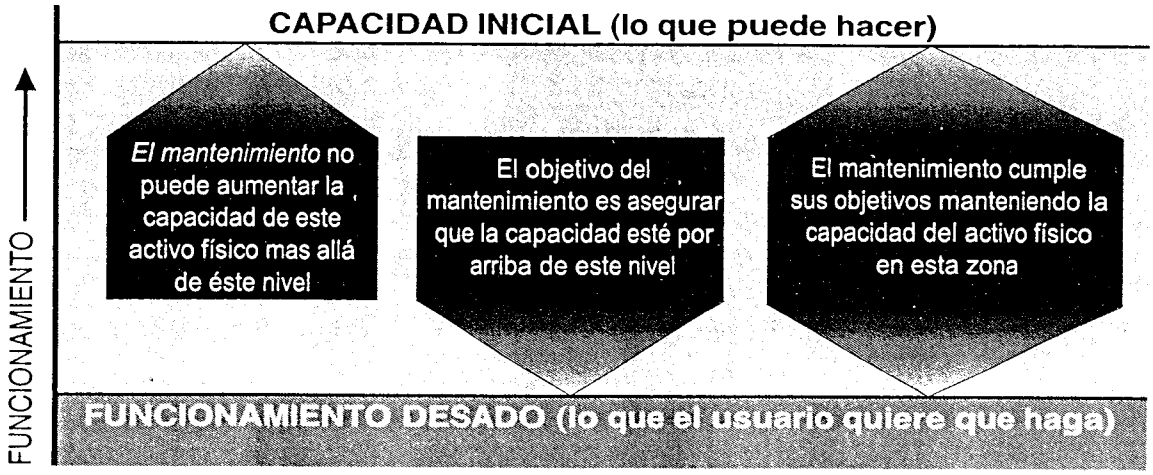


Figura 2.3: Un activo físico mantenible

que sus usuarios desean, ya sea asegurando que su capacidad siga superando los parámetros mínimos deseados por el usuario, o restaurando algo para alcanzar la capacidad inicial si baja de este punto. Cuando se está considerando la cuestión de la restauración se debe tener en cuenta lo siguiente:

- La capacidad inicial de cualquier activo físico está establecida por su diseño y por cómo está hecho
- El mantenimiento sólo puede restaurar al activo físico a su nivel de capacidad inicial - no puede ir mas allá.



Figura 2.4: Una situación no mantenible

En la práctica, la mayoría de los recursos físicos están construidos y diseñados adecuadamente, por lo que frecuentemente es posible desarrollar programas de mantenimiento que aseguran que estos activos físicos continúen haciendo lo que sus usuarios quieren que haga.

Resumiendo, dichos activos físicos son mantenibles, como lo muestra la figura 2.3. Por otro lado si el funcionamiento deseado excede la capacidad inicial, ningún tipo de mantenimiento puede hacer que el activo cumpla con esta función. En otras palabras, dichos activos físicos no son mantenibles, como lo muestra la figura 2.4

Por ejemplo, si la bomba que se muestra en la Figura 2.1 tuviera una capacidad inicial de 750 litros/minuto, no podría mantener el tanque lleno. Como no existe un programa de mantenimiento que pueda hacer que la bomba sea más grande,

el mantenimiento en este contexto no puede brindar el funcionamiento deseado. De la misma manera, si tratamos de extraer 15 kW (funcionamiento deseado) de un motor eléctrico de 10 kW (capacidad inicial), el motor fallará constantemente y finalmente se quemará prematuramente. Ningún tipo de mantenimiento podrá hacer que este motor sea lo suficientemente grande. Aunque haya sido construido y diseñado perfectamente, no podrá rendir de acuerdo al funcionamiento deseado en el contexto en que está siendo utilizado.

De los ejemplos anteriores podemos extraer dos conclusiones:

- Para que un activo físico sea mantenible, el funcionamiento deseado debe estar dentro del margen de su capacidad inicial
- Para determinar esto no solo debemos conocer la capacidad inicial del activo físico, sino también cuál es exactamente el funcionamiento mínimo que el usuario está dispuesto a aceptar dentro del contexto en que va a ser utilizado.

Esto remarca la importancia de identificar precisamente qué es lo que los usuarios quieren cuando comienza a desarrollarse un programa de mantenimiento. Los párrafos siguientes exploran en detalle los aspectos centrales de los estándares de funcionamiento

Estándares de funcionamiento múltiple

Muchas de las descripciones de funciones incorporan mas de uno y en algunos casos muchos estándares de funcionamiento.

Por ejemplo, una función de un reactor químico en una planta química que trabaja en lotes puede listarse como:

- Calentar hasta 500Kg de un producto X desde la temperatura ambiente al punto de ebullición (125°C) en una hora.

En este caso tanto el peso del producto como la temperatura y el tiempo presentan diferentes expectativas de funcionamiento. De la misma manera, la función primaria de un auto puede definirse como:

- Transportar hasta 5 personas a una velocidad de 140 km/h en caminos pavimentados.

Acá las expectativas de performance están relacionadas con la velocidad y el número de pasajeros.

Estándares de funcionamiento cuantitativos

Debe tenerse especial cuidado en evitar enunciar parámetros cualitativos como "producir tantas piezas como requiera producción", o "el ir tan rápido como sea posible". Este tipo de enunciados de funciones no tienen sentido, ya que hacen imposible definir exactamente cuándo falló el ítem.

En realidad, puede ser extraordinariamente difícil definir precisamente qué es lo que se requiere, pero esto no significa que no se pueda o no se deba

hacer. Uno de los mayores usuarios de RCM resumió este punto diciendo "si los usuarios de un activo no pueden especificar precisamente cuál es el desempeño que quieren del mismo, no pueden exigir a mantenimiento que se haga responsable por mantener ese desempeño".

Estándares Cualitativos

Mas allá de la necesidad de ser precisos, a veces es imposible especificar parámetros de funcionamiento cuantitativos. Entonces recaemos en los cualitativos.

Por ejemplo, la función primaria de algo pintado es usualmente la de "verse aceptable" (o atractivo). Lo que queremos decir con "aceptable" es imposible de cuantificar. Como resultado el usuario y quien hace el mantenimiento deben asegurarse de compartir un entendimiento común de lo que quieren decir con palabras tales como "aceptable", antes de establecer un sistema destinado a preservar esta aceptabilidad.

Estándares de funcionamiento absolutos

Una descripción de una función que no da estándares de funcionamiento por lo general implica que se trata de un absoluto.

Por ejemplo, el concepto de contención se asocia con casi todos los sistemas cerrados.

Las descripciones de función en relación con la contención frecuentemente se escriben de esta manera:

- Contener un líquido X

La ausencia de estándares de funcionamiento sugiere que el sistema debe contener todo el líquido, y que cualquier pérdida da cuenta de una falla. En casos donde los sistemas cerrados pueden tolerar alguna pérdida, la cantidad que puede ser tolerada debe incorporarse como un estándar de funcionamiento en la descripción de la función.

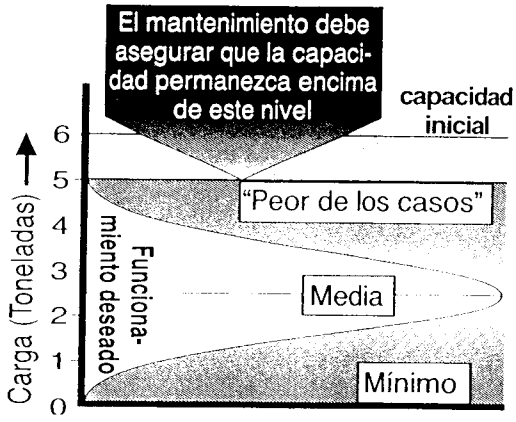


Figura 2.5: Estándares de funcionamiento variables

Estándares de funcionamiento variables

Las expectativas de funcionamiento (o esfuerzo aplicado) a veces varían infinitamente entre dos extremos.

Consideremos el ejemplo de un camión utilizado para llevar cargamentos de distintos bienes a revendedores locales. Asumamos que las cargas varíen entre 0 (vacío) y 5 ton., con una media de 2,5 ton. y una distribución de cargas como muestra la figura 2.5. Para dar lugar al deterioro, la capacidad inicial del camión debe ser más que la carga en el caso "más desfavorable", que en este caso es de 5 toneladas. El programa de mantenimiento debe asegurarse que la capacidad no caiga por debajo de este nivel, con lo cual estaría satisfaciendo automáticamiente todas las expectativas de funcionamiento.

Límites superiores e inferiores

Contrastando con los estándares de funcionamiento variable, algunos sistemas muestran capacidad variable. Estos son sistemas que no pueden llegar a funcionar exactamente según el mismo estándar cada vez que operan.

Por ejemplo una rectificadora utilizada para dar la terminación a un cigüeñal no producirá exactamente el mismo diámetro final en cada pieza. Estos diámetros variarán, aunque sólo sea unos micrones. Del mismo modo una máquina de rellenado de una fábrica de productos alimenticios no llenará dos envases seguidos con el mismo peso exacto de alimento. Los pesos variarán en algunos miligramos.

La figura 2.6 indica que las variaciones de capacidad de esta naturaleza usualmente varían alrededor de una media. Para registrar esta variabilidad, a los estándares de funcionamiento deseados se incorpora un límite superior y otro inferior.

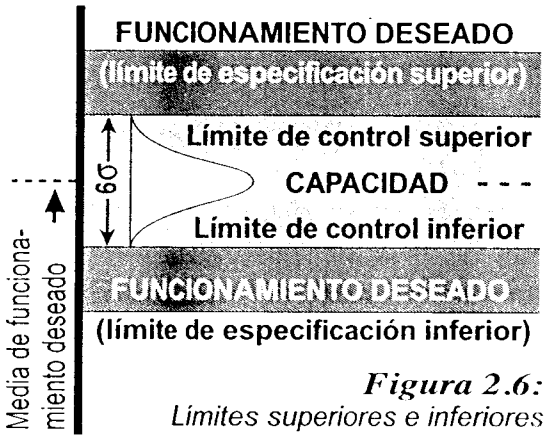


Figura 2.6:
Límites superiores e inferiores

Por ejemplo, la función primaria de una máquina que embolsa caramelos podría ser:

- Empaquetar 250 ±1g de caramelos en bolsas a una velocidad mínima de 75 bolsas por minuto.

La función primaria de una rectificadora podría ser:

- Rectificar una bancada a razón de 3.00 ± 0.03 minutos a un diámetro de 75 ± 0.1mm con una superficie de acabado de Ra 0.2.

(En la práctica, esta clase de variabilidad generalmente no es bienvenida por una serie de razones. Lo ideal sería que los procesos fuesen tan estables que no hubiese variación alguna y consecuentemente no serían necesarios dos límites. Buscando este ideal, muchas industrias están gastando un montón de tiempo y de energía diseñando procesos que varíen tan poco como sea posible. No obstante este aspecto de diseño y desarrollo está fuera del alcance de este libro. Por el momento nos concentraremos exclusivamente en la variabilidad desde el punto de vista del mantenimiento.)

La variabilidad que puede tolerarse en la especificación de cualquier producto está usualmente determinada por factores externos.

Por ejemplo el límite inferior que puede tolerarse en el diámetro de la bancada del cigüeñal está determinada por factores como ruido, vibración y dureza, y el límite superior por la luz necesaria para proveer una lubricación adecuada. El limite inferior del peso de las bolsas de caramelo (en relación con el peso indicado en la misma) está generalmente determinado por la legislación vigente, mientras que el límite superior es determinado por la cantidad de producto que la compañía está dispuesta a regalar.

En casos como este, los límites de funcionamiento deseados se conocen como límites de especificación superior e inferior. Los límites de capacidad (generalmente definidos como "tres desviaciones estándar de cada lado", se conocen como límites de control superior e inferior). La teoría de la administración de la calidad sugiere que en un proceso bien administrado, la diferencia entre los límites de control idealmente deberían ser la mitad de la diferencia entre los límites de especificación. Este múltiplo permitirá un margen de deterioro más que adecuado desde el punto de vista del mantenimiento.

Los límites superiores e inferiores no solo se aplican a la calidad del producto, también se aplican a especificaciones funcionales tales como precisión de los indicadores, configuración de sistemas de control, y dispositivos de protección. Este punto se discutirá con mayor profundidad en el capítulo 3.

2.3 El Contexto Operacional

En el Capítulo 1, se definió RCM como un "proceso utilizado para determinar los requerimientos de mantenimiento de cualquier activo físico en su contexto operacional". Este contexto se inserta por completo en el proceso de formulación de estrategias de mantenimiento, comenzando por la definición de funciones.

Por ejemplo, consideremos una situación en la que un programa de mantenimiento está siendo desarrollado para un camión utilizado para transportar material desde Startsville a Endburg. Antes de que puedan definirse las funciones y los estándares de funcionamiento asociados a ese vehículo, el personal que está desarrollando el programa necesita asegurarse exhaustivamente de comprender el contexto operacional.

Por ejemplo, ¿a qué distancia está Startsville de Endburg? ¿Sobre qué tipo de terrenos y caminos se transitará? ¿Cuáles pueden ser las peores condiciones climáticas y de tráfico de esta ruta? ¿Qué tipo de carga esta llevando el camión (frágil, corrosiva, abrasiva, explosiva)? ¿Qué límites de velocidad u otras restricciones se aplican a esta ruta? ¿Qué facilidades de carga de combustible existen a lo largo del camino?

Las respuestas a éstas preguntas pueden llevarnos a definir la función primaria de este vehículo de esta manera: "Transportar hasta 40 toneladas de planchas de acero a velocidades de hasta 95 Km por hora (promedio de 75 Km/h) desde Startsville hasta Endburg con un tanque de combustible".

El contexto operacional también influencia profundamente los requerimientos para las funciones secundarias. En el caso del camión, el clima puede demandar el uso de aire acondicionado, alguna reglamentación especial puede requerir mayor iluminación, y la lejanía de Endburg quizás implique llevar repuestos especiales a bordo del camión, etc.

El contexto no solo afecta drásticamente las funciones y las expectativas de funcionamiento, sino que también afecta la naturaleza de los modos de falla que pueden ocurrir, sus efectos y consecuencias, la periodicidad con la que pueden ocurrir y qué debe hacerse para manejarlas.

Por ejemplo, consideremos nuevamente la bomba mostrada en la figura 2.1. Si fuese llevada a un lugar en el que deba bombear lodo medianamente abrasivo hacia un tanque B desde el cual el lodo es extraído a razón de 900 litros por minuto, la función primaria sería:

- Bombear lodo al tanque B a no menos de 900 litros por minuto.

Este es un estándar de funcionamiento más exigente que el de su ubicación anterior, por lo que también se eleva el estándar de mantenimiento. La naturaleza, frecuencia y gravedad de los patrones de falla cambian al pasar de bombear agua a bombear lodo. Como resultado, aunque la bomba es exactamente la misma, en su nuevo contexto muy probablemente termine con un programa de mantenimiento completamente diferente.

Todo esto significa que cualquiera que comience a aplicar RCM a cualquier proceso o activo físico debe asegurarse de tener un claro entendimiento del contexto operacional antes de comenzar. Algunos de los factores importantes que deben ser considerados se discuten en los párrafos siguientes.

Procesos por lotes y continuos

En plantas manufactureras la característica más importante del contexto operacional es el tipo de proceso. Su alcance va desde operaciones de procesos continuos en los cuales casi todos los equipos están interconectados, hasta operaciones de trabajo donde la mayoría de las máquinas trabajan independientemente. En procesos continuos, la falla de un activo puede parar toda la planta o reducir drásticamente la producción, a menos que exista sobrecapacidad o estén disponible equipos de reserva. Por otro lado, en plantas que trabajan por lotes la mayoría de las fallas afectará solamente la producción de una máquina o una línea. Las consecuencias de este tipo de fallas están determinadas principalmente por la duración de la detención y de la cantidad del trabajo en proceso acumulado para las operaciones subsecuentes.

Estas diferencias significan que la estrategia de mantenimiento aplicada a un activo que es parte de un proceso continuo puede ser radicalmente diferente a la estrategia aplicada a un activo idéntico que esté trabajando en un proceso por lotes.

Redundancia

La presencia de redundancias (o formas alternativas de producción) es una característica del contexto operacional que debe ser considerada en detalle cuando se definen las funciones de cualquier activo.

La importancia de las redundancias se ejemplifica con las 3 bombas ilustradas en la figura 2.7. La bomba B tiene una bomba de reserva, mientras que la bomba A no.

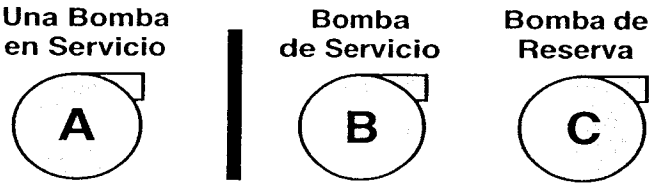


FIGURA 2.7: Diferentes contextos operacionales

Esto significa que la función primaria de la bomba A es transferir líquido desde un punto a otro por sí misma, lo mismo que debe hacer la bomba B con la presencia de una bomba de reserva.

Esta diferencia significa que a pesar que las bombas sean idénticas los requerimientos de mantenimiento de las mismas serán diferentes (veremos más adelante que tan diferentes).

Estándares de calidad

Los estándares de calidad y los estándares de servicio al cliente son otros dos aspectos del contexto operativo, que pueden dar lugar a descripciones diferentes de funciones de máquinas que de otra manera serían idénticas.

Por ejemplo, usinas de molinos idénticas en dos máquinas de transferencia podrían tener las mismas funciones básicas, moler material. No obstante, la profundidad del corte, el ciclo de tiempo, las tolerancias de rugosidad y las especificaciones de acabado de superficie podrían ser diferentes. Esto podría dar lugar a conclusiones totalmente diferentes respecto de sus requerimientos de mantenimiento.

Estándares medio ambientales

Un aspecto cada vez más importante del contexto operacional de cualquier activo es el impacto que tiene (o podría tener) sobre el medio ambiente.

Existe un interés creciente en todo el mundo sobre este tema, lo que significa que cuando mantenemos cualquier activo tenemos que satisfacer dos tipos de "usuarios": el primero es la gente que opera la máquina. El segundo es la sociedad como un todo, que quiere tanto que el activo como el proceso del cual forma parte no cause ningún daño al medio ambiente. Lo que la sociedad quiere se expresa con el incremento en las exigencias de las regulaciones y los estándares ambientales. Estos son estándares internacionales, nacionales, regionales, municipales y hasta corporativos. Cubren un rango extraordinariamente extenso de temas, desde la biodegradabilidad de detergentes hasta el contenido de gases de escape. En el caso de procesos, tienden a concentrarse en subproductos líquidos, sólidos y gaseosos no deseados. La mayoría de las industrias están respondiendo a las expectativas ambientales de

la sociedad asegurándose que el equipamiento está diseñado para cumplir con los estándares asociados. No obstante, no es tan simple asegurar que una planta o un proceso están perfectamente de acuerdo con las normas ambientales en el momento de su utilización. Deben seguirse ciertos pasos para asegurar que los activos se mantendrán en cumplimiento durante toda su vida útil.

Seguir dichos pasos es cada vez más urgente ya que en todo el mundo están ocurriendo cada vez más accidentes que afectan el medio ambiente porque algún activo físico no se comporta como es debido – en otras palabras, porque algo falla. Las penalizaciones cada vez son más severas, con lo que ahora para la gente de mantenimiento la integridad del medio ambiente a largo plazo es un tema particularmente importante.

Riesgos para la seguridad

Un número cada vez mayor de organizaciones han desarrollado por sí mismas o se han adherido a estándares formales con respecto a niveles de riesgo aceptable. En algunos casos, se aplican a nivel corporativo, en otros a plantas individuales y a su vez otros a procesos o activos específicos. Sin duda, donde existan dichos estándares son un componente importante del contexto operacional.

Turnos de trabajo

La organización de los turnos de trabajo afecta profundamente al contexto operacional. Algunas plantas operan ocho horas por día, cinco días a la semana (en tiempos de recesión a veces menos). Otras operan continuamente durante los siete días de la semana, y otras operan entre estos dos extremos.

En las plantas que operan un solo turno, la producción que se pierde a causa de las fallas por lo general puede recuperarse trabajando horas extra. Estas horas extra incrementan el costo de producción, con lo cual las estrategias de mantenimiento deben evaluarse a la luz de estos costos.

Por otro lado, si el activo trabaja 24 horas al día, los siete días de la semana, sólo en contadas ocasiones puede recuperarse el tiempo perdido, con lo cual los tiempos muertos causan pérdidas de ventas. Estos costos son mucho mayores que los de las horas extra, por lo que en estas circunstancias es necesario tratar de prevenir las fallas tanto como sea posible. No obstante, en una planta que trabaja de esta manera se hace mucho más difícil que el equipo se encuentre disponible para realizar el mantenimiento, con lo que las estrategias de mantenimiento deben formularse con una dedicación especial.

A medida que los productos recorren su ciclo de vida o a medida que cambian las circunstancias económicas, las organizaciones pueden cambiar sorprendentemente rápido de un extremo del espectro al otro. Por esta razón, es muy razonable repasar las políticas de mantenimiento cada vez que cambie este aspecto del contexto operacional.

Productos en proceso

El trabajo en proceso o semielaborado se refiere a cualquier material que aún se encuentra en etapas intermedias de fabricación y no ha pasado a través de todo su proceso productivo. Podría estar almacenado en tanques, en cajas, en silos, en pallets, en containers, en camiones, o en depósitos especiales. Las consecuencias de la falla de cualquier máquina están muy influidas por la cantidad de producto en proceso que exista entre dicha máquina y la próxima máquina del proceso.

Considere el caso en que el volumen de trabajo en cola es suficiente como para mantener a la siguiente operación trabajando seis horas y tome sólo 4 horas reparar el modo de falla que se está considerando. En este caso la falla es difícil que afecte a la producción del proceso. A la inversa, si toma ocho horas repararla, podría afectar la producción ya que la siguiente operación quedaría paralizada. La severidad de estas consecuencias puede cambiar dependiendo de:

- la cantidad de producto en proceso entre esa operación y la siguiente, y así siguiendo a lo largo de la línea, y
- la proporción en que cualquiera de las operaciones afectadas se vuelve cuello de botella (en otras palabras, una operación que controla la producción de toda la línea)

Si bien las paradas de planta cuestan dinero, también cuesta dinero el mantener existencias de producto en proceso. Hoy día los costos de mantener cualquier tipo de inventario es tan alto que una de las mayores prioridades es reducirlos al mínimo indispensable. Este es el principal objetivo de los sistemas "justo a tiempo"(JIT) y sus derivados.

Este tipo de sistemas reduce el inventario en proceso, con lo que el colchón de tiempo que permitían los stocks en caso de fallas está desapareciendo rápidamente. Esto es un círculo vicioso, ya que la presión que se ejerce sobre el departamento de mantenimiento para disminuir las fallas y así reducir costos también está aumentando.

Por lo tanto, desde el punto de vista del mantenimiento, se debe lograr un equilibrio entre las implicancias económicas de las fallas operacionales y:

- el costo de mantener trabajo en proceso para mitigar los efectos de estas fallas, o
- el costo de hacer mantenimiento proactivo para anticiparse o prevenir las fallas

Para lograr ese equilibrio, debe entenderse claramente este aspecto del contexto operacional, especialmente en operaciones de manufactura.

Tiempo de reparación

El tiempo de reparación está influido por la *velocidad de respuesta* a la falla, que está a su vez determinada por el sistema de reportes de fallas, por el nivel

del personal, y por la velocidad de la reparación misma, la que es función de la disponibilidad de repuestos, de herramientas adecuadas y de la habilidad de la persona que hace las reparaciones.

Estos factores influye mucho en los efectos y las consecuencias de las fallas, y varían marcadamente de una organización a otra. Como consecuencia de esto, este aspecto del contexto operacional también debe entenderse claramente.

Repuestos

Es posible usar un derivado del proceso de RCM para optimizar los stocks de repuestos y las políticas de administración de fallas asociadas. Este derivado se basa en el hecho que la única razón para tener un stock de repuestos es minimizar o eliminar las consecuencias de la falla.

La relación que existe entre repuestos y consecuencias de las fallas se articula en el tiempo que toma obtener los repuestos del proveedor. Si pudiera hacerse de manera instantánea no habría necesidad de tener ningún stock de repuestos. Pero en el mundo real adquirir repuestos toma tiempo. Esto se conoce como tiempo de reposición (lead time), y puede ser del orden de minutos a varios meses o años. Si el repuesto no se encuentra en almacén, el tiempo de reposición determina cuánto tiempo tomará reparar la falla, y por lo tanto la severidad de sus consecuencias. Por otro lado, tener repuestos en almacén también cuesta dinero, con lo que se necesita lograr un balance, analizando caso por caso, entre el costo de tener un repuesto en el inventario y el costo total de no tenerlo. En algunos casos, también debe tenerse en cuenta el peso y/o las dimensiones de los repuestos por una cuestión de restricción de espacio y carga, especialmente en instalaciones como plataformas petroleras y barcos.

Este proceso de optimización de repuestos va más allá del alcance de este libro. De cualquier manera, cuando se aplica RCM a cualquier instalación existente, debe comenzarse por algún lado. En la mayoría de los casos, la mejor forma de tratar con los repuestos es la siguiente:

- aplicar RCM para desarrollar una estrategia de mantenimiento, contemplando la política de repuestos existente,
- Repasar los modos de falla asociados con los repuestos más importantes sobre una base de excepción, estableciendo qué impacto (si tuviera alguno) tendría un cambio en la política de manejo de stocks sobre la estrategia de mantenimiento inicial, y luego eligiendo la relación estrategia de mantenimiento/política de stock más costo-eficaz.

Si se adopta esta metodología, la política de repuestos puede considerarse parte del contexto operacional (inicial).

Demanda del mercado

A veces el contexto operacional presenta una demanda estacional para los productos y servicios que brinda la organización.

Por ejemplo, las compañías fabricantes de gaseosas tienen una demanda mayor de productos en verano que en invierno, de la misma forma que las compañías de transporte urbano de pasajeros experimentan su máxima demanda durante las horas pico.

Por lo tanto, en el momento de máxima demanda las consecuencias operacionales de la falla son mucho más serias, con lo que en este tipo de industrias se necesita entender claramente este aspecto del contexto operacional cuando se definen funciones y se evalúan las consecuencias de la falla.

Abastecimiento de materias primas

Algunas veces el contexto operacional está influido por fluctuaciones cíclicas en el abastecimiento de materias primas. Los fabricantes de comida muchas veces experimentan períodos de mucha actividad durante la época de la cosecha y períodos de baja actividad durante el resto del año. Esto se aplica especialmente a procesadores de frutas y a molinos azucareros. Durante la temporada, las fallas operacionales no sólo afectan la producción, sino que también hacen que se pierdan grandes cantidades de materias primas que no pueden ser procesadas antes de su fecha de vencimiento.

Documentación del contexto operacional

Por todas las razones mencionadas, es esencial asegurarse que toda persona involucrada en el desarrollo de un programa de mantenimiento de cualquier activo físico comprenda totalmente el contexto operacional del mismo. La mejor manera de hacer esto es documentando el contexto operacional como parte del proceso de RCM; si es necesario puede llegarse a incluir la definición de misión de la organización.

La figura 2.8 de la página siguiente muestra el enunciado de un contexto operacional hipotético para la máquina rectificadora que se mencionó anteriormente. El cigüeñal se usa en un tipo de motor del auto modelo X.

La jerarquía comienza con la división que produce este modelo, pero podría haber incorporado un nivel más incluyendo toda la empresa. Nótese también que la definición de contexto de cada nivel puede aplicarse a todo activo incluido debajo de esa jerarquía, no sólo al activo que se está analizando.

La definición del contexto en los niveles superiores de esta jerarquía es simplemente una definición amplia de funciones. Los estándares de performance en los niveles superiores cuantifican las expectativas desde el punto de vista del negocio como un todo. En niveles más bajos, los estándares de funcionamiento son cada más específicos hasta llegar a al activo bajo análisis. En este nivel, las funciones primarias y secundarias del activo se definen de la manera descripta en el resto de este capítulo.

Hacer un auto modelo X *(Activo físico correspondiente: División Automotriz de Modelo X)*	La división del modelo X emplea a 4.000 personas para producir 220.000 automóviles este año. Los pronósticos de venta indican que esto podría incrementarse a 320.000 por año en los próximos tres años. En la actualidad estamos en la posición N° 18 en las tablas de satisfacción del cliente, y nuestra intención es la de llegar a la posición N° 15 el año próximo y a la N° 10 el siguiente. La meta de horas perdidas por accidentes en la división es de una por cada 500.000 horas pagas. La probabilidad de que ocurra una fatalidad en cualquier lugar de la división debería ser menor a una en 50 años. La división planea atenerse a todos los estándares ambientales conocidos.
Hacer motores *(Activo físico correspondiente: Planta de Motores Motown)*	La planta de motores Motown produce todos los motores para los automóviles modelo X. Cada año se producen 140.000 motores del Tipo 1 y 80.000 del Tipo 2. Para llegar a las metas de satisfacción de los clientes, los reclamos de garantías por los motores deben bajar de la cifra actual de 20 de cada 1.000, a 5 de cada 1.000. La planta sufrió tres inconvenientes reportables sobre temas de medio ambiente el año pasado; nuestra meta es no más de una en los próximos tres años. La planta para dos semanas al año para permitir que los trabajadores tomen sus vacaciones anuales.
Hacer Motores del Tipo 2 *(Activo físico correspondiente: Línea de motor del Tipo 2)*	La línea de motores del Tipo 2 actualmente trabaja 110 horas por semana (dos turnos de 10 horas cinco días a la semana y un turno de 10 horas los Sábados). La línea de montaje podría producir 140.000 motores por año en estas horas, si en este tiempo todo funcionara sin defectos, pero la producción global de los motores se ve limitada por la velocidad de la línea de fabricación del cigüeñal. La compañía quisiera hacer todo el mantenimiento posible dentro de las horas normales sin interferir con la producción.
Mecanizar Cigüeñales *(Activo físico correspondiente: mecanizado de cigüeñal 2ª línea)*	La línea de cigüeñal consiste en 25 operaciones, y es capaz de producir nominalmente 20 cigüeñales por hora (2.200 por semana, 110.000 en un año de 50 semanas). Actualmente a veces no produce en el tiempo normal el requerimiento de 1.600 por semana. Cuando esto sucede, la línea tiene que trabajar horas extras a un costo adicional de 1.200 U$S por hora. (Dado que la mayor parte del crecimiento pronosticado será para motores del tipo 2, las paradas en ésta línea podrían eventualmente llevar a pérdidas de venta de automóviles modelo X a menos que el funcionamiento sea mejorado). No debería haber cigüeñales almacenados entre el final de la línea de cigüeñales y la línea de montaje, pero de hecho se guardan alrededor de 60 cigüeñales como "garantía" en caso de tener que parar. Esto permite que la línea de cigüeñales pueda parar hasta tres horas sin interferir con el montaje. Los defectos del mecanizado de cigüeñales no han causado ningún reclamo de garantía, pero el promedio de desperdicios de esta línea es de 4%. La meta inicial es de 1.5%
Rectificado de terminación de las bancadas principales y de extremos del cigüeñal *(Activo físico correspondiente: Rectificadora Ajax Mark 5)*	La rectificadora de terminación rectifica 5 bancadas de cojinetes principales y 4 bancadas de extremos. Es la operación cuello de botella en la línea de cigüeñal, y el tiempo del ciclo es de 3,0 minutos. El diámetro final de las bancadas principales es de 75mm ± 0,1mm, y el de los de extremo de 53mm ± 0,1mm. Ambas bancadas de cojinetes tienen una superficie de acabado de Ra0.2. Las muelas de la rectificadora son retocadas en cada ciclo, proceso que demanda 0,3 minutos de cada ciclo de 3 minutos. Las muelas son rectificadas en cada ciclo, proceso que toma 0,3 minutos de cada ciclo 3 minutos. Las muelas deben ser reemplazadas cada 3.500 cigüeñales, y este reemplazo lleva 1,8 horas. Usualmente hay alrededor de 10 cigüeñales en transportador entre esta máquina y la próxima operación, entonces pueden tolerarse 25 minutos de parada sin interferir con la próxima operación. El total de stock acumulado en la línea entre ésta máquina y el final de la línea significan que esta máquina puede estar parada alrededor de 45 minutos antes de hacer parar a toda la línea. El rectificado de terminación contribuye en un 0,4% a la relación de desperdicio actual.

Figura 2.8: Una definición de contexto operacional

2.4 Diferentes Tipos de Funciones

Todo activo físico tiene más de una función, por lo general tiene varias. Si el objetivo del mantenimiento es asegurarse que continúe realizando estas funciones, entonces *todas ellas* deben ser identificadas junto con los parámetros de funcionamiento deseados. A primera vista, esto puede verse como un proceso bastante directo. Sin embargo en la práctica casi siempre se vuelve el aspecto más desafiante y el que más tiempo toma en el proceso de formulación de estrategias de mantenimiento.

Esto es especialmente cierto en instalaciones antiguas. Cambian los productos, cambia la configuración de planta, cambia la gente, cambia la tecnología y cambian las expectativas de funcionamiento, pero todavía encontramos activos en servicio que estuvieron allí desde que se construyó la planta. Definir precisamente qué se supone que tienen que hacer dichos activos hoy día, requiere de mucha cooperación entre la gente de mantenimiento y los operarios. Por lo general esto también es una experiencia profunda de aprendizaje para todas las personas involucradas en el proceso.

Las funciones se dividen en dos categorías principales (funciones **primarias** y **secundarias**) y estas a su vez se dividen en varias subcategorías. En las próximas páginas se verán en detalle, comenzando por las funciones primarias.

Funciones primarias

Las organizaciones adquieren activos físicos por una, probablemente dos y muy pocas veces por tres o más razones. Estas razones son descriptas por definiciones de funcionamiento. Se conocen como **funciones primarias** por ser la razón principal por la que es adquirido el activo físico. Son las razones por las cuales existe el activo, por lo que debemos definirlas tan precisamente como sea posible.

Las funciones primarias son generalmente fáciles de reconocer. De hecho el nombre de la mayoría de los activos físicos industriales se basa en su función primaria.

Por ejemplo la función primaria de una máquina empaquetadora es la de empaquetar objetos, y la de una trituradora es la de triturar, etc.

Como mencionamos anteriormente el desafío real está en definir las expectativas de funcionamiento asociadas a esas funciones. Para la mayoría de los tipos de equipo los parámetros de funcionamiento asociados a las funciones primarias tienen que ver con velocidad, volumen, y capacidad de almacenamiento. Por lo general también necesita considerase en esta etapa la calidad del producto.

En el Capítulo 1 se mencionó que nuestra capacidad de alcanzar y mantener satisfactoriamente los estándares de calidad depende cada vez más de la capacidad y de la condición de los activos que producen los bienes. Dichos estándares están relacionados generalmente con las funciones primarias. Por esto, es esencial incorporar cuando corresponda, los criterios de calidad de producto en la definición de las funciones primarias. Estos incluyen *dimensiones* de mecanizado, operaciones de conformado o ensamblado, *estándares de pureza* para alimentos, productos químicos y farmacéuticos, *dureza* para el caso de tratamientos térmicos, nivel de llenado o de peso para embalajes, etc.

Diagramas de bloques de funciones

Si un activo es muy complejo, o si la interacción entre diferentes sistemas es difícil de interpretar, a veces es útil clarificar el contexto operativo usando diagramas de bloques. Éstos son diagramas simples que muestran todas las funciones primarias de una empresa a cualquier nivel dado. Este tema se discute con mayor profundidad en el Apéndice 1.

Funciones primarias múltiples e independientes

Un activo puede tener más de una función primaria. Por ejemplo, el nombre mismo del avión caza/bombardero sugiere que tiene dos funciones primarias. En casos como este, ambas funciones deben listarse en las especificaciones funcionales.

Una situación similar suele encontrarse en fabricación donde un activo puede usarse para realizar distintas funciones en momentos diferentes. Por ejemplo, un reactor en una industria química puede usarse en distintos momentos para el reflujo (hervir continuamente) de tres productos diferentes en condiciones diferentes como se muestra a continuación:

(podría decirse que este reactor no está realizando tres funciones diferentes, sino

Producto	**1**	**2**	**3**
Presión	2 bar	10 bar	6 bar
Temperatura	180°C	120°C	140°C
Tamaño de lote	500 litros	600 litros	750 litros

que está cumpliendo con la misma función con tres estándares de funcionamiento distintos. De hecho, la distinción no importa ya que de cualquier forma se llega a la misma conclusión)

En casos como este, uno podría listar por separado una función por cada producto. Esto podría llevar lógicamente a tres programas de mantenimiento para el mismo activo. Tres programas podrían ser posibles – tal vez hasta deseables – si cada producto se fabricara continuamente durante períodos muy largos.

De cualquier modo, si el intervalo entre las tareas de mantenimiento más espaciadas en más largo que los intervalos de cambio, se vuelve impráctico cambiar las tareas cada vez que la máquina se reconfigura para producir un producto diferente.

Una forma de solucionar este problema es combinar los estándares de las "peores condiciones" de cada producto en una sola definición de función.

En el ejemplo anterior, una combinación de definiciones de funciones podría resultar como "Reflujar hasta 750 litros de producto a una temperatura límite de 180°C y presiones límite de 10 bar".

Esto lleva a un programa que podría traer aparejado cierto sobremantenimiento durante algún período, pero que asegurará que el activo puede soportar el peor esfuerzo al que será sometido.

Funciones primarias dependientes o en serie

Puede encontrarse activos que son capaces de realizar hacer dos o más funciones primarias en serie. Éstas son conocidas como funciones en serie.

Por ejemplo, la función primaria de una máquina en una fábrica de alimentos puede ser "llenar 300 latas con comida por minuto" y luego "cerrar 300 latas por minuto".

La diferencia entre funciones primarias múltiples y funciones primarias en serie es que en las primeras, cada función puede ser ejecutadas independientemente una de la otra, mientras que en las segundas, una función debe ser realizada antes que la otra. En otras palabras, para que trabaje correctamente la máquina enlatadora debería llenar las latas antes de cerrarlas.

Funciones secundarias

Es de suponer que la mayoría de los activos físicos cumplan una o más funciones adicionales además de la primaria. Éstas se conocen como ***funciones secundarias***.

Por ejemplo, la función primaria del motor de un automóvil podría ser expresada de esta manera:

- Transportar hasta 5 personas a velocidades de hasta 140 km./h a lo largo de caminos construidos.

Si esta fuese la única función del vehículo entonces el único objetivo del programa de mantenimiento de este auto sería preservar su habilidad de transportar hasta 5 personas a velocidades de hasta 140 km./h a lo largo de caminos construidos. Sin embargo esta es sólo parte de la historia, ya que la mayoría de los dueños de automóviles esperan mucho más de sus vehículos, desde su capacidad de llevar equipaje hasta su capacidad de indicar el nivel de combustible.

Para asegurarnos que ninguna de éstas funciones sea pasada por alto, se dividen en siete categorías de la siguiente manera:

- Ecología – integridad ambiental
- Seguridad/Integridad estructural
- Control/contención/ confort
- Apariencia
- Protección
- Eficiencia/economía
- Funciones superfluas

La primer letra de cada línea de esta lista forma la palabra ESCAPE. Aunque las funciones secundarias son usualmente menos obvias que las primarias, la pérdida de una función secundaria puede tener serias consecuencias, a veces hasta más serias que la pérdida de una función primaria. Como resultado, las funciones secundarias frecuentemente necesitan tanto o más mantenimiento que las funciones primarias, por lo que también deben ser claramente identificadas. Las páginas siguientes exploran con mayor detalle las categorías más importantes de estas funciones.

Ecología – Integridad Ambiental

En el Punto 2 del presente capítulo se explicó como las expectativas medioambientales de la sociedad se han vuelto un factor crítico del contexto operacional de muchos activos. RCM comienza el proceso de cumplimiento de los estándares asociados con la definición de funciones, expresándolos apropiadamente.

Por ejemplo, una de las funciones del escape de un auto o de la chimenea de una fábrica podría ser "Contener menos de X miligramos de una sustancia química determinada por metro cúbico". El sistema de escape de un auto también podría verse sujeto a restricciones ambientales relacionadas con la emisión sonora, y la especificación funcional asociada podría ser "Emitir menos de X dB medidos a una distancia de Y metros de la salida del escape".

Seguridad

La gran mayoría de los usuarios quieren estar razonablemente seguros que sus máquinas no le causarán ningún daño y menos aún la muerte. En la práctica, la mayoría de los riesgos para la seguridad surgen más adelante en el proceso RCM cuando se analizan los modos de fallas. No obstante, en ciertos casos es necesario listar funciones que traten con riesgos específicos.

Por ejemplo, dos funciones relacionadas con la seguridad de una tostadora son "prevenir que los usuarios puedan tocar componentes que tengan tensión eléctrica" y "No quemar a los usuarios".

Muchos componentes y procesos no son capaces de cumplir por sí mismos con los requerimientos de seguridad que tienen sus usuarios. Esto dio lugar a la aparición de funciones adicionales a cumplirse por dispositivos de seguridad. Estos dispositivos presentan uno de los retos más difíciles que tienen que afrontar las personas de mantenimiento en una planta industrial moderna. Es por esto que más adelante se los estudia por separado.

Un subconjunto de las funciones relacionadas con la seguridad son aquellas que tratan con la contaminación del producto y la higiene. Estas pueden encontrarse principalmente en industrias alimenticias y farmacéuticas. Los estándares de funcionamiento asociados por lo general se especifican rigurosamente dando lugar a rutinas de mantenimiento estrictas y abarcativas (limpieza y prueba/validación).

Integridad estructural

Muchos activos tienen funciones secundarias del tipo estructural. Estas por lo general comprenden funciones como la de sostener otro activo, otro subsistema u otro componente.

Por ejemplo, la función primaria de una pared de un edificio puede ser la de proteger a la gente y a los equipos de las inclemencias climáticas, pero también podría esperarse que las paredes soporten el techo (y resistan el peso de estanterías y cuadros)

Las estructuras grandes y complejas con patrones múltiples de distribución de cargas y niveles altos de redundancias necesitan analizarse usando una versión especializada de RCM. Algunos ejemplos típicos de este tipo de estructuras son los fuselajes de los aviones, los cascos de los barcos y los elementos estructurales de plataformas marinas de petróleo.

Las estructuras de este tipo son raras en la industria en general, con lo que las técnicas analíticas pertinentes no se incluyen en este libro. No obstante, los elementos estructurales simples directamente pueden analizarse de la misma manera que cualquier otra función descripta en este capítulo.

Control

En muchos casos, los usuarios no sólo quieren que los activos cumplan con sus funciones con un determinado estándar de funcionamiento, sino que también desean poder regular dicho funcionamiento. Estas expectativas se extractan en funciones separadas.

Por ejemplo, la función principal de un auto sugerida anteriormente era la de "Transportar hasta 5 personas a una velocidad de 140 km./h en caminos pavimentados". Una función de control asociada con esta función podría ser la de "Permitir al conductor regular la velocidad a voluntad entre –15Km/h (marcha atrás) y +140Km/h".

Las formas de medición o de feedback son un subconjunto importante de las funciones de control. Estas incluyen funciones que dan al operador información en tiempo real de las condiciones del proceso (manómetros, indicadores, axiómetros y paneles de control), o que registran dicha información para un análisis posterior (dispositivos de grabación análogos o digitales, cajas negras de aviones, etc.). Los estándares de funcionamiento asociados con estas funciones no sólo se relacionan con la facilidad con la que se podría leer y asimilar o recuperar la información, sino que también se relacionan con hacerlo con precisión.

Por ejemplo, la función del velocímetro de un auto puede describirse como "indicar al conductor la velocidad del auto con una precisión de +5 -0% de la velocidad real".

Contención

En el caso de activos usados para *almacenar* cosas, su función primaria será la de contener lo que sea que se almacene. No obstante, la contención podría considerarse también como una función secundaria de todos los dispositivos usados para *transferir* material de cualquier tipo –especialmente fluidos. Estos pueden ser cañerías, bombas, cintas transportadoras, tolvas, silos y sistemas hidráulicos y neumáticos.

La contención también es una función secundaria importante en ítems como cajas reductoras y transformadores. (En este contexto, véase nuevamente lo que se remarcó en la Páginas 26, 27 y 28 respecto de estándares de funcionamiento y contención).

Confort

La mayoría de las personas esperan que sus activos no les causen ansiedad, molestia o incomodidad. La función "confort" contiene este tipo de expectativas ya que los diccionarios más importantes definen confort como la ausencia de ansiedad, molestia o incomodidad, etc. (estas expectativas también pueden clasificarse como "ergonómicas".)

Muy poco confort afecta la motivación, por lo que es indeseable desde el punto de vista humano. También es malo para el negocio ya que la gente que está ansiosa o siente dolores es más propensa a tomar decisiones incorrectas. Los sistemas de control mal explicados, poco confiables o incomprensibles causan ansiedad, sean estos para aplicaciones domésticas o para refinerías de petróleo. Los activos que son incompatibles con la gente que los usa - especialmente ropa y muebles- son los causantes de molestias.

El mejor momento de solucionar estos problemas es por supuesto la etapa de diseño. De cualquier manera, el deterioro y/o el cambio de expectativas

puede causar que este tipo de función falle como cualquier otra. La mejor manera de asegurar que esto no ocurra es definir apropiadamente las especificaciones funcionales.

Por ejemplo, una función de un panel de control podría ser la de "indicar claramente a un operador daltónico que se encuentre hasta 1,5 metros de distancia si la bomba está funcionando o no". De una silla de una cabina de control puede esperarse que cumpla con "Permitir a los operadores permanecer sentados confortablemente durante una hora sin producir somnolencia".

Apariencia

En muchos activos la apariencia engloba una función secundaria específica. Por ejemplo, la función primaria de una pintura en la mayoría de los equipos industriales es la de protegerlos de la corrosión, pero los colores brillantes pueden usarse para aumentar la visibilidad por razones de seguridad. De manera similar, la función principal de un cartel en la puerta de una fábrica es mostrar el nombre de la compañía, pero la función secundaria es la de reflejar la imagen de una compañía.

Protección

A medida que los activos físicos se vuelven más complejos, la cantidad de formas en las que pueden fallar crece de forma casi exponencial. Esto trajo aparejado un crecimiento en la variedad y la severidad de las consecuencias de las fallas. Para eliminar (o al menos reducir) estas consecuencias, cada vez se usan más dispositivos de protección automáticos. Estos dispositivos pueden trabajar de cinco maneras diferentes:

- Alertando al operario en caso de condiciones de funcionamiento anormales *(luces de advertencia y alarmas sonoras que responden a los efectos de la falla. Los efectos se monitorean con distintos tipos de sensores incluyendo interruptores de nivel, celdas de carga, dispositivos de sobrecarga o sobrevelocidad, sensores de vibración o de proximidad, interruptores de temperatura y de presión)*
- Apagando el equipo cuando se produce la falla *(estos dispositivos también responden a los efectos de la falla, usan el mismo tipo de sensores y a veces los mismos circuitos que las alarmas, pero con diferentes configuraciones)*
- Eliminando o minimizando las condiciones anormales que siguen a la falla y que de otra manera causarían un daño mucho mayor *(equipamiento para combatir incendios, válvulas de seguridad, discos de ruptura, equipamiento médico de emergencia)*
- Reemplazando a la función que ha fallado *(cualquier clase de equipo sustituto, componentes estructurales redundantes)*

- Previniendo la aparición de situaciones peligrosas *(protecciones)*

El propósito de estos dispositivos es el de proteger de las fallas a la gente, o proteger a las máquinas o proteger a los productos, y a veces proteger a todos estos al mismo tiempo.

Los dispositivos de protección aseguran que la falla de la función protegida será mucho menos seria que si no tuviera protección. La existencia de protección también significa que los requerimientos de mantenimiento de la función protegida serán mucho menos estrictos de lo que podrían ser si no estuviese protegida.

Considere una fresadora cuya fresa se acciona por medio de una correa dentada. Si se cortara la correa y no existiera ninguna protección, el mecanismo de alimentación podría llevar la fresa detenida hacia la pieza de trabajo (o viceversa) y causar un importante daño secundario. Esto puede evitarse de dos maneras:

- Implementando una rutina de mantenimiento proactivo integral diseñado para prevenir la falla de la correa.
- Instalando una protección como ser un detector que en caso que se corte la correa apague la máquina lo antes posible. En este caso, la única consecuencia de una correa cortada es una breve detención de la máquina mientras se reemplaza la misma, con lo que la política de mantenimiento más costo-eficaz podría ser simplemente dejar que la correa se corte. Pero esta política sólo es válida mientras que el sensor funcione, con lo que debe hacerse lo necesario para asegurar que esto sea así.

El mantenimiento de dispositivos de protección –especialmente aquellos dispositivos sin protección inherente- se verá con mayor detalle en los Capítulos 5 y 8. De cualquier forma, este ejemplo muestra dos puntos fundamentales:

- Que muchas veces los dispositivos de protección necesitan más mantenimiento de rutina que los dispositivos a los que protegen.
- Que no podemos desarrollar un programa de mantenimiento sensato para la función protegida sin considerar al mismo tiempo los requerimientos de mantenimiento del dispositivo de protección.

Sólo se pueden considerar los requerimientos de mantenimiento de los dispositivos de protección si comprendemos sus funciones. Con lo que cuando listamos las funciones de cualquier activo, debemos listar las funciones de *todos* los dispositivos de protección.

El último punto a tener en cuenta respecto a los dispositivos de protección es la forma en que deben ser descriptas. Estos dispositivos actúan por excepción (en otras palabras, cuando algo anda mal), con lo cual es importante describirlos correctamente. Particularmente, los enunciados de las funciones de protección deben incluir las palabras "si" o "en caso de", seguidas de una breve descripción de las circunstancias o del evento que debería activar la protección.

Por ejemplo, si hubiésemos descripto la función de un cable de parada de emergencia como "detener la máquina", cualquiera que leyera esta descripción podría pensar que este cable es el dispositivo normal de puesta en marcha y detención. Para evitar toda ambigüedad, la función del cable de parada de emergencia debería describirse de la siguiente manera:

- *Ser capaz de* detener la máquina *en caso de* emergencia desde cualquier punto de su longitud del que se lo accione.

La función de una válvula de seguridad podría describirse como:

- *Ser capaz* de aliviar la presión de la caldera *si* excede los 250 psi

Economía/eficiencia

Cualquiera que usa un activo de la clase que sea, tiene recursos financieros finitos. Esto los lleva a poner un límite a lo que están preparados a gastar en su operación y mantenimiento. Cuánto están preparados a gastar está determinado por una combinación de tres factores:

- La cantidad de sus recursos financieros actuales
- Cuánto quieren lo que sea el activo hará por ellos
- La disponibilidad y el costo de las formas alternativas de alcanzar el mismo fin

Desde el punto de vista del contexto operativo, las expectativas funcionales relativas a los costos usualmente se expresan como presupuesto de gastos.

Desde el punto de vista del activo, las cuestiones económicas pueden incluirse directamente en la definición de funciones que definirán las expectativas de los usuarios en relación a temas como la economía de combustible y la pérdida de material en proceso.

Por ejemplo, se podría pedir a un auto "No consumir más de 6 litros de combustible cada 100 km. a una velocidad constante de 120 km./h, y no más de 4 litros de combustible cada 100 km. a 60 km./h". A una usina térmica podría pedirse "Transformar al menos el 45% de la energía latente en el combustible en energía eléctrica". Una planta que usa un solvente costoso podría querer "No perder más de 0,5% de solvente X por mes".

Funciones superfluas

A veces se encuentran ciertos componentes u objetos que son completamente superfluas. Esto pasa por lo general cuando el equipo se ha modificado frecuentemente a lo largo del tiempo, o bien cuando el equipo fue sobreespecificado. (Estos comentarios no se aplican a componentes redundantes incluidos por razones de suguridad, sino a componentes que no cumplen propósito alguno en el contexto operacional actual).

Por ejemplo, una válvula reductora colocada en la línea de abastecimiento entre el colector de gas y la turbina de gas. La función original de la válvulva era la de reducir la presión de 120 psi a 80 psi. El sistema fue posteriormente modificado reduciendo

la presión en el colector a 80 psi, a partir de lo cual la válvula no cumple ningún propósito útil .

Muchas veces se argumenta que estos componentes no molestan para nada y que cuesta dinero sacarlos de donde están, con lo que la solución más simple podría ser dejarlos hasta que se desarme toda la planta. Desafortunadamente, en la práctica esto es verdad en contadas ocasiones. A pesar que estos componentes no tengan una función positiva, aún pueden fallar y por lo tanto reducir la confiabilidad de toda la planta. Para evitar esto, necesitan mantenerse, lo que significa que aún consumen recursos.

No es raro encontrar que en sistemas complejos entre el 5 y el 20% de los componentes sean superfluos en el sentido descripto anteriormente. Si eliminamos estos componentes, eliminaremos también los problemas de mantenimiento y los costos que traen aparejados. No obstante, antes de que esto pueda hacerse con confianza, debemos identificar y entender con claridad las funciones de estos componentes.

Un comentario sobre confiabilidad

Muchas veces existe la tentación de escribir funciones de "confiabilidad" como ser "Operar 7 días a la semana, 24 horas por día". De hecho, la confiabilidad no es una función por sí misma. Es una expectativa de funcionamiento que impacta en todas las demás funciones. La forma de tratarla adecuadamente es analizando correctamente todos los modos de falla que pueden causar cada una de las pérdidas de función. Este punto se discutirá con profundidad en el Capítulo 13.

Usando las categorías ESCAPES

Siempre habrá dudas acerca de la categoría de ESCAPE a la cuál pertenecen algunas funciones. Por ejemplo, la función del mecanismo de reclinado de un asiento ¿Es una función de "control" o de "confort"?.

En la práctica no importa la clasificación precisa. Lo que importa es que identifiquemos y definamos todas las funciones que el usuario requiere. La lista de categorías sirve como una ayuda memoria para asegurar que no nos olvidemos de incluir ninguno de esos requerimientos.

2.5 Cómo deben listarse las funciones

Una definición funcional escrita adecuadamente –especialmente si está totalmente cuantificada- define con precisión los objetivos de desempeño. Esto asegura que todos los involucrados conocen exactamente qué se quiere, lo que

a su vez asegura que las actividades de mantenimiento permanezcan enfocadas hacia las necesidades reales de los usuarios (o clientes). También ayuda a absorber variaciones originadas por cambios de expectativas sin hacer obsoleto todo el emprendimiento.

Las funciones se listan en la columna izquierda de la Hoja de Información de RCM. Las funciones primarias se escriben primero, y se numeran como lo muestra la Figura 2.9. (Estas funciones se aplican al sistema de escape de una turbina de gas de 5megawatts).

Al final del Capítulo 4 podemos ver una hoja de información completa.

RCM II
HOJA DE INFORMACIÓN
1998 ALADON LTD ©

SISTEMA
SUBSISTEMA

	FUNCIÓN
1	Dar salida sin restricción a todos los gases de escape calientes de la turbina hasta un punto fijo situado a 10 metros por encima del techo de la sala de turbinas.
2	Reducir los niveles de ruido del escape a un nivel ISO 30 a 150 metros de distancia
3	Asegurar que la temperatura superficial de los conductos dentro de la sala de turbinas no exceda los 60°C
4	Transmitir una señal de alarma al sistema de control de la turbina si la temperatura de los gases del escape excede los 475°C y una señal para apagar el equipo si excede los 500°C a cuatro metros de la turbina.
5	Permitir el libre movimiento de los conductos en respuesta a los cambios de temperatura.

Figura 2.9: Describiendo funciones

3 Fallas Funcionales

En el Capítulo l se explicó que el proceso de RCM implica la formulación de siete preguntas acerca del activo seleccionado:

- ***¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociados al activo en su actual contexto operacional?***
- ***¿De qué manera falla en satisfacer dichas funciones?***
- ***¿Cuál es la causa de cada falla funcional?***
- ***¿Qué sucede cuando ocurre cada falla?***
- ***¿En qué sentido es importante cada falla?***
- ***¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir cada falla?***
- ***¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada?***

El Capítulo 2 discutió detalladamente la primera pregunta. Después de una breve introducción del concepto general de falla, este capítulo considera la segunda pregunta, que tratará con las fallas funcionales.

3.1 Falla

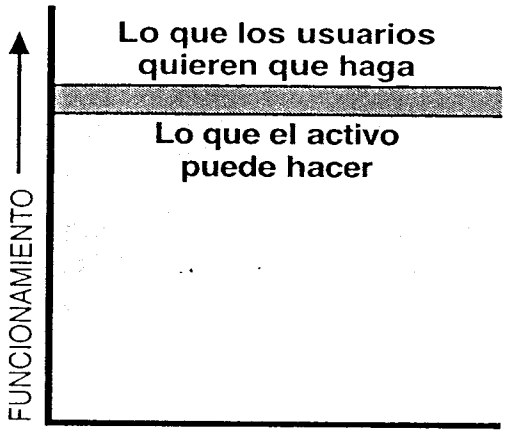
En el capítulo anterior, vimos cómo las personas y las organizaciones adquieren activos físicos porque desean que realicen una tarea. No sólo eso sino que también esperan que cumplan sus funciones en relación con ciertos estándares aceptables de funcionamiento.

En el Capítulo 2 se explicó que la capacidad inicial de un activo debe ser mayor que el estándar de funcionamiento deseado, de manera de poder cumplir con lo que los usuarios desean y admitir el desgaste. Por esto, mientras la capacidad del activo continúe superando el estándar de funcionamiento deseado, el usuario va a estar satisfecho.

Sin embargo, si por alguna razón es incapaz de hacer lo que el usuario desea, este considerará que ha fallado.

Esto lleva a la definición básica de falla:

Se define "falla" como la incapacidad de cualquier activo de hacer aquello que sus usuarios quieren que haga



Esto se muestra en la Figura 3.1.
Por ejemplo, si la bomba que se muestra en la figura 2.1 de la Página 24 es incapaz de bombear 800 litros por minuto, no le será posible mantener el tanque lleno y por lo tanto los usuarios considerarán que "falló".

Figura 3.1: Estado general de falla

3.2 Fallas Funcionales

La definición citada trata el concepto de falla de la manera que se aplica a un activo como un todo. En la práctica, esta definición es un poco vaga ya que no distingue claramente entre el estado de falla (falla funcional) y los eventos que causan este estado de falla (modos de falla). También resulta simplista, ya que no tiene en cuenta el hecho que cada activo tiene más de una función, y por lo general cada función tiene más de un estándar de funcionamiento deseado. Las implicancias se estudian en los siguientes párrafos.

Funciones y Fallas

Hemos visto que si un activo no hace aquello que sus usuarios quieren que haga, ha fallado. También vimos que cualquier cosa que deba hacer se define como una función y que cada activo tiene más de una y por lo general varias funciones diferentes. Como es posible que fallen todas y cada una de esas funciones, se deduce que todo activo puede ser afectado por diversos estados de falla diferentes.
Por ejemplo, la bomba en la Figura 2.1 tiene al menos dos funciones. Una es la de bombear agua a no menos de 800 litros por minuto y la otra es contener el agua. Es perfectamente posible que dicha bomba sea capaz de bombear la cantidad requerida (no hay falla de la función primaria) a la vez que pierda una cantidad excesiva de líquido (falla en la función secundaria).

Por otra parte, es posible que la bomba se deteriore hasta el punto de no poder bombear la cantidad requerida (falla de la función primaria), mientras que contiene el líquido (no hay falla de la función secundaria).

Esto muestra porqué es mas preciso definir una falla en términos de pérdida de una función específica, más que la falla del activo como un todo. También muestra por qué el proceso RCM utiliza el término "falla funcional" para describir estados de falla y no a la falla por sí sola. Sin embargo para completar la definición de falla, debemos también observar detenidamente el tema de los estándares de funcionamiento.

Estándares de funcionamiento y Fallas

Como se discutió en la primer parte de este capítulo, el límite entre el funcionamiento satisfactorio y la falla está determinado por el estándar de funcionamiento. Dado que este estándar de funcionamiento se aplica a funciones individuales, "falla" puede ser definida precisamente por la definición de falla funcional:

Una falla funcional se define como la incapacidad de cualquier activo físico de cumplir una función según un parámetro de funcionamiento aceptable para el usuario.

Los párrafos siguientes exploran diferentes aspectos de las fallas funcionales bajo los siguientes encabezados:

- Falla total y parcial
- Límites superiores e inferiores
- Instrumentos de medición e indicadores
- El contexto operacional.

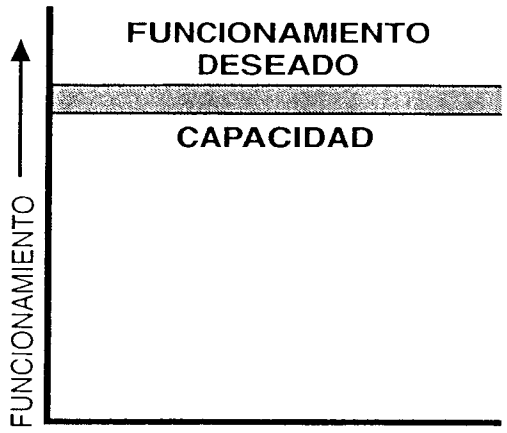


Figura 3.2: Falla funcional

Falla total y parcial

La definición citada más arriba de una falla funcional cubre la pérdida total de la función. También abarca situaciones en las que aún funciona, pero fuera de los límites admisibles.

Por ejemplo, la función primaria de la bomba citada anteriormente se puede definir como "bombear agua del tanque X al tanque Y a no menos de 800 litros por minuto." Esta función podría sufrir dos fallas funcionales:

- No bombea nada de agua
- Bombea agua a menos de 800 litros por minuto.

Una pérdida parcial de función casi siempre proviene de modos de falla diferentes de los que provocan una pérdida total, y las consecuencias casi siempre son diferentes. Por esta razón deben registrarse *todas* las fallas funcionales asociadas a cada función.

Registrar todas las fallas funcionales asociadas con cada función

Nótese que la falla parcial no debe confundirse con la situación en la que el activo, habiéndose deteriorado significativamente, aún está sobre el nivel de funcionamiento requerido por el usuario.

Por ejemplo, la capacidad inicial de la bomba de la Figura 2.1 es de 1000 litros por minuto. El desgaste del impulsor es inevitable, con lo cual su capacidad decaerá. Mientras que no decaiga hasta el punto en el cual la bomba es incapaz de bombear 800 litros por minuto, todavía será capaz de llenar el tanque y por lo tanto mantener a los usuarios satisfechos en el contexto descripto.

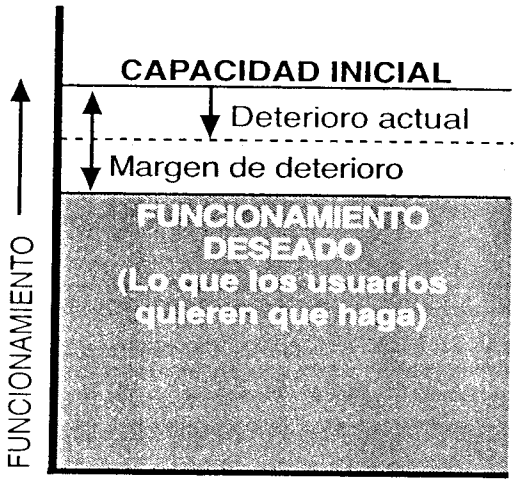


Figura 3.3:
El activo sigue estando bien a pesar de cierto deterioro

No obstante, si la capacidad del activo se deteriora lo suficiente como para caer debajo del funcionamiento deseado, sus usuarios considerarán que falló.

Límites superiores e inferiores

El capítulo anterior explica que los estándares de funcionamiento asociados a algunas funciones incorporan límites superiores e inferiores. Dichos límites significan que el activo físico ha fallado si produce productos que están por arriba del límite superior, o por debajo del inferior. En estos casos la brecha del límite superior por lo general necesita identificarse por separado de la brecha del límite inferior. Esto se debe a que los modos de falla y/o las consecuencias asociadas por exceder el límite superior suelen ser diferentes de las asociadas por no alcanzar el límite inferior.

Por ejemplo, la función primaria de la máquina envasadora de caramelos vista en el Capítulo 2 es "Empaquetar 250+/- 1 g de caramelos a una velocidad mínima de 75 bolsas por minuto". Esta máquina falló si:

- Se para completamente
- Empaca más de 251 g de caramelos en una bolsa
- Empaca menos de 249 g de caramelos en una bolsa
- Empaca a una velocidad menor de 75 bolsas por minuto

La función de la rectificadora mencionada anteriormente era "Rectificar una bancada a razón de 3,00 ± 0,03 minutos a un diámetro de 75 ± 0,1mm con una superficie de acabado de Ra 0,2".

- Totalmente incapaz de rectificar la pieza
- Rectifica la pieza en un tiempo superior a 3,03 minutos
- Rectifica la pieza en un tiempo inferior a 2,97 minutos
- El diámetro excede los 75,1 mm
- El diámetro está por debajo de los 74,9 mm
- Rugosidad superficial excesiva

Por supuesto, si un parámetro particular tiene solamente un límite, solo puede tener un estado de falla. Por ejemplo, la ausencia de un límite de rugosidad inferior en el ejemplo dado sugiere que no es posible hacer que una pieza esté demasiado pulida. En algunas circunstancias realmente esto podría no ser verdad con lo que debe tenerse cuidado al verificar este punto cuando se analizan funciones de este tipo.

En la práctica los estados de falla asociados a los límites superiores e inferiores pueden manifestarse de dos maneras. En primer lugar, el rango de capacidad podría ir mas allá de los límites de especificación sólo en una dirección, como lo muestra la figura 3.4, que muestra que ese tipo de estado de falla puede representarse como una serie de disparos hechos en un blanco que están muy juntos unos de otros pero fuera del centro.

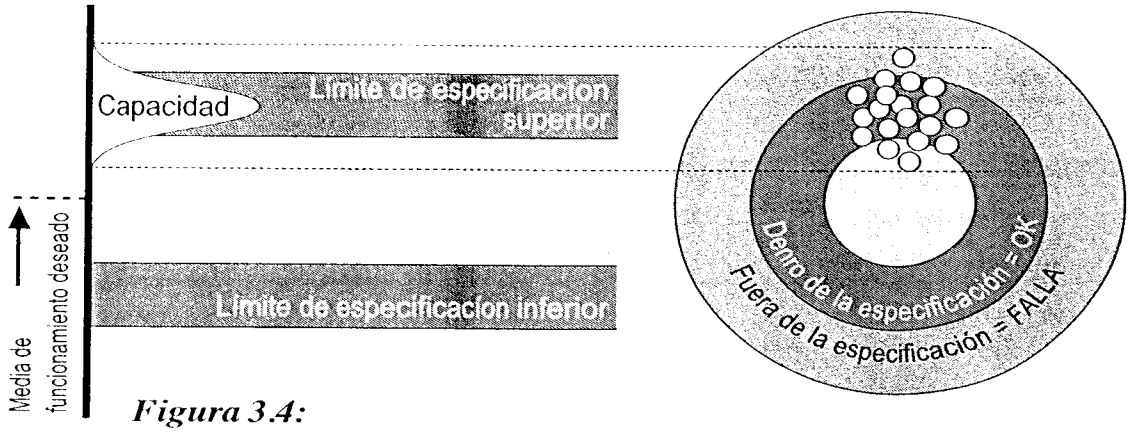


Figura 3.4:
La capacidad va más allá del límite superior

El segundo estado de falla ocurre cuando el rango de capacidad es tan amplio que va más allá de ambos límites, el superior y el inferior. La Figura 3.5 muestra que puede representarse como una serie de disparos esparcidos alrededor de todo el blanco.

Notemos que en ambos casos no todos los productos producidos por el proceso en cuestión estarán fallado. Si la ruptura del límite es menor, sólo será producido un pequeño porcentaje de productos que están fuera de especifi-

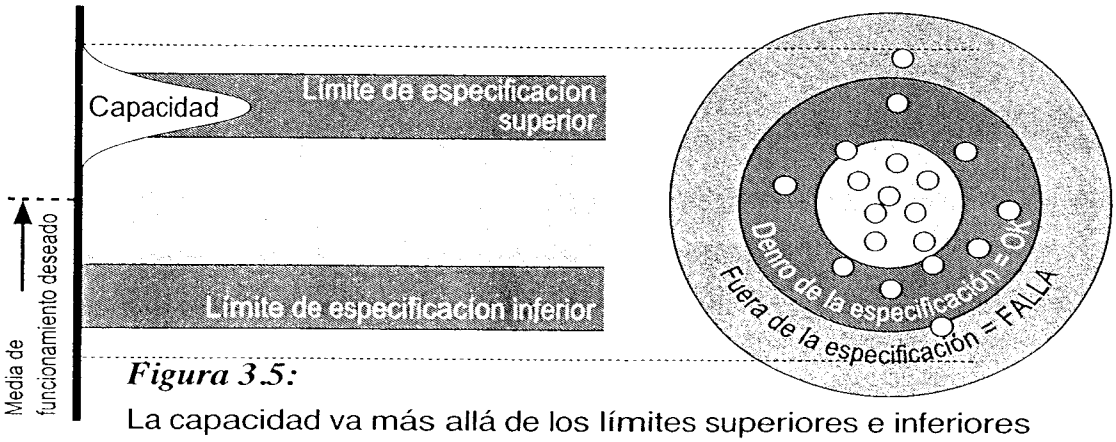


Figura 3.5:
La capacidad va más allá de los límites superiores e inferiores

caciones. Sin embargo, cuanto más alejado del centro esté el grupo en el primer caso, o cuanto más amplio sea el rango en el segundo caso, más porcentaje de fallas habrá.

La Figura 2.6 mostró un proceso que está bajo especificación y control. La Figura 3.4 y 3.5 muestran que el proceso está fuera de especificación y control con lo que está en un estado de falla. Los modos de falla que pueden causar este estado de falla se discutirán en el próximo capítulo. (El capítulo 7 trata con las implicancias de un proceso que está fuera de control pero dentro de especificación.)

Medidores e indicadores

La discusión anterior se focalizó en la calidad del producto. En el Capítulo 2 se mencionó que los límites superior e inferior también se aplican a los estándares de funcionamientos de medidores, indicadores, sistemas de control y de protección. Dependiendo del modo de falla y sus consecuencias, también podría ser necesario tratar sus límites, por separado, en el momento en que se listan las fallas funcionales.

Por ejemplo, la función de un sensor de temperatura puede enunciarse como "mostrar la temperatura del proceso X dentro de (digamos) 2% de la temperatura real del proceso". Este medidor puede sufrir tres fallas funcionales distintas:

- Incapaz de mostrar la temperatura del proceso.
- Muestra una temperatura más de 2% más alta que la temperatura real del proceso.
- Muestra una temperatura más de 2% más baja que la temperatura real del proceso.

Fallas funcionales y contexto operacional

La definición exacta de falla para cualquier activo depende en gran parte de su contexto operacional. Esto significa que de la misma manera que no debemos generalizar acerca de funciones de activos idénticos, también tenemos que tener cuidado en no generalizar acerca de sus fallas funcionales.

Por ejemplo, hemos visto como la bomba que se muestra en la Figura 2.1 falla tanto si es incapaz de bombear agua, como si no fuera capaz de bombear hasta 800 litros/minuto. Si la misma bomba se utiliza para llenar un tanque del cual se extraen 900 litros/minuto, el segundo estado de falla ya ocurre si su capacidad cae por debajo de los 900 litros/minuto.

¿Quién debe establecer los estándares?

Un tema que necesita una consideración cuidadosa cuando se definen fallas funcionales, es el "usuario". Hasta el día de hoy la mayoría de los programas de mantenimiento que están en uso en el mundo son llevados a cabo sólo por el personal de mantenimiento. Estas personas frecuentemente deciden qué se entiende por "falla".

En la práctica, su visión de la falla suele ser bastante diferente a la del usuario, a veces con consecuencias desastrosas para la efectividad de los programas.

Por ejemplo, una función de un sistema hidráulico es la de contener aceite. El grado

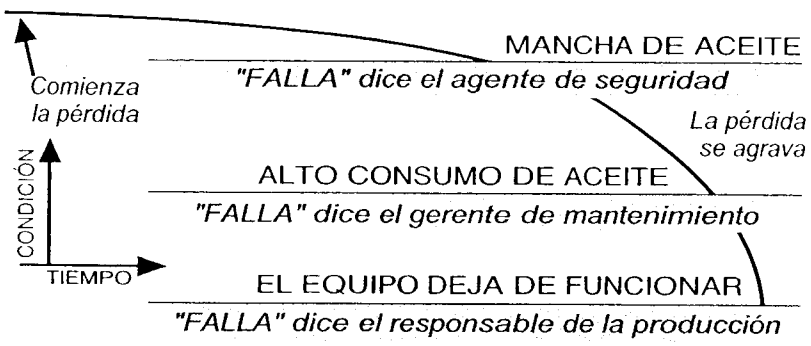


Figura 3.6: Diferentes puntos de vista de las fallas

de eficacia con la que cumple esta función está sujeto a diversas consideraciones. Hay responsables de producción que creen que una pérdida hidráulica sólo constituye una falla funcional si es tan grave como para que el equipo deje de funcionar totalmente. En cambio, a juicio de un gerente de mantenimiento puede decir que se produjo una falla funcional cuando la pérdida causa un consumo excesivo de aceite hidráulico en un período de tiempo determinado. Por su parte, un agente de seguridad podría sostener que ocurre una falla funcional si la pérdida produce una mancha de aceite en el suelo capaz de hacer resbalar a la gente o representar un riesgo de incendio. Esto está ilustrado en la Figura 3.6.

El gerente de mantenimiento (que controla el presupuesto del aceite hidráulico) puede pedir a los operadores que accedan a los sistemas hidráulicos para reparar las pérdidas "porque el consumo de aceite es excesivo". Sin embargo el acceso puede serle negado porque los operadores opinan que la máquina todavía "funciona correctamente". Cuando esto sucede el personal de mantenimiento (1) registra que la máquina "no fue entregada para su mantenimiento preventivo", y (2) se hacen a la idea de que sus colegas de producción "no creen en MP". Por razones similares el gerente de mantenimiento puede no autorizar que una persona de mantenimiento repare una pequeña pérdida cuando lo pide el agente de seguridad.

De hecho, seguramente los tres grupos creen en la prevención. El problema real es que no se han tomado el trabajo de ponerse de acuerdo en qué entienden exactamente por "falla", por lo que no tienen un entendimiento común de lo que están tratando de prevenir.

Este ejemplo ilustra tres puntos centrales:

- El estándar de funcionamiento utilizado para definir una falla funcional – en otras palabras el punto en que decimos "hasta aquí y no más" – define el nivel de mantenimiento proactivo necesario para evitar esa falla (en otras palabras, para mantener el nivel de funcionamiento requerido)
- Puede ahorrarse mucho tiempo y energía si se definen con claridad los estándares de funcionamiento *antes de que se produzca la falla*
- Los estándares de funcionamiento utilizados para definir la falla *deben* ser establecidos por el personal de mantenimiento y de operaciones trabajando en conjunto con cualquier otra persona que tenga algo legítimo que decir acerca del comportamiento del activo.

Cómo deben ser registradas las Fallas Funcionales

Las fallas funcionales se escriben en la segunda columna de la hoja de trabajo de información. Son codificadas alfabéticamente, como lo muestra la figura 3.7.

RCMII
HOJA DE TRABAJO DE INFORMACIÓN
© 1998 ALADON LTD

SISTEMA *Turbina de 5 MW*

SUB-SISTEMA *Sistema de escape*

	FUNCION		FALLA FUNCIONAL
1	Dar salida sin restricción a todos los gases de escape calientes de la turbina hasta un punto fijo situado a 10 metros por encima del techo de la sala de turbinas.	A B C D	Totalmente incapaz de conducir el gas Flujo de gas restringido Incapaz de contener los gases No puede transportar los gases a un punto situado a 10 m encima del techo
2	Reducir los niveles de ruido del escape a un nivel ISO 30, a 150 metros	A	El nivel de ruido excede del nivel ISO 30 a 150 metros
3	Asegurar que la temperatura superficial de los conductos dentro de la sala de turbinas no exceda los 60°C	A	La temperatura superficial del conducto es mayor a 60°C
4	Transmitir una señal de alarma al sistema de control de la turbina si la temperatura de los gases del escape excede los 475°C y una señal para detener el equipo si excede los 500°C a cuatro metros de la turbina.	A B	Incapaz de transmitir la señal si la temperatura de escape es mayor a los 475°C Incapaz de transmitir una señal de apagado si la temperatura excede los 500°C
5	Permitir el libre movimiento de los conductos en respuesta a los cambios de temperatura.	A	No permite el libre movimiento de los conductos

Figura 3.7: Describiendo fallas funcionales

4. Análisis de Modos de Falla y sus Efectos (AMFE)

Hemos visto que al definir las funciones y los parámetros de funcionamiento deseados de cualquier activo físico, definimos los objetivos de mantenimiento para dicho activo. También vimos que definiendo fallas funcionales podemos determinar exactamente qué queremos decir con "falla". Estas dos cuestiones son consideradas por las primeras dos preguntas del proceso RCM.

Las siguientes dos preguntas buscan identificar aquellos *modos de falla* que sean posibles causantes de cada falla funcional, y determinar los *efectos de falla* asociados con cada modo de falla. Esto se realiza a través de un *análisis de modos de falla y efectos (AMFE)* para cada falla funcional.

Este capítulo describe los elementos centrales de dicho análisis, comenzando por la definición del término "modo de falla".

4.1. ¿Qué es un Modo de Falla?

Un modo de falla podría ser definido como cualquier evento que pueda causar la falla de un activo físico (o sistema o proceso). Sin embargo, como explicamos en el Capítulo 3, es vago y simplista aplicar el término "falla" a un activo físico de manera general. Es mucho más preciso distinguir entre "una falla funcional" (un *estado* de falla) y un "modo de falla" (un *evento* que puede causar un estado de falla). Esta distinción lleva a una definición más precisa de un modo de falla, como ser:

Un modo de falla es cualquier evento que causa una falla funcional.

La mejor manera de mostrar la conexión y la diferencia entre los estados de falla y los eventos que podrían causarlos es primero hacer un listado de fallas funcionales, y luego registrar los modos de falla que podrían causar cada falla funcional, como lo muestra la Figura 4.1.

RCM II
HOJA DE INFORMACIÓN
© 1998 ALADON LTD

SISTEMA: *Sistema de Bombeo de Agua de Refrigeración*

SUB-SISTEMA:

FUNCIÓN		FALLA FUNCIONAL (Pérdida de Función)		MODO DE FALLA (Causa de la Falla)	
1	Transferir agua desde el Tanque X al tanque Y a no menos de 800 litros por minuto	A	Incapaz de transferir agua	1	Cojinetes agarrotados
				2	**Impulsor loco, suelto**
				3	**Impulsor trabado por un cuerpo extraño**
				4	El cubo de acople falla por fatiga
				5	Motor quemado
				6	Válvula de ingreso trabada en posición cerrada
				7	....etc.
		B	Transfiere menos de 800 litros por minuto	1	Impulsor gastado
				2	Línea de succión parcialmente bloqueada
				3	...etc.

Figura 4.1: Modos de falla de una bomba

La Figura 4.1 también indica que, como mínimo, la descripción de un modo de falla debe consistir de un sustantivo y un verbo. La descripción debe ser lo suficientemente detallada para poder seleccionar una estrategia de manejo de falla apropiada, pero no tanto como para perder mucho tiempo en el propio proceso de análisis.

Los verbos que se usan para describir los modos de falla deben elegirse cuidadosamente, ya que tienen una influencia muy fuerte en el proceso posterior de selección de políticas de manejo de falla. Por ejemplo, deben usarse con moderación expresiones como "falla" o "rotura" o "mal funcionamiento de", ya que dan muy poca información sobre cuál podría ser la manera adecuada de manejar esta falla. El uso de verbos más específicos permite seleccionar la política más adecuada dentro de un rango completo de posibilidades.

Por ejemplo, un término como "fallan los acoplamientos" no nos da ninguna pista sobre qué podríamos hacer para anticipar o prevenir la falla. Sin embargo, si decimos "Los pernos de los acoplamientos están flojos" o "Nodo de acoplamiento desgastado por fatiga", se nos hace más sencillo identificar una tarea proactiva que pueda aplicarse.

En el caso de válvulas o interruptores, también debe indicarse si la pérdida de la función se da porque el ítem falla en posición abierta o en posición cerrada: "la válvula se atasca en posición cerrada" da mucho más información que decir "la válvula falla". En muchos casos, es necesario ir un paso más allá para expresar de la manera más clara posible un modo de falla.

Por ejemplo, decir "la válvula se atasca en posición cerrada por corrosión en la rosca principal" es mucho más claro que decir "la válvula se atasca en posición cerrada". De manera similar podríamos necesitar distinguir entre "Se agarrotan los rodamientos por desgaste normal" y "se agarrotan los rodamientos por falta de lubricación adecuada"

Estos temas se tratarán más extensamente en este capítulo, pero antes nos preguntaremos por qué es necesario analizar los modos de falla.

4.2. ¿Por qué analizar los Modos de Falla?

Una máquina puede fallar por diversos motivos. Un grupo de máquinas o un sistema como una línea de producción puede fallar por cientos de razones. Para una planta entera, los números ascienden a miles, inclusive hasta decenas de miles.

La mayoría de los gerentes no se sienten muy cómodos al pensar en el tiempo y el esfuerzo involucrado en la identificación de todos estos modos de falla. Muchos deciden que este tipo de análisis es demasiado trabajoso, y abandonan la idea por completo. Pero cuando hacen esto, pasan por alto el hecho que en el día a día *el mantenimiento es realmente manejado al nivel de modo de falla*. Por ejemplo:

- Las órdenes de trabajo o pedidos de trabajo surgen para cubrir modos de falla específicos.
- El planeamiento del mantenimiento diario se realiza para tratar modos de falla específicos.
- En la mayoría de las empresas industriales el personal de mantenimiento y operaciones tiene reuniones cada día. Las reuniones casi siempre consisten en discusiones acerca de lo que ha fallado, qué las causó, quién es responsable, qué se está haciendo para reparar el problema y a veces, qué puede hacerse para prevenir que vuelva a suceder. Entonces casi toda la reunión se destina a hablar acerca de modos de falla.
- Generalmente, los sistemas de registro de historia técnica registran modos de falla individuales (o al menos qué fue hecho para rectificarlos).

En la mayoría de estos casos, los modos de falla son discutidos, registrados, y manejados *luego* de haber ocurrido. Tratar fallas después de que hayan ocurrido es por supuesto la esencia del mantenimiento *reactivo*.

Por otro lado, el mantenimiento proactivo significa manejar los eventos *antes* de que ocurran, o al menos decidir cómo deberían ser manejados si llegaran a ocurrir. Para ello debemos saber por adelantado qué eventos pueden ocurrir. Los "eventos" en este contexto son los modos de falla. Entonces si deseamos aplicar un mantenimiento verdaderamente proactivo a cualquier activo físico, debemos tratar de identificar todos los modos de falla que puedan afectarlo. El ideal sería poder identificarlos antes de que ocurriesen o al menos antes de que vuelvan a ocurrir.

Una vez que cada modo de falla ha sido identificado es posible considerar qué sucede cuando ocurre, evaluar las consecuencias y decidir si debiera hacerse algo para anticipar, prever, detectar, corregir, o hasta rediseñar.

Entonces, el proceso de selección de tareas de mantenimiento, y gran parte del manejo de estas tareas, se lleva a cabo al nivel del modo de falla. Esto se ilustra brevemente en el ejemplo siguiente y se verá con mayor profundidad en el resto de los capítulos:

Consideremos nuevamente la hoja de información que muestra la Figura 4.1. Esta hoja de información corresponde a la función primaria de la bomba de la Figura 2.1. La Figura 4.2 muestra que la bomba centrífuga es de acople directo, de una etapa, de aspiración axial y sellada con un sello mecánico. En este ejemplo vemos de cerca tres modos de falla que probablemente afecten sólo al impulsor. Dichos modos de falla se resumen en la Figura 4.2 y se describen a continuación:

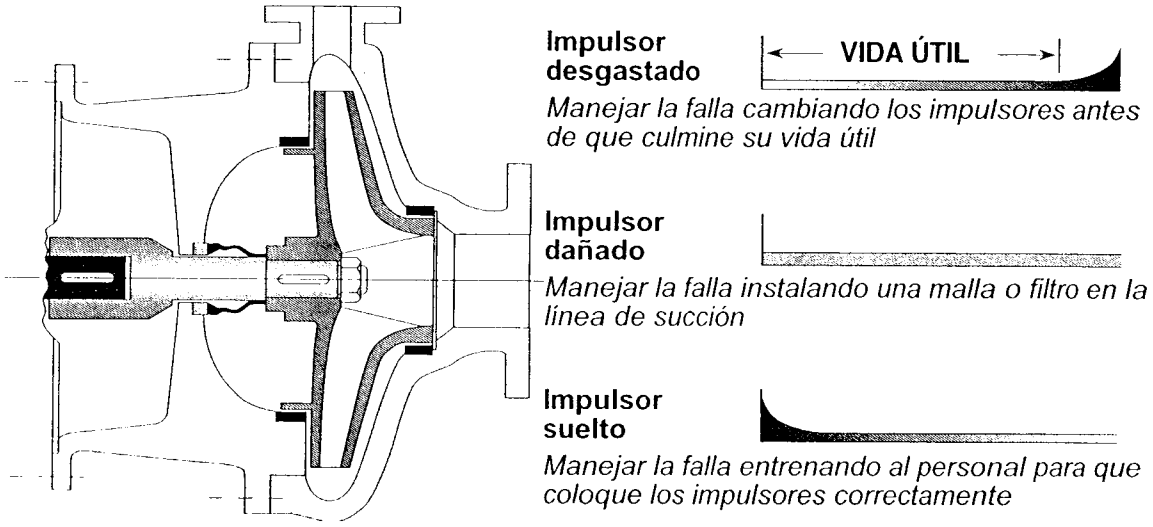


Figura 4.2: Fallas del impulsor de una bomba centrífuga.

- Impulsor desgastado: probablemente sea un fenómeno relacionado con la edad. Como lo muestra la Figura 4.1, esto significa que probablemente tenga correspondencia con el segundo de los seis patrones de falla mostrados en la Figura 1.5 de la página 12 (Patrón de Falla B). Entonces, si conocemos aproximadamente cual es la vida útil del impulsor, y si las consecuencias de la falla son lo suficientemente serias, es posible que decidamos prevenir la falla cambiando el impulsor justo antes del final de su vida útil.
- Impulsor trabado por un cuerpo extraño: El hecho de que un cuerpo extraño aparezca en la línea de succión seguramente no tenga relación alguna con el tiempo que el impulsor ha estado funcionando. Entonces podemos decir que este modo de falla ocurrirá de manera aleatoria (Patrón de Falla E de la Figura 1.5). Tampoco habría ninguna advertencia de que está por ocurrir. Por lo tanto, si las consecuencias fuesen lo suficientemente serias, y la falla ocurriera seguido, podríamos considerar modificar el sistema, quizás instalando algún tipo de filtro o pantalla en la línea de succión.

- Impulsor suelto: Si el mecanismo de ajuste del impulsor esta diseñado adecuadamente y el impulsor sigue soltándose, seguramente es porque no fue bien colocado. (Si supiéramos que este es el caso, entonces quizás el modo de falla debería describirse como "Impulsor colocado incorrectamente".) Esto a su vez significa que el modo de falla tiene más probabilidades de ocurrir al poco tiempo de estar funcionando, como lo muestra la Figura 4.2 (Patrón de Falla F en la Figura 1.5), y seguramente lo resolveríamos mejorando el entrenamiento o los procedimientos correspondientes.

Este ejemplo refuerza la idea de que el nivel al que manejamos el mantenimiento de cualquier activo físico no es el nivel del activo como un todo (en este caso, la bomba), ni el nivel del componente (en este caso, el impulsor), sino el nivel de cada modo de falla. Entonces, antes de desarrollar una estrategia sistemática de manejo proactivo de mantenimiento para cualquier activo físico, *debemos identificar cuáles son esos modos de falla* (o cuáles podrían ser).

El ejemplo también sugiere que uno de los modos de falla podría ser eliminado por un cambio en el diseño, y otro mejorando el entrenamiento o los procedimientos. Entonces, *no todo modo de falla es tratado con reacondicionamiento cíclico. En los Capítulos 5 a 9* se describe un procedimiento ordenado para decidir cuál es la manera más adecuada para tratar cada falla.

Por ejemplo podríamos monitorear el desgaste del impulsor, observando la performance de la bomba y cambiar el impulsor sólo cuando sea necesario. También deberíamos considerar que si instalamos un filtro en la línea de succión, agregaríamos tres fallas posibles más que necesitarían analizarse por separado (podría bloquearse, podría estar agujereada y por tanto dejar de filtrar, y podría deshacerse y dañar el impulsor.)

En los Capítulos 6 a 9 analizaremos cada alternativa con más detalle.

Todos éstos puntos indican que la identificación de los modos de falla es uno de los pasos más importantes en el desarrollo de cualquier programa que pretenda asegurar que el activo físico continúe cumpliendo sus funciones. En la práctica, dependiendo de la complejidad del activo físico, su contexto operacional y el nivel al que esta siendo analizado, se registran entre uno y treinta modos de falla por cada falla funcional.

Las próximas dos secciones de este capítulo consideran dos de los temas más importantes al respecto:

- categorías de modos de falla
- nivel de detalle

Las últimas tres partes del capítulo consideran los efectos de falla, fuentes de información para un AMFE, y cómo deben ser registrados los modos de falla y sus efectos.

4.3. Categorías de Modos de Falla

Algunas personas consideran que el mantenimiento se hace únicamente para combatir el deterioro. Otras van un paso más allá y dicen que el AMFE llevado a cabo en un activo sólo debe considerar aquellos modos de falla causados por deterioro e ignorarse otras categorías de modos de falla (como los errores humanos y de diseño). Desgraciadamente, esto no es correcto ya que, por lo general, el deterioro causa un porcentaje sorprendentemente bajo de las fallas. En estos casos, el restringir el análisis sólo a los casos de deterioro, desafortunadamente lleva al desarrollo de una estrategia de mantenimiento incompleta.

Pero si aceptamos que mantenimiento significa asegurar que los activos físicos continúen haciendo lo que sus usuarios quieren que haga, entonces un programa de mantenimiento global debe tener en cuenta *todos* los eventos que tienen posibilidad de amenazar esa funcionalidad. Los modos de falla pueden ser clasificados en tres grupos de la siguiente manera:

- Cuando la capacidad cae por debajo del funcionamiento deseado.
- Cuando el funcionamiento deseado se eleva encima de la capacidad inicial.
- Cuando desde el comienzo el activo físico no es capaz de hacer lo que se quiere.

Cada una de estas categorías es analizada en los próximos párrafos.

Capacidad decreciente

La primer categoría de modos de falla cubre las situaciones en las que en un primer momento la capacidad está por arriba del funcionamiento deseado, pero que luego decae cuando el activo físico es puesto en servicio, quedando por debajo del funcionamiento deseado, como lo ilustra la Figura 4.3.

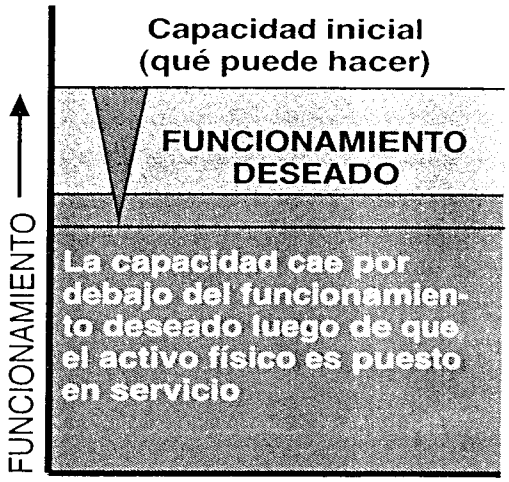


Figura 4.3:
Modos de Falla, Categoría 1

Las cinco causas principales de pérdida de capacidad son:

- Deterioro
- Fallas de lubricación
- Polvo o suciedad
- Desarme
- Errores humanos que reducen la capacidad

Deterioro

Todo activo físico que cumple una función y que está en contacto con el mundo real está expuesto a esfuerzos diversos. Estos esfuerzos causan que el activo se deteriore disminuyendo su capacidad, o para ser más precisos,

reduciendo su *capacidad a resistir tensiones*. Con el tiempo, la resistencia del activo se reduce tanto que no puede seguir cumpliendo con el funcionamiento deseado, en otras palabras, falla.

El deterioro cubre todas las formas de desgaste normal (fatiga, corrosión, abrasión, erosión, evaporación, degradación de aislantes, etc.). Sin ninguna duda, estos modos de falla podrían incluirse en una lista de modos de falla cuando se considere que es razonablemente probable que ocurran. Veremos más adelante el nivel de detalle con el cual hay que describirlos.

Fallas de Lubricación

La lubricación se asocia con dos tipos de modos de falla. La primera tiene relación con la falta de lubricante, y la segunda se relaciona con una falla del lubricante mismo.

En relación al tema de la falta de lubricante, en las últimas dos décadas las cosas han cambiado mucho. Veinte años atrás, la mayoría de los puntos de lubricación eran rellenados manualmente. El costo de lubricar cada uno de esos puntos era muy bajo comparado con el costo de no hacerlo. También era bajo respecto del costo de analizar detalladamente los requerimientos de lubricación de cada punto. Todo esto llevaba a que no se justificara realizar un análisis en profundidad para definir los programas de lubricación. En lugar de esto, dichos programas los definía un especialista en lubricantes después de haber hecho una inspección superficial de los equipos.

Hoy día, los componentes "sellados de por vida" y los sistemas de lubricación centralizados se usan en la mayoría de las industrias. Esto llevó a una drástica reducción de los puntos de las máquinas en los que una persona debía poner aceite o grasa y a un gran aumento de las consecuencias de las fallas (especialmente de las fallas en los sistemas de lubricación centralizados). Desde un punto de vista analítico, significa que ahora es costo-eficaz:

- Utilizar RCM para analizar los sistemas de lubricación centralizados
- Considerar la pérdida de lubricante en los puntos de lubricación manual remanentes como modos de falla individuales

La segunda categoría de fallas asociadas con la lubricación es aquella relacionada con el deterioro del lubricante en sí. Se produce por fenómenos como el del fraccionamiento de las moléculas del aceite, oxidación de la base oleosa y agotamiento de los aditivos. En ciertos casos, el deterioro del aceite se agrava por la aparición de barros o la presencia de agua o de otros contaminantes. El lubricante también podría fallar al cumplir con sus funciones simplemente porque se está utilizando un lubricante incorrecto. Si se considera que es probable que ocurra alguno de estos modos de falla, o tal vez todos, deben ser documentados y sujetos a un análisis detallado. (Esto también se aplica a aceites de transformadores y a aceites hidráulicos).

Polvo o Suciedad

La tierra o el polvo es una causa de falla muy común. Interfiere directamente con las máquinas haciendo que se atasquen, se obstruyan o se traben. También es la causa principal de la falla de las funciones relacionadas con la apariencia de los activos (cosas que deberían verse limpias están sucias). La suciedad también causa problemas en la calidad de los productos, ya sea porque se introduce entre los mecanismos de sujeción de las máquinas herramienta causando desalineaciones, o porque entra dentro de productos alimenticios o farmacéuticos, o en los sistemas de lubricación de las máquinas. Por lo tanto, las fallas ocasionadas por suciedad deben estar registradas en el AMFE cuando se piense que es probable que causen cualquier falla funcional.

Desarme

Si los componentes se caen o salen de las máquinas, si los conjuntos o máquinas enteras se desarman, las consecuencias generalmente son serias, por lo que debe ser registrado el modo de falla relevante. Esto incluye la falla de soldaduras, uniones soldadas o remachadas causadas por fatiga o corrosión, o la falla de componentes roscados como bulones, conexiones eléctricas o accesorios de cañerías causadas también por fatiga o corrosión o simplemente porque se desenroscan.

Cuando se considera la integridad de los ensambles, también debe prestarse atención de listar las funciones y los modos de falla asociados con mecanismos de bloqueo como chavetas-perno y tuercas de enclavamiento.

Errores humanos que reducen la capacidad

El subgrupo final de la categoría de modos de falla "reducción de capacidad" son aquellos causados por errores humanos. Como su nombre lo indica, se refiere a errores que reducen la capacidad del proceso hasta que le es imposible funcionar según los requerimientos del usuario.

Algunos ejemplos de esto pueden ser válvulas operadas manualmente y que se dejan cerradas haciendo que no pueda comenzar un proceso, partes montadas incorrectamente por el personal de mantenimiento o sensores regulados de manera tal que desconectan la máquina cuando no deben.

Si se sabe que ocurren éstos modos de falla, deben ser registrados en el AMFE, para que luego puedan tomarse las decisiones adecuadas para el manejo de la falla. De cualquier modo, cuando se listen modos de falla causados por la gente, debe tenerse cuidado y listar *qué* es lo que estuvo mal y no *quién* lo causó. Si se pone mucho énfasis en "quién" en esta parte del análisis, este podría volverse innecesariamente ofensivo y la gente podría perder de vista que con este análisis se busca evitar o resolver problemas y no atribuir culpas. Por ejemplo, es suficiente decir "válvula de control regulada muy alta" y no "válvula de control regulada incorrectamente por el técnico de instrumentación".

Aumento del Funcionamiento Deseado (o aumento del Esfuerzo Aplicado)

La segunda categoría de modos de falla ocurre cuando el funcionamiento deseado está dentro de la capacidad del activo físico cuando es puesto en servicio, pero luego aumenta hasta quedar fuera de su capacidad. Esto hace que el activo físico falle de una de estas dos maneras:

- El funcionamiento deseado aumenta hasta que el activo físico no puede responder a él, o
- El aumento del esfuerzo causa que se acelere el deterioro hasta el punto en que el activo físico se torna tan poco confiable que deja de ser útil

Un ejemplo del primer caso sería si los usuarios de la bomba de la Figura 2.1 incrementaran la cantidad de agua que sacan del tanque a 1050 litros por minuto. Bajo esas circunstancias, la bomba es incapaz de mantener el tanque lleno. (Nótese que en este caso, los usuarios no están forzando a la bomba para que trabaje más rápido, simplemente abrieron un poco más una válvula en algún punto de la cañería).

El segundo caso ocurre cuando el dueño de un auto que insiste en acelararlo a 7000 r.p.m. a pesar que el tacómetro indica que el motor está sobre exigido a 6000 r.p.m.. Esto causa que el motor se deteriore más rápido que si su usuario lo acelerara dentro de los límites prescritos, con lo que fallará más seguido.

Este fenómeno es ilustrado en la Figura 4.4. Ocurre debido a cuatro razones, tres de las cuales implican algún tipo de error humano:

- Una sobrecarga deliberada constante
- Una sobrecarga no intencional constante
- Una sobrecarga no intencional repentina
- Procesamiento o material de empaque incorrecto

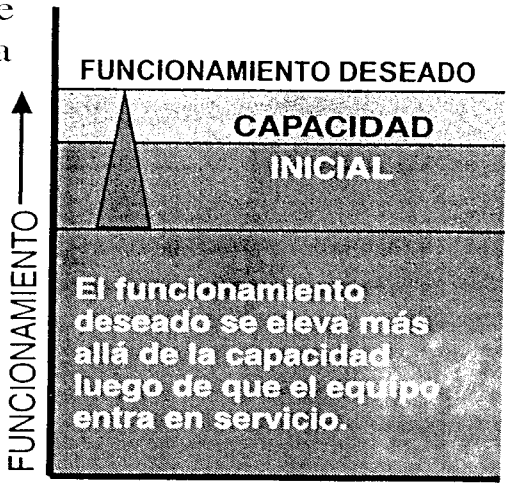


Figura 4.4: Modos de Falla, Categoría 2

Sobrecarga deliberada constante

En muchas industrias, los usuarios frecuentemente caen en la tentación de acelerar el equipo en respuesta a un incremento en la demanda de los productos existentes. En otros casos, los activos físicos adquiridos para un producto son utilizados para procesar un producto con características diferentes (unidades más largas, más pesadas o con estándares de calidad más altos). La gente hace esto porque creen que así podrán obtener más de sus instalaciones sin incrementar la inversión de capital. Esto podría llegar a ser cierto en el corto plazo. No obstante, esta solución traerá problemas en el largo plazo en términos de reducción de confiabilidad y/o disponibilidad, especialmente cuando el aumento del esfuerzo comienza a acercarse o exceder las posibilidades del activo físico para tolerarlo.

(Cuando finalmente sucede esto, surgen feroces disputas entre la gente de mantenimiento y operaciones. La gente de operaciones dice "debe estar haciéndose mal el mantenimiento", mientras que la gente de mantenimiento acusa a la gente de operaciones diciendo "están dándole a las máquinas una paliza de muerte". Esto pasa porque mientras que la gente de operaciones piensa en "qué es lo que ellos necesitan de cada máquina", la gente de mantenimiento está pensando en "qué es lo que la máquina es capaz de hacer". Ninguno de los dos está equivocado, lo único que pasa es que cada uno está enfocando el problema desde un punto de vista diferente.)

En estos casos, implementar "mejores" procedimientos de mantenimiento, no ayudará a resolver el problema. De hecho, mantener una máquina que no es capaz de tener el funcionamiento deseado sería como reacomodar las sillas de la cubierta del *Titanic*. En estos casos, tenemos que buscar soluciones más allá del mantenimiento. Las opciones serán modificar el activo para mejorar su capacidad inherente, o bien bajar nuestras expectativas y operar la máquina dentro de sus parámetros de funcionamiento.

Sobrecarga no intencional constante

Muchas industrias responden a aumentos de la demanda por medio de programas de eliminación de 'cuellos de botella'. Estos programas apuntan a aumentar la capacidad de los medios de producción, tales como una línea de producción, para acomodarse a un nuevo nivel de funcionamiento deseado. Sin embargo, suelen causar desazón en la gente que los apoya, ya que generalmente traen más problemas que soluciones. Esto pasa porque, por lo general, algunos pequeños subsistemas o componentes quedan afuera de este programa de mejora, teniendo a veces resultados catastróficos. En la Figura 4.5 se muestra cómo ocurre esto.

La demanda de los productos que fabrica la planta representada en el ejemplo se ha incrementado al punto en que sus usuarios desean incrementar la producción de 400 a 500 toneladas por semana. Las líneas punteadas representan la capacidad de cada operación, con lo que muestran que la mayoría de las operaciones cumplen con los nuevos requerimientos de producción. Pero las operaciones 3, 8 y 10 no son capaces de producir 500 toneladas con lo que las definiremos como "cuello de botella". Para alcanzar la nueva meta de producción, los usuarios eliminan los cuellos de botella instalando nuevos componentes o nuevas máquinas que hacen que dichas operaciones sean capaces de producir más de 500 toneladas por semana. También se tiene en cuenta el mayor consumo de energía con lo que se refuerza el sistema eléctrico.

Pero, en este ejemplo, se pasó por alto la necesidad de ampliar la capacidad de los sistemas de aire comprimido, con lo que la planta comienza a sufrir problemas intermitentes cuando sube al máximo la demanda de aire para los instrumentos.

(Nótese también que para aquellos procesos que eran capaces de satisfacer la demanda de 500 toneladas por semana sin cambios, su margen de deterioro es mucho menor, con lo que comienzan a fallar más seguido.)

Naturalmente, si la planta sufre este tipo de modo de falla, se debe incluir en el AMFE para poder tratarlo de manera adecuada.

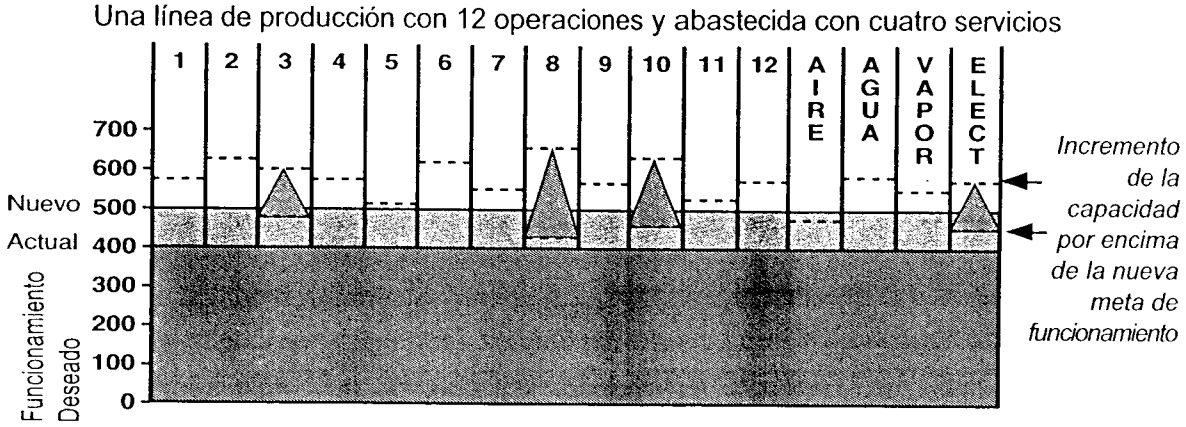


Figura 4.5: El impacto desestabilizante de la eliminación de los cuellos de botella

(algunas organizaciones industriales comprobaron que a pesar del mejor esfuerzo de sus ingenieros, la eliminación de los cuellos de botella por lo general causa tanta inestabilidad que es prácticamente inaplicable excepto en circunstancias altamente controladas y fuertemente restringidas. En estos casos, el crecimiento se maneja teniéndolo en cuenta en el diseño original de la planta y/o construyendo una nueva planta).

Sobrecarga no intencional repentina

Muchas fallas son causadas por un incremento repentino y generalmente no intencional del esfuerzo aplicado, que a su vez es causado por:

- Operación incorrecta (por ejemplo, una máquina se pone en reversa mientras que está andando hacia adelante)
- Ensamblaje incorrecto (por ejemplo, se aprieta demasiado un bulón)
- Daños externos (por ejemplo, un autoelevador golpea una bomba o cae un rayo sobre una instalación eléctrica protegida de manera incorrecta).

En realidad, éstos no son incrementos en el funcionamiento deseado ya que nadie quiere que el operador ponga la máquina en reversa cuando no debe o que un autoelevador golpee una bomba. No obstante, se los incluye en esta categoría ya que aplica una carga que el activo no puede soportar.

Si se piensa que cualquiera de éstos modos de falla tiene posibilidades de ocurrir en el contexto en cuestión, deberán ser incorporados al AMFE.

Materias primas y materiales de empaque incorrecto

Los procesos de manufactura frecuentemente sufren fallas funcionales causadas por materias primas que están fuera de especificación (en relación con las variables de consistencia, dureza o pH). De manera similar, las plantas envasadoras sufren frecuentemente a causa de materiales de empaque inadecuados o incompatibles.

En los dos casos las máquinas fallan o no funcionan bien porque no pueden tratar los materiales fuera de especificación. Esto puede verse como un incremento de las tensiones aplicadas.

En la práctica, estos "modos de falla" generalmente no surgen como resultado de una falla del activo que se analiza, pero casi siempre es el efecto de una falla en alguna otra parte del sistema. Esto quiere decir que la acción para remediar el problema debe llevarse a cabo en otro activo. A pesar de esto, reconociendo esta falla en el análisis del equipo afectado aseguramos que se pondrá atención cuando se realice el análisis del sistema que realmente está causando el problema. Como conclusión de todo esto, diremos que los modos de falla de este tipo deben ser incorporados al AMFE en los casos en los que se sepa que pueden afectar el activo físico que se está revisando, e incluir un comentario en la columna de los efectos de falla que dirija la atención hacia la verdadera fuente del problema.

Capacidad inicial

En el Capítulo 2 se explicó que para que un activo sea mantenible, el funcionamiento deseado debe estar dentro del rango de su capacidad inicial. También se mencionó que, de hecho, la mayoría de los activos están diseñados bajo este concepto. No obstante, surgen situaciones en las que el funcionamiento deseado está fuera del rango de capacidad inicial desde el comienzo, como lo muestra la Figura 4.6.



Figura 4.6:
Modos de Falla Categoría 3

Este problema de incapacidad rara vez afecta al activo físico en su totalidad. Usualmente afecta sólo una o dos funciones o uno o dos componentes, pero éstos puntos débiles perjudican la operación de toda la cadena. El primer paso hacia la rectificación de un problema de diseño de esta naturaleza es listarlos como modos de falla en un AMFE.

4.4. ¿Cuánto Detalle?

Ya mencionamos anteriormente que los modos de falla deben ser descriptos con el detalle suficiente como para que sea posible seleccionar una estrategia adecuada de manejo de falla, pero no con tanto detalle como para que se pierda demasiado tiempo en el proceso de análisis.

Los modos de falla deben ser definidos con el detalle suficiente como para posibilitar la selección de una adecuada política de manejo de falla

En la práctica, puede ser sorprendentemente difícil encontrar un nivel de detalle adecuado. No obstante, es muy importante encontrarlo, ya que el nivel de detalle afecta profundamente la validez del AMFE y la cantidad de tiempo que requiere hacerlo. Si se hace con poco detalle y/o pocos modos de falla puede llevar a un análisis superficial y hasta peligroso. Por el contrario, demasiados modos de falla o demasiado detalle hacen que el proceso RCM lleve mucho mas tiempo que el necesario. En un caso extremo, el detalle excesivo puede hacer que el proceso tome dos y hasta tres veces más tiempo que el necesario (esto se conoce como "*parálisis por análisis*").

Esto significa que es esencial tratar de lograr un equilibrio correcto. Algunos de los factores centrales que necesitan ser tenidos en cuenta son tratados en los párrafos siguientes.

Causalidad

Las causas de cualquier falla funcional pueden ser definidas casi a cualquier nivel de detalle, y pueden aplicarse diferentes niveles a distintas situaciones. En un extremo, a veces es suficiente resumir las causas de una falla funcional en una expresión como "falla la máquina". En el otro extremo quizás necesitemos considerar qué está sucediendo a nivel molecular, o explorar los rincones remotos de la psiquis de los operadores y del personal de mantenimiento para definir la causa raíz de la falla.

La medida en que los modos de falla pueden ser descriptos a diferentes niveles de detalle se muestra en la Figura 4.7 en las 3 páginas siguientes.

La Figura 4.7 se basa en la bomba que muestra la Figura 4.2, cuyos modos de falla aparecen en la Figura 4.1. La Figura 4.7 describe diversas formas en las que la bomba podría sufrir la falla funcional "incapaz de transferir agua". Estos modos de falla son considerados a siete niveles de detalle diferentes.

El nivel superior (Nivel 1) es la falla general de la bomba. El Nivel 2 reconoce la falla de los cinco componentes principales de la bomba – la bomba, el eje, el motor,

NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3	NIVEL 4	NIVEL 5	NIVEL 6	NIVEL 7
Falla el grupo de bombas	Falla la bomba	Falla el impulsor	Impulsor toma juego	Tuerca de montaje sin ajustar	Tuerca ajustada incorrectamente	Error de montaje
				Tuerca de montaje gastada	Tuerca corroída	
					Tuerca hecha de material incorrecto	Material especificado incorrectamente
						Material suministrado incorrectamente
				Tuerca del impulsor rajada	Tuerca del impulsor sobreajustada	Error de montaje
					Tuerca hecha de material incorrecto	Material especificado incorrectamente
						Material suministrado incorrectamente
				Chaveta cortada	Acero de la chaveta especificado incorrectamente	Error de diseño
					Acero de la chaveta suministrado incorrectamente	Error de pedido
						Error de almacén
						Error de requerimiento
			Objeto daña el impulsor	Objeto en el sistema luego del mantenimiento	Error de montaje	*Ver Apéndice 2*
				Un cuerpo extraño entra al sistema	Filtro del succionador no instalado	Error de montaje
					Filtro perforado por corrosión	
		Ruptura de carcasa	Se aflojan los bulones de la carcasa	Bulones de carcasa sin ajuste apropiado	Error de montaje	*Ver Apéndice 2*
				Bulones aflojados por vibración		
				Bulones de carcasa corroídos		
				Fallen los bulones por fatiga		
			Falla la junta de la carcasa	Junta colocada incorrectamiente	Error de montaje	*Ver Apéndice 2*
				Fallan las juntas por resquebrajamiento		
			Carcasa dañada	Carcasa dañada por un vehículo	Error de montaje	*Ver Apéndice 2*
					Bomba en posición vulnerable	Error de diseño
				Aplastada por objeto que cae del cielo	Carcasa golpeada por un meteorito	
		Fallan los sellos	Desgaste y deterioro normal	Sello desgastado por rozamiento		
			Se seca la bomba	Ver "falla en el abastecimiento de agua" más abajo		
			Sello desalineado	Error de montaje	*Ver Apéndice 2*	
			Suciedad en las caras del sello	Error de montaje	*Ver Apéndice 2*	
			Montaje de sello incorrecto	Sello suministrado incorrecto	Error de procuracion	*Ver Apéndice 2*
					Error de almacén	*Ver Apéndice 2*
				Sello especificado incorrectamente	Error de diseño	*Ver Apéndice 2*
			Se instala un sello dañado	El sello de la bomba se cayó en el taller	Error de almacén	*Ver Apéndice 2*
				Sello de la bomba dañado en tránsito	Error de pedido	*Ver Apéndice 2*

Figura 4.7: Modos de falla con diferentes niveles de detalle

NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3	NIVEL 4	NIVEL 5	NIVEL 6	NIVEL 7
Falla el grupo de bombas	Falla el motor	Cojinetes agarrotados	Desgaste normal	Fatiga bajo superficie en la pista exterior		
				Bolillas desgastados		
			Esfuerzo axial demasiado grande	Motor subdimensionado		
			Falla de lubricación	Fallan los sellos de cojinete	Sellos dañados en la instalación	Error de montaje
					Sellos mal instalados en el cojinete	Error de fabricación
				Falla la grasa	Aceite de base oxidado	
					Grasa licuada	
					Aditivos agotados	
				Lubricante que no corresponde	Error de fabricación	
			Cojinete mal instalado	Dañado antes de la instalación	El cojinete se cayó en el taller	Error de almacén
					Cojinete dañado en tránsito	Error de pedido
				Dañado durante la instalación	Cojinete golpeado con un martillo	Error de montaje
				Cojinete desalineado	Error de montaje	*Ver Apéndice 2*
				Instalación de un cojinete defectuoso	Cojinete suministrado defectuoso	Error de fabricación
					Cojinete corroído en el almacén	Error de almacén
				Instalación de un cojinete incorrecto	Cojinete incorrectamente especificado	Error de diseño
					Cojinete incorrectamente suministrado	Error de pedido
		Motor gira en sentido incorrecto	Motor bobinado incorrectamente	Error de montaje	*Ver Apéndice 2*	
		Bobinado del estator se quema	Falla el aislamiento del motor	Aislación deteriorada	Deterioro normal	
				El motor es operado a carga elevada	Error operacional	*Ver Apéndice 2*
				Aislamiento húmedo	Junta de carcasa de motor	Deterioro normal
						Junta colocada incorrectamente
					Carcasa del motor dañada	El motor se cayó en el taller
						Motor golpeado por un objeto extraño
					Motor almacenado en un área húmeda	Error de almacén
					Junta de carcasa no provista	Error de montaje
					Agua sobre el motor	Error operacional
					Bulones de carcasa del motor sueltos	Error de montaje
			Recalentamiento del motor	Rejilla de ventilador bloqueada por suciedad		
			Falla el ventilador del motor	Ventilador instalado al revés	Error de montaje	*Ver Apéndice 2*
				Ventilador no instalado	Error de montaje	*Ver Apéndice 2*
		No está encendido	Error de operación	*Ver Apéndice 2*		

Figura 4.7: Modos de falla con diferentes niveles de detalle

NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3	NIVEL 4	NIVEL 5	NIVEL 6	NIVEL 7
Falla el grupo de bombas	Falla el eje de comando	Eje cortado	Corte por fatiga	Concentración de tensiones en escalonamiento del eje	Radio especificado muy ajustado	Error de diseño
					Radio incorrecto cortado	Error de manufactura
				Acero defectuoso suministrado	Error de manufactura del acero	
		Chaveta del eje cortada	Acero de la chaveta incorrectamente especificado	Error de diseño	*Ver Apéndice 2*	
			Acero de la chaveta incorrectamente suministrado	Error de procuracion	*Ver Apéndice 2*	
			Chaveta demasiado corta	Error de ensamblaje	*Ver Apéndice 2*	
	Válvula cerrada	Válvula trabada en posición cerrada	Falta el manillar de la válvula	Manillar canibalizado	Error de ensamblaje	*Ver Apéndice 2*
			Vástago de válvula trabado	Vástago trabado por corrosión	Falta de grasa en el vástago de la válvula	
					Grasa utilizada incorrecta	Error de ensamblaje
		La válvula se dejó cerrada	Error operacional	*Ver Apéndice 3*		
	Falla de electricidad	Falla el conmutador	Contactor falla en la posición abierta	Contactos gastados		
				Bobinado del contactor quemado		
				Resortes del contactor falla por fatiga		
				Contactos con suciedad	Suciedad en los contactos de la instalación	Error de ensamblaje
					Tapa de la caja de contactos permite la entrada de suciedad	Tapa mal instalada
						Tapa cerrada incorrectamente
		Detención espuria	Control de sobrecarga calibrado demasiado bajo	Error de ensamblaje	*Ver Apéndice 2*	
				Se desplazó el calibrado de sobrecarga		
			Falla espuria del fusible	Instalación de un fusible incorrecto	Error de procuración	*Ver Apéndice 2*
				Instalación de un fusible defectuoso	Fusible defectuoso suministrado	Error de manufactura
					Fusible dañado durante la instalación	Error de ensamblaje
		Apagado accidentalmente	Error operacional	*Ver Apéndice 2*		
	Falla el cable eléctrico	Falla el aislamiento del cable	Deterioro del aislamiento			
			Defecto de manufactura del aislamiento			
		Cable dañado	Cable dañado por impacto	Error operacional	*Ver Apéndice 2*	
			Cable desgastado por abrasión	Cable demasiado largo	Error de ensamblaje	
				Cable pobremente fijado	Error de diseño	
		Falla la conexión	Conexión floja	Se afloja con el uso		
				Fue instalado demasiado flojo	Error de ensamblaje	
			Conexión corroída	Falla la caja de terminales	Caja dañada por impacto	
					Tapa de la caja floja	
					Sello de la tapa de la caja no colocada	
		Falla del suministro de energía				

Figura 4.7: Modos de falla con diferentes niveles de detalle

el conmutador y la entrada/salida de agua. De allí en adelante las fallas son progresivamente consideradas en mayor detalle. Al considerar este ejemplo, notemos que

- Los niveles definidos y los modos de falla asignados a cada nivel son sólo un ejemplo. No tienen que ver con una clasificación universal.
- La Figura 4.7 no muestra todas las posibilidades de falla a cada nivel, por lo que no debe utilizarse este ejemplo como un modelo definitivo.
- Es posible analizar algunos modos de falla a niveles más bajos que el 7, pero esto rara vez sería necesario en la práctica.
- Los modos de falla que se incluyen solo se aplican a la falla funcional "incapaz de transferir nada de agua". La Figura 4.7 no muestra los modos de falla que podrían causar otras fallas funcionales, tales como la pérdida de contención o la pérdida de protección.

El primer punto que surge de este ejemplo es la conexión entre el nivel de detalle y el número de modos de falla que se incluyen. El ejemplo muestra que cuanto más ahondamos en el AMFE, mayor es la cantidad de modos de falla que pueden incluirse en la lista.

Por ejemplo, hay cinco modos de falla en el nivel 2 de la bomba en la Figura 4.7, pero hay 64 en el nivel 6.

Otros dos temas fundamentales que surgen de la Figura 4.7 tienen que ver con "causas raíz" y el error humano, los que veremos a continuación.

Causas Raíz

El término "Causa raíz" es comúnmente utilizado en conexión con el análisis de la falla. Implica que si uno ahonda lo suficiente es posible llegar a un nivel causal final y absoluto. De hecho, por lo general esto no ocurre.

Por ejemplo, en la Figura 4.7 el modo de falla "tuerca del impulsor sobreajustada" esta registrado en el nivel 6, que a su vez es causado por un "error de montaje" en el nivel 7. Si fuésemos un nivel más abajo, el error de montaje podría haber ocurrido porque "quien lo montó estaba distraído" (nivel 8). Podría haber estado distraído porque "su hijo estaba enfermo" (nivel 9). Esta falla puede haber ocurrido porque el niño "comió algo que estaba en mal estado en un restaurante" (nivel 10).

Es claro que este proceso de seguir descendiendo podría continuar ilimitadamente, mucho más allá del punto en que la organización que realiza el AMFE tiene control sobre los modos de falla. Por esto, este capítulo enfatiza que el nivel al que debería ser identificado un modo de falla es aquel en el cual es posible identificar una política apropiada para el manejo de la falla. (esto es válido tanto si se está llevando un AMFE antes de que ocurra la falla como si se hace un "análisis de causa raíz" después de que ocurrió la falla.)

El hecho de que el nivel apropiado varía para los distintos modos de falla muestra que en la hoja de información no debemos listar todos los modos de falla al mismo nivel. Algunos podrían ser identificados en el nivel 2, otros en el nivel 7 y el resto en algún nivel intermedio.

Por ejemplo, en un contexto determinado, podría ser apropiado listar sólo los modos de falla de la Figura 4.7 que se sombrearon. En otro contexto, podría ser más apropiado para una bomba idéntica definir un solo modo de falla para todo el AMFE como ser "falla el grupo de bombas". Otro contexto diferente podría pedir cualquier otra selección.

Evidentemente, para poder detenerse en un nivel apropiado, la gente que participa de este tipo de análisis necesita conocer la totalidad de las opciones de políticas de manejos de fallas. Esto se discutirá nuevamente en los Capítulos 6 a 9.

En el resto de esta parte del capítulo y en el Capítulo 7 consideraremos algunos otros factores que influyen sobre el nivel de análisis.

Error Humano

En la Parte 3 de este capítulo se mencionaron distintas formas en las que el error humano podía causar la falla de una máquina. También se dijo que si los modos de falla asociados se consideraban probables de ocurrir, deberían ser incorporados al AMFE. Esto es exactamente lo que se hizo la Figura 4.7. En dicha figura, todos los modos de falla que comienzan con la palabra "error" son alguna clase de error humano. En el Apéndice 2 se da un breve resumen de los puntos principales que incluye esta clasificación y cómo pueden manejarse este tipo de errores.

Probabilidad

Diferentes modos de falla ocurren con diferente frecuencia. Algunos pueden ocurrir con regularidad, a intervalos promedio de meses, semanas o hasta en días. Otros pueden ser extremadamente improbables, con una media entre fallas de millones de años. Al preparar un AMFE, se debe decidir constantemente sobre qué modos de falla son tan poco probables que ocurran que pueden ser ignorados sin peligro. Esto significa que no se trata de registrar absolutamente todas las posibilidades de falla sin importar la probabilidad que tienen de ocurrir.

Cuando se listan modos de falla, no debe tratarse de listar todos y cada uno de ellos ignorando la probabilidad de ocurrir que tiene cada uno.

En otras palabras, sólo deben ser listados los modos de falla que tienen posibilidades razonables de ocurrir en ese contexto determinado. Una lista de modos de falla "razonablemente probables" debería incluir lo siguiente:

- *Fallas que han ocurrido antes* en el mismo activo físico o en activos similares. Estas son las candidatas más obvias a incluirse en el AMFE, excepto que para que la falla no volviera a ocurrir, se haya modificado el activo. Como se discutirá más adelante, las fuentes de información sobre dichas fallas incluyen a la gente que conoce bien el activo (sus propios empleados, fabricantes u otros usuarios del mismo equipo), los registros de historia técnica y bancos de datos. En este contexto, ténganse en cuenta los comentarios de la Parte 6 del presente capítulo sobre la deficiencia de la mayoría de los registros de historia técnica y las notas del Capítulo 12 sobre el peligro de confiar demasiado en la información histórica.
- *Modos de falla que ya son objeto de rutinas de mantenimiento proactivas*, y que ocurrirían si no se hiciera mantenimiento proactivo. Una manera de asegurarse que ninguno de estos modos de falla se pasará por alto es estudiar los planes de mantenimiento actuales y preguntarse "¿qué modo de falla podría ocurrir si no hiciéramos esta tarea?".

Sin embargo, una revisión de los programas existentes debe ser llevada a cabo sólo como un control final luego de haber terminado el análisis de RCM, para reducir la posibilidad de perpetuar el status quo. (A algunos usuarios de RCM les seduce la idea de asumir que todos los modos de falla razonablemente probables de ocurrir están incluidos en el sistema de MP y por lo tanto, esos son los únicos modos de falla que necesitan considerarse en el AMFE. Asumir esto lleva a estos usuarios a desarrollar un AMFE trabajando hacia atrás, retrocediendo desde sus tareas de mantenimiento actuales, para luego volver hacia delante para completar los últimos tres pasos del proceso RCM. Este enfoque se adopta, por lo general, creyendo que acelerará o "abreviará" el proceso. De hecho, este enfoque no es recomendable ya que da como resultado un análisis RCM incompleto y por tanto peligroso, entre otros defectos).

- *Cualquier otro modo de falla que no haya ocurrido todavía, pero que tiene posibilidades reales de suceder*. Identificar y decidir como lidiar con fallas que aún no han ocurrido es una característica esencial de la gestión proactiva en general y del manejo de riesgo en particular. A su vez, es uno de los aspectos más desafiantes del proceso RCM ya que requiere de mucho sentido común y criterio. Por un lado, necesitamos registrar todos los modos de falla razonablemente probables, mientras que por otro no queremos perder tiempo con fallas que no han ocurrido antes y que son altamente improbables (increíbles) en el contexto en cuestión.

Por ejemplo, en el motor que impulsa la bomba de la Figura 4.7 se instalan rodamientos "sellados de por vida". Esto significa que la posibilidad de mortalidad infantil por lubricación es realmente baja, tan baja que no debería incluirse en la

mayoría de los AMFE. Por otro lado, las fallas por defectos en la lubricación probablemente deberían ser incluidas en los AMFE de componentes con lubricación manual, sistemas de lubricación centralizados y cajas reductoras.

De cualquier modo, la decisión de no listar un modo de falla debe ser evaluada con cuidado, teniendo en cuenta las consecuencias de la falla.

Consecuencias

Si las consecuencias pueden ser realmente severas, entonces fallas que aún son menos probables *deben* registrarse y ser sometidas a análisis.

Por ejemplo, si el conjunto de bombas de la Figura 4.7 estuviera instalado en una fábrica alimenticia o en una planta automotriz, el modo de falla "carcaza golpeada por un objeto caído del cielo" es descartado de inmediato por ser ridículamente improbable. En cambio, si la bomba estuviera bombeando algo realmente tóxico en una planta nuclear, es probable que se lo tome más en serio a pesar de que siga siendo muy improbable.

Otro ejemplo que se extrae de la Figura 4.7 es "motor no encendido". Este modo de falla es probable que sea descartado sobre la base de que en la mayoría de las situaciones es muy improbable. Aun si ocurriera, las consecuencias podrían ser tan triviales que se excluye del AMFE. (por otra parte, si pudiera ocurrir y fuera importante, especialmente en los casos donde los elementos deben arrancar con una secuencia en particular y si no, algo podría ser dañado, este modo de falla debe considerarse.)

Causas vs Efecto

Cuando se listan modos de fallas debe tenerse cuidado de no confundir causas con efectos. Este es un error sutil en el que suele caer la gente que es nueva en el proceso de RCM.

Por ejemplo, una planta tenía unas 200 cajas reductoras, todas con el mismo diseño y realizando prácticamente la misma función en el mismo tipo de equipo. En un principio se listaron los siguientes modos de falla para una de las cajas reductoras:

- Se agarrotan los cojinetes de la caja reductora
- Se desgastan los dientes de los engranajes

En un primer momento se listaron estos modos de falla porque la gente que estaba llevando a cabo el análisis recordó que cada uno de ellos había ocurrido en el pasado (algunas de las cajas reductoras tenían 20 años de antigüedad). Estas fallas no afectaban a la seguridad, pero afectaban a la producción. Por esto se dedujo que debería ser útil realizar tareas preventivas como "chequear el desgaste de los dientes de los engranajes" o "Controlar el golpeteo de las cajas de engranajes", y "medir las vibraciones de los cojinetes de las cajas de engranajes". No obstante, discusiones posteriores revelaron que ambas fallas habían ocurrido porque el nivel de aceite no había sido controlado en su debido momento, con lo que las cajas de engranajes en realidad fallaron debido a la falta de aceite. Lo que es más, nadie pudo recordar que alguna caja reductora hubiese fallado estando lubricada adecuadamente. Por esto, el modo de falla eventualmente fue listado como:

- La caja reductora falla por falta de aceite.

Esto remarca la importancia de alguna tarea proactiva obvia, que era chequear periódicamente el nivel de aceite. (esto no quiere decir que todas la cajas reductoras deban analizarse de esta manera. Algunas son mucho más complejas o están mucho más cargadas, con lo que están sujetas a una variedad mucho más amplia de modos de falla. En otros casos, las consecuencias de las fallas podrían ser mucho más severas, con lo que podría llevar a un enfoque más defensivo de las posibilidades de la falla).

Modos de falla y el contexto operacional

Hemos visto como las funciones y las fallas funcionales de cualquier ítem están influenciadas por su contexto operacional. Esto también es verdad para los modos de falla en términos de causas, probabilidad y consecuencias.

Por ejemplo, considerando las tres bombas mostradas en la Figura 2.7. los modos de falla que pueden afectar a la bomba de reserva (como ser brinelling de los rodamientos, estancamiento de agua en la carcaza de la bomba y hasta el "tomar prestado" ciertos componentes de la misma para usar en otra bomba en caso de emergencia) son diferentes de los que podrían afectar a la bomba de servicio como lo muestra la figura 4.7.

De manera similar, un vehículo que opera en el Ártico debería estar sujeto a diferentes modos de falla que exactamente el mismo vehículo operando en el desierto del Sahara. De igual manera, un avión jet impulsado por una turbina de gas debería tener modos de falla diferentes que la misma turbina de gas usada como motor principal de una plataforma de petróleo.

Estas diferencias significan que se debe estar muy seguro que el contexto operacional es el mismo, antes de aplicar un AMFE desarrollado para un activo que trabaja bajo un conjunto de circunstancias particulares, en otro activo idéntico. (ver también los comentarios al respecto del uso de un AMFE genérico en la parte 6 de este Capítulo.)

El contexto operacional afecta los niveles de análisis de la misma manera que las causas y consecuencias de las fallas. Como se discutió anteriormente, podría ser apropiado identificar modos de falla a distinto nivel para dos activos idénticos en distintos contextos operacionales.

4.5. Efectos de Falla

El cuarto paso en el proceso de revisión RCM consiste en hacer una lista de lo que de hecho sucede al producirse cada modo de falla. Esto se denomina *efectos de falla*.

Los efectos de la falla describen qué pasa cuando ocurre un modo de falla

(Notemos que *efecto de falla no* es lo mismo que *consecuencia de falla*. Un efecto de falla responde a la pregunta ¿Qué ocurre?, mientras que una consecuencia de falla responde la pregunta ¿Qué importancia tiene?).

La descripción de estos efectos debe incluir toda la información necesaria para ayudar en la evaluación de las consecuencias de las fallas. Concretamente, al describir los efectos de una falla, debe hacerse constar lo siguiente:

- La evidencia (si la hubiera) de que se ha producido una falla
- Las maneras (si las hubiera) en que la falla supone una amenaza para la seguridad o el medio ambiente
- Las maneras (si las hubiera) en que afecta a la producción o a las operaciones
- Los daños físicos (si los hubiera) causados por la falla
- Qué debe hacerse para reparar la falla

Estos temas son tratados en los siguientes párrafos. Se debe tener en cuenta que uno de los objetivos principales de este ejercicio es establecer si es necesario el mantenimiento proactivo. Si hemos de hacer esto correctamente, no podemos empezar suponiendo que se está realizando ya algún tipo de mantenimiento proactivo; por ello los efectos de las fallas deben describirse como si no se estuviera haciendo nada para impedirlos.

Evidencia de Falla

Los efectos de las fallas deben describirse de tal forma que permita a los analistas RCM decidir si, en circunstancias normales, será evidente para los operarios la pérdida de función causada por ese modo de falla actuando por sí solo.

Por ejemplo, la descripción debe indicar si la falla hace que se enciendan alarmas luminosas o de sonido (o ambas), y si el aviso se produce en el panel local o en la sala de control (o ambos).

Asimismo la descripción debe indicar si la falla va acompañada o precedida por efectos físicos obvios, tales como ruidos fuertes, incendio, humo, fugas de vapor, olores extraños o manchas de líquido en el suelo. También debe indicar si la máquina se para como consecuencia de la falla.

Por ejemplo, si estamos considerando el agarrotamiento de los cojinetes de la bomba mostrada en la Figura 3.5, los efectos de la falla podrían describirse de la siguiente manera (en bastardillas se describe qué es lo que debe ser evidente a los operarios cuando ocurre la falla):

- El motor se desconecta y suena una alarma en la sala de control. 20 minutos después suena la alarma de bajo nivel del tanque I, y este se vacía después de 30 minutos. Tiempo muerto requerido para reemplazar los cojinetes: 4 horas.

En el caso de una turbina de gas estacionaria, un modo de falla que ocurrió en la práctica fue la acumulación gradual de depósitos de combustión en los álabes del compresor. Estos depósitos pueden ser removidos parcialmente por una inyección periódica de sustancias especiales en el flujo de aire, un proceso conocido como "Jet Blasting". Los efectos de las fallas fueron descriptos de acuerdo a lo siguiente:

- La eficiencia del compresor declina y el regulador compensa la potencia de salida causando un aumento en la temperatura de escape. La temperatura de escape se muestra en el panel de control local y en la sala de control central. Si no se toma ninguna acción, la temperatura del gas de salida aumenta hasta los 475°C a toda potencia. En la sala de control central suena una alarma de alta temperatura de gases de escape y se enciende una luz de alarma en el panel de control local. Cerca de los 500°C, el sistema de control detiene la turbina. (funcionando a temperaturas superiores a 475°C disminuye la vida útil de los álabes de la turbina.) Los álabes pueden ser parcialmente limpiados por el Jet Blasting, y esto toma unos 30 minutos.

Este es un modo de falla mucho más complejo que la mayoría de los modos de falla. Por eso la descripción de los efectos de la falla es más extensa de lo usual. La descripción promedio de un efecto de falla generalmente es de 20 a 60 palabras.

Cuando se describen los efectos de falla, no debe prejuzgarse la evaluación de las consecuencias de las fallas usando palabras como "oculto" o "evidente". Esto es parte del proceso de evaluación de las consecuencias, y si se usa de manera prematura podría influir incorrectamente sobre esa evaluación.

Finalmente, al tratarse de dispositivos protectores, la descripción debe indicar brevemente qué pasaría si falla el dispositivo protegido al mismo tiempo que el dispositivo de seguridad (protector).

Riesgos para la Seguridad y el Medio Ambiente

El diseño de las plantas industriales modernas ha evolucionado de tal forma que sólo una pequeña proporción de los modos de falla presentan una amenaza directa para la seguridad o el medio ambiente. No obstante, si existe una posibilidad de que alguien se lesione o muera como consecuencia directa de una falla, o que se infrinja una normativa o reglamento del medio ambiente, la redacción del efecto de la falla debe explicar cómo esto podría ocurrir. Algunos ejemplos incluyen:

- Incremento del riesgo de incendio o explosiones
- El escape de productos químicos peligrosos (gases, líquidos o sólidos)
- Electrocución
- Caída de objetos
- Explosiones o estallidos (especialmente recipientes presurizados y sistemas hidráulicos)
- Exposición a materiales muy calientes o fundidos

- Desintegración de grandes componentes rotativos
- Descarrilamientos o accidentes vehiculares
- Exposición a objetos cortantes o máquinas en movimiento
- Incremento de los niveles de ruido
- Colapso de estructuras
- Crecimiento bacteriano
- Ingreso de suciedad en productos alimenticios o farmacéuticos
- Inundaciones

Al hacer la lista de estos efectos, no se debe prejuzgar la evaluación de las consecuencias de la falla haciendo declaraciones como "esta falla puede perjudicar la seguridad", ni "esta falla afecta al medio ambiente". Simplemente indicar lo que sucede, y dejar la evaluación de las consecuencias hasta la etapa siguiente del proceso RCM.

Obsérvese también que no nos estamos refiriendo solamente a posibles amenazas a nuestro propio personal (operadores y personas de mantenimiento), sino que también nos referimos a las amenazas sobre la seguridad de nuestros consumidores y de la comunidad en su conjunto. Esto puede requerir que el grupo que hace el análisis realice una investigación sobre las normas de seguridad y medio ambiente que gobiernan el proceso que se está estudiando.

Daños Secundarios y Efectos en la Producción

La descripción de los efectos de falla debe aportar la máxima claridad posible para determinar cuáles son las consecuencias operacionales y no operacionales de la misma. Para hacer esto, debe indicar cómo y durante cuánto tiempo queda afectada la producción (si es que resulta afectada). Generalmente esto tiene que ver con el tiempo de parada de máquina ocasionada por cada falla.

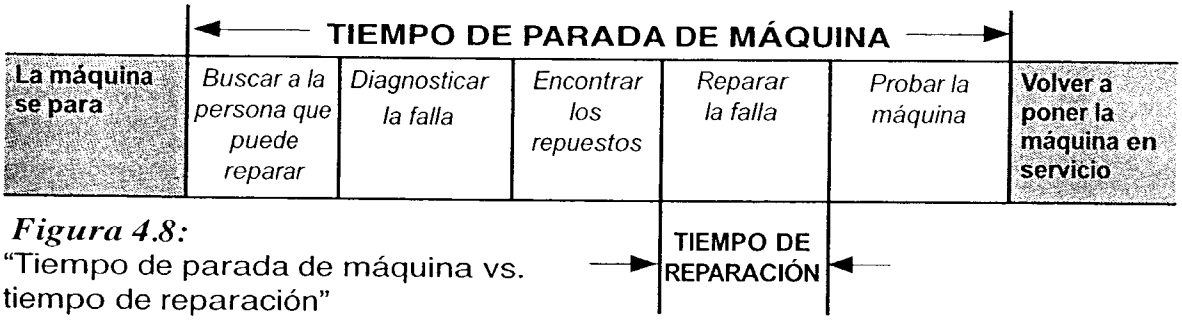


Figura 4.8:
"Tiempo de parada de máquina vs. tiempo de reparación"

En este contexto, el tiempo de parada de máquina es el tiempo total durante el cual la máquina probablemente permanece fuera de servicio en condiciones normales, desde el momento en que se produce la falla hasta el momento en que la máquina nuevamente se encuentre totalmente operacional. Como lo indica la Figura 4.8, esto generalmente es mucho más que el tiempo neto de reparación.

El tiempo de parada de la máquina, como se definió, puede variar mucho entre distintas ocasiones en que se da la misma falla. Las consecuencias más serias generalmente son causadas por las paradas más largas. Ya que estas consecuencias cada vez son más graves para nosotros, el tiempo muerto que se registra en la hoja de información debe basarse en el "peor caso típico"

Por ejemplo, si el tiempo muerto causado por una falla que ocurre en el turno noche de un fin de semana suele ser mayor que el que toma cuando ocurre durante el turno diurno de un día cualquiera de la semana, y es normal que suceda lo primero, registraremos el tiempo que corresponde a aquel.

Es posible reducir las consecuencias operacionales de la falla tomando medidas para acortar el tiempo muerto. Lo más común es reducir el tiempo que toma encontrar los repuestos. De cualquier manera, como se dijo en el Capítulo 2, en esta etapa todavía estamos en el proceso de definir el problema con lo que el análisis debe basarse (al menos al principio) en las políticas actuales de compra de repuestos.

Nótese que si la falla afecta las operaciones, es más importante el establecer el tiempo muerto que el tiempo medio para reparar la falla (TMR), por dos razones:

- En la mente de muchas personas, las palabras "tiempo de reparación" tiene el significado que se muestra en la Figura 4.8. Si esto se usa en vez de "tiempo muerto", podría impedir la subsecuente asignación de consecuencias operacionales de la falla.
- Debemos basar la asignación de consecuencias sobre el "peor caso típico" y no en el "promedio" como se discutió anteriormente.

Si la falla no causa interrupción del proceso, debe ser registrado el tiempo promedio que toma reparar la falla. Esto puede ayudar a establecer los requerimientos de mano de obra.

Además del tiempo muerto, se debe listar cualquier otra forma mediante la cual la falla podría tener un efecto significativo sobre la capacidad operacional del activo. Las posibilidades incluyen:

- Cómo y cuánto afecta la calidad del producto y el servicio al cliente, y de ser así, qué penalidades financieras origina.
- Si origina detención de cualquier otro equipo o actividad (o disminuye la velocidad)
- Si la falla lleva a un incremento del costo operativo total además del costo directo de reparación (como ser costos de energía mas altos)
- Qué daños secundarios (si existe alguno) son causados por la falla

Acción Correctiva

Los efectos de falla también deben indicar qué debe hacerse para reparar la falla. Esto debe incluirse cuando se indica el tiempo muerto, como se muestra en bastardillas en los ejemplos siguientes:

- Tiempo muerto para reemplazar los cojinetes, cerca de 4 horas
- Tiempo muerto para limpiar el bloqueo y resetear el interruptor, aprox. 30 minutos
- Tiempo muerto para desarmar la turbina y reemplazar el disco, aprox. 2 semanas

4.6. Fuentes de Información acerca de Modos y Efectos

Al considerar donde obtener la información necesaria para armar un AMFE (Análisis de Modos y Efectos de las Fallas) completo, debemos recordar ser proactivos. Esto significa que debe darse tanto énfasis a lo que podría ocurrir como a lo que ha ocurrido. Las fuentes de información más frecuentes se describen en los párrafos siguientes, junto con un pequeño resumen de las ventajas y desventajas.

El fabricante o proveedor del equipo

Al llevarse a cabo un AMFE, la primer fuente de información que nos viene a la mente es el fabricante. Sobre todo en el caso de equipos nuevos. En algunas industrias se llegó al punto donde frecuentemente se le pide a los fabricantes o proveedores que como parte del contrato de venta del equipo se incluya un AMFE comprensivo. Además de otras cosas, éstos pedidos suponen que el fabricante conoce todo lo que necesita saberse acerca de cómo el equipo puede fallar y qué pasa cuando el equipo falla.

En realidad, muy pocas veces esto es así.

En la práctica muy pocos fabricantes conocen la operación cotidiana del activo físico. Una vez finalizado el período de garantía casi ninguno recibe información de los usuarios acerca de qué es lo que falla y por qué. Lo mejor que la mayoría de ellos pueden hacer es tratar de sacar conclusiones acerca de cómo sus máquinas están trabajando a partir de una combinación de anécdotas y un análisis de venta de repuestos (excepto cuando ocurre una falla realmente espectacular, en cuyo caso los abogados suelen asumir el papel de los ingenieros. En estos casos, por lo general surge una discusión técnica racional en busca de la causa raíz.)

Los fabricantes también tienen poco acceso a la información sobre el contexto operacional del equipo, los estándares de funcionamiento deseado, las consecuencias de la falla y las habilidades de los operadores y personal

de mantenimiento del usuario. En la mayoría de los casos, los fabricantes no conocen nada acerca de estos temas. Como resultado, el AMFE hecho por estos fabricantes suele ser genérico y altamente especulativo, limitando su valor.

Los pocos fabricantes de equipos que son capaces de producir por sí mismos un AMFE satisfactorio generalmente pueden incluirse dentro de alguna de estas dos categorías:

- Están involucrados dentro del mantenimiento del equipo en toda su vida útil, ya sea directamente o a través de distribuidores asociados. Por ejemplo la mayoría de los propietarios de vehículos particulares llevan a hacer el mantenimiento de sus unidades a las concesionarias que se lo vendieron. Esto permite a las concesionarias proveer a los fabricantes una gran cantidad de información sobre las fallas.
- Se les paga para llevar a cabo estudios de confiabilidad sobre prototipos como parte del proceso de abastecimiento. Esto es muy común en adquisiciones militares y bastante raro en la industria en general.

En la mayoría de los casos el autor encontró que la mejor forma de acceder a la información que poseen los fabricantes acerca del comportamiento del equipo es pidiéndole a sus vendedores técnicos experimentados que trabajen con la gente que eventualmente operará y mantendrá el activo, para desarrollar un AMFE que sea satisfactorio para ambas partes. Si se toma en cuenta esta sugerencia, los vendedores técnicos deben tener acceso sin restricciones al consejo de un especialista que lo ayude a responder preguntas difíciles.

Si encaramos las cosas de esa manera, temas como las garantías, los derechos de autor, el vocabulario que los participantes deben manejar, el soporte técnico, la confiabilidad, etc. deben ser tenidos en cuenta en el momento en que se firma el contrato, con lo que todo el mundo sabrá qué es lo que se espera de la otra parte.

Nótese que hemos sugerido que se usen vendedores técnicos antes que diseñadores, ya que por lo general los diseñadores suelen negarse a admitir que sus diseños pueden fallar, con lo que se reduce su capacidad de ayuda para desarrollar el AMFE.

Listas genéricas de modos de falla

Las listas de modos de falla "genéricas" son listas de modos de falla, o a veces un AMFE completo, preparado por terceros. Pueden cubrir sistemas enteros, aunque frecuentemente cubren sólo un activo físico o un solo componente. Estas listas genéricas a veces son consideradas como una manera de acelerar o "abreviar" esta parte del proceso de desarrollo del programa de mantenimiento. Deben ser abordadas con precaución debido a los siguientes motivos:

Las personas que operan y mantienen el equipo
En la mayoría de los casos, la mejor fuente de información para preparar un AMFE son las personas que día a día operan y mantienen el equipo. Ellos son los que más conocen el funcionamiento del equipo, acerca de qué puede estar andando mal, qué importancia tiene cada falla y qué debe hacerse para repararla. Y si no lo saben, son ellos quienes tienen más razones para averiguarlo.

La mejor manera de capturar y recolectar éstos conocimientos es haciendo que participen formalmente en la preparación del AMFE como parte del proceso general RCM. La forma más eficiente de hacer esto es en una serie de reuniones bajo la guía de un facilitador entrenado adecuadamente. (La fuente más valiosa de información adicional en estas reuniones es un conjunto de gráficos de procesos y planos de los activos, complementado con el eventual acceso al proceso y/o al especialista técnico). Esta forma de encarar el RCM se presentó en el Capítulo 1 y se discutirá con detenimiento en el Capítulo 13.

4.7. Niveles de Análisis y la Hoja de Información

En la parte 4 de este Capítulo se mostró cómo los modos de falla pueden ser descriptos en casi cualquier nivel de detalle. El nivel de detalle seleccionado debe permitir identificar una política de manejo de falla adecuada. Por lo general, pueden seleccionarse niveles altos (menor detalle) si el componente o subsistema admiten trabajar a rotura ("run to failure") o bien realizar tareas de búsqueda de falla, mientras que los niveles más bajos (más detalle) deben seleccionarse si el modo de falla puede estar sujeto a algún mantenimiento proactivo.

El nivel de detalle que se usa para describir modos de falla en las hojas de información también está influenciado por el nivel en el cual se lleva a cabo el AMFE. Por esto repasamos los factores principales que influyen en el nivel de análisis general (también conocido como "nivel de documentación") antes de considerar cómo ésto afecta el detalle con el que se describen los modos de falla.

Nivel de análisis
RCM se define como un proceso usado para determinar qué es lo que debe hacerse para asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo aquello que sus usuarios quieren que haga en su contexto operacional presente. A la luz de esta definición, hemos visto que es necesario definir el contexto detalladamente antes de que podamos aplicar el proceso. No obstante, también necesitamos definir exactamente cuál es el "activo físico" al que se le aplicará el proceso.

HOJA DE INFORMACIÓN RCM II
© 1998 ALADON LTD

SISTEMA: *Motor*

SUBSISTEMA: *Sistema de Combustible*

	FUNCIÓN		FALLA FUNCIONAL (Pérdida de función)		MODO DE FALLA (Causa de la Falla)
1	Transportar combustible desde el tanque de combustible al motor a razón de hasta 1 litro por minuto	A	Totalmente incapaz de transportar combustible	1 3 7 12	No hay combustible en el tanque Filtro de combustible tapado Línea de combustible tapada por un objeto extraño Línea de combustible cortada ...Etc.

Figura 4.9: Modos de falla de un sistema de combustible

Por ejemplo, si aplicamos RCM a un camión, ¿el activo es todo el camión? O ¿debemos subdividir el camión y analizar (por ejemplo) el sistema de tracción aparte del sistema de frenos, de la dirección, del chasis, etc.? O ¿deberíamos ir más allá y subdividir el sistema de tracción y analizar (por ejemplo) el motor aparte de la caja de cambios, embrague, diferencial, palieres y ruedas? O ¿debemos dividir el motor en block, el carburador o inyector, sistema de enfriamiento, el sistema de combustible, etc. antes de comenzar el análisis? ¿por qué no subdividir el sistema de combustible en tanque, bomba, cañerías y filtros?.

Este punto necesita tratarse con cuidado porque un análisis que se lleva a cabo a muy alto nivel termina siendo muy superficial, mientras que uno hecho a un nivel muy bajo se vuelve muy inmanejable e inentendible. A continuación se explicarán las implicancias de realizar el análisis en diferentes niveles.

Comenzando en un nivel bajo

Uno de los errores más comunes en el proceso RCM es llevar a cabo el análisis a un nivel muy bajo.

Por ejemplo, cuando pensamos en los modos de falla que pueden afectar a un auto, posiblemente se nos ocurra que está bloqueada la línea de Combustible. La línea de Combustible es parte del sistema de combustible, con lo que parecería adecuado agregar este modo de falla en la hoja de información del sistema de combustible. La Figura 4.9 indica que si el análisis se lleva a cabo en este nivel, el bloqueo de la línea de combustible podría ser el séptimo modo de falla sobre un total de quizás una docena que pueden causar la falla funcional "no transfiere nada de combustible".

Cuando terminamos de completar la hoja de decisión para este subsistema, el Grupo de Análisis RCM pasa al próximo sistema, así siguiendo hasta que los requerimientos de mantenimiento de todo el vehículo hayan sido establecidos. Esto parece ser bastante razonable si no tenemos en cuenta que el vehículo en realidad puede subdividirse literalmente en docenas, por no decir cientos, de subconjuntos a este nivel de detalle. Si se lleva a cabo un análisis separado para cada subsistema, pueden aparecer los siguientes problemas:

- Cuanto más bajo se vaya en la jerarquía, más difícil se vuelve conceptualizar y definir estándares de funcionamiento, (podríamos llegar a preguntarnos a quién le importa la cantidad exacta que pasa a través del sistema de combustible, mientras que el consumo de combustible del vehículo se encuentre dentro de límites razonables y que el vehículo tenga suficiente potencia).
- En un nivel bajo se vuelve igualmente difícil el visualizar y por ende analizar las consecuencias de la falla.
- Cuanto más bajo sea el nivel de análisis más difícil se vuelve definir qué componentes conforman cada sistema (por ejemplo, si el acelerador es parte del sistema de combustible o del sistema de control del motor).
- Algunos modos de falla pueden causar que muchos subconjuntos dejen de funcionar simultáneamente (como una falla en el abastecimiento de electricidad en una planta industrial). Si cada subsistema se analiza por separado, los modos de falla de este tipo se van a repetir una y otra vez.
- Se puede volver muy difícil manejar los ciclos de control y protección en un nivel de análisis muy bajo, especialmente cuando un sensor, en un subsistema, maneja un actuador que está en otro subsistema, a través de un procesador que se encuentra en un tercero.

  Por ejemplo, un limitador de revoluciones que lee una señal del volante en el subsistema del "bloque del motor", envía una señal a través de un procesador en el subsistema de "control del motor" a una válvula que corta el suministro de combustible en el subsistema de "combustible".

Si no se presta especial atención a este tema, se terminará analizando tres veces el mismo modo de falla de tres formas levemente diferentes, y se recomendará realizar tres veces la misma tarea de búsqueda de falla para el mismo ciclo.

- Se debe hacer una hoja de información nueva para cada subsistema. Esto lleva a generar una cantidad enorme de papeles de trabajo para el análisis de todo el vehículo, o a consumir una cantidad proporcional de espacio en la memoria de la computadora. Los manuales de los sistemas de archivos electrónicos deben ser cuidadosamente estructurados para poder guardar la información de manera ordenada. En resumen, todo el ejercicio se vuelve más extenso y mucho más intimidatorio de lo que debiera ser.

Por lo general el AMFE se lleva a cabo a un nivel muy bajo porque se cree que hay una correlación entre el nivel en el cual identificamos modos de falla y el nivel en el que debe hacerse el AMFE (o la totalidad del análisis RCM). En otras palabras, generalmente se cree que si queremos identificar en detalle los modos de falla tendremos que hacer un AMFE para cada uno de los componentes o subconjuntos.

De hecho, esto no es así. El nivel en el cual podemos identificar los modos de falla es independiente del nivel en el que se hace el análisis, como se muestra en la próxima sección de este capítulo.

Comenzando desde arriba

En vez de empezar el análisis desde abajo en la jerarquía del equipo, podría comenzarse desde arriba.

Por ejemplo, la función primaria del camión se enunció en la página 29 como: "Transportar hasta 40 toneladas de planchas de acero a velocidades de hasta 95 Km. por hora (promedio de 75 Km./h) desde Startsville hasta Endburg con un tanque de combustible". La primer falla funcional asociada con esta función es "totalmente incapaz de moverse". Cualquiera de los cuatro modos de falla de la Figura 4.9 podrían causar esta falla funcional, con lo que, a pesar de poder listarlos en la hoja de información del subsistema de combustible, pueden listarse en la hoja de información que cubre la totalidad del camión, como se muestra en la Figura 4.10.

HOJA DE INFORMACIÓN RCM II

© 1998 ALADON LTD

SISTEMA: *Camión de 40 Ton*

SUBSISTEMA:

FUNCIÓN		FALLA FUNCIONAL (Pérdida de función)		MODO DE FALLA (Causa de la Falla)	
1	Transportar hasta 40 toneladas de material a velocidades de hasta 95 Km. por hora (promedio de 75 Km./h) desde Startsville hasta Endburg con un tanque de combustible	A	Incapaz de transportar material	18	No hay combustible en el tanque
				42	Filtro de combustible tapado
				73	**Línea de combustible tapada por un objeto extraño**
				114	Línea de combustible cortada
					...Etc.

Figura 4.10: Modos de falla de un camión

Las ventajas principales de comenzar el análisis de esta manera son las siguientes:

- Las funciones y las expectativas son mucho más fáciles de definir.
- Las consecuencias de las fallas son mucho más fáciles de evaluar.
- Es mucho más fácil identificar y analizar circuitos de control y circuitos en general.
- Hay menos repetición de funciones y de modos de falla.
- No es necesario hacer una hoja de información nueva para cada subsistema nuevo, por lo que el análisis llevado a cabo en este nivel insume mucho menos papel.

No obstante, la principal desventaja de realizar el análisis en este nivel es que hay miles de modos de falla que podrían hacer que el camión no pueda moverse. Estos van desde una rueda delantera pinchada hasta el cigüeñal partido. Con lo que si tratamos de listar todos los modos de falla a este nivel, es muy probable que nos olvidemos de agregar muchos de ellos.

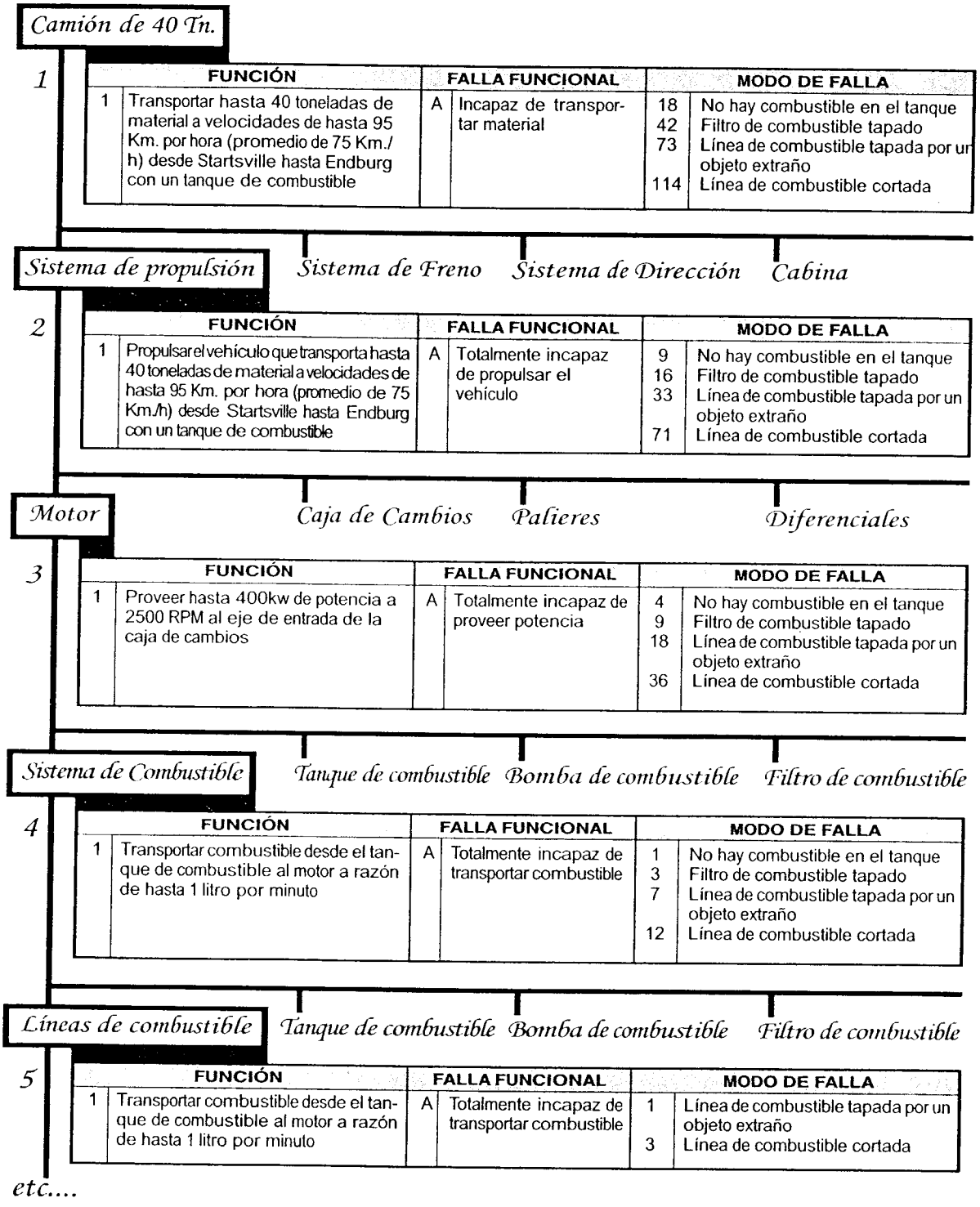


Figura 4.11: Funciones y fallas a distintos niveles

Por ejemplo, hemos visto como el bloqueo del sistema de combustible podría haber sido el séptimo modo de falla de los doce identificados en el análisis que se llevó a cabo al nivel del "sistema de combustible". Pero, al nivel de todo el camión, la Figura 4.10 muestra que podría haber sido el 73ro. de varios cientos de modos de falla.

Niveles intermedios

Los problemas asociados a los análisis hechos a altos y bajos niveles nos hace ver que sería razonable llevar a cabo el análisis a un nivel intermedio. De hecho, casi estamos consintiendo la elección, ya que la mayoría de los activos pueden subdividirse en muchos subniveles y aplicarse el análisis RCM a cada uno de esos niveles.

Por ejemplo, en la Figura 4.11 se muestra como puede dividirse el camión de 40 toneladas en por lo menos 5 niveles. Se sigue la jerarquía desde el nivel del camión como un todo hasta el nivel de los conductos de combustible. También muestra cómo la función primaria del activo puede definirse a cada nivel de la hoja de información RCM, y cómo aparece el bloqueo de la línea de combustible en cada nivel.

Dadas las cinco posibilidades (a veces más) ¿cómo hacemos para seleccionar el nivel en el cual debemos realizar el análisis?

Como dijimos, el nivel más alto por lo general implica una cantidad enorme de modos de falla para cada función como para permitir un análisis razonable. A pesar de esto, sigue siendo necesario identificar las funciones principales del activo o sistema al nivel más alto para poder encuadrar el resto del análisis.

Por ejemplo, una empresa adquiere un camión para llevar mercaderías de A a B, sin cargar combustible en todo el camino. A pesar que esta última función contribuye con la primera, todo el desempeño del activo, y por lo tanto de su mantenimiento, lleva a que sea analizada a un nivel más alto. Por ejemplo, el ejecutivo principal de una flota de camiones es más probable que pregunte "¿cómo se está comportando el camión X?" y no "¿cómo se está comportando el sistema de combustible del camión X?" (a menos que se sepa que el sistema de combustible es el que causa los problemas).

En el capítulo 2 se explicó que en la práctica, en el enunciado del contexto operacional se establece un registro de las funciones del activo o sistema y de sus estándares de funcionamiento asociados, a niveles superiores a los que se utilizarán para realizar el análisis RCM.

Por otro lado, hemos visto que inicialmente la tendencia es casi siempre a comenzar muy bajo en la jerarquía del activo. Por eso, una buena regla general (especialmente para gente que recién se inicia en RCM) es la de llevar a cabo el análisis a uno o dos niveles más altos de lo que en un principio se ve como razonable. Ésto es porque es mucho más fácil descomponer un subsistema complejo de un nivel de análisis alto, que el subir un nivel cuando se empezó muy abajo. Esto se explica con mayor detalle en la próxima sección de este capítulo.

Con un poco de práctica (especialmente sobre lo que significa "a un nivel en el cual sea posible identificar una política de administración de fallas adecuada"), se vuelve intuitivamente obvio cuál es el nivel más adecuado en el cual debe ser llevado a cabo cada análisis. En este contexto, puede verse que no es necesario analizar cada sistema al mismo nivel para cualquier jerarquía del activo.

Por ejemplo, el sistema de frenos puede analizarse en el nivel 2 como se muestra en la figura 4.11, pero podría ser necesario analizar el motor en el nivel 3 o hasta en el 4.

Cómo Deben Documentarse los Modos de Falla y sus Efectos

Una vez que se estableció el nivel de todo el análisis RCM, debemos decidir qué grado de detalle se necesita para definir cada modo de falla encuadrado en dicho análisis. No hay razón técnica por la cual no puedan listarse todos los modos de falla (junto con sus efectos) al nivel que permita seleccionar una política de manejo de fallas adecuada.

Pero, aún a niveles intermedios, a veces se generan demasiados modos de falla por cada función, especialmente para funciones primarias. Por lo general esto ocurre cuando el activo tiene subconjuntos complejos que puedan tener muchos modos de falla.

Algunos ejemplos de estos subconjuntos son motores eléctricos pequeños, pequeños sistemas hidráulicos, cajas reductoras pequeñas, circuitos de control, circuitos de protección y acoples complejos.

Como de costumbre, estos subconjuntos pueden manejarse de cuatro maneras diferentes dependiendo del contexto y de sus consecuencias, como se ve a continuación:

Opción 1

Listar de manera individual todos los modos de falla de ocurrencia probable del subconjunto como parte del análisis principal. En otras palabras, a un nivel equivalente al nivel 3, 4, 5 ó 6 en la Figura 4.7.

Por ejemplo, consideremos un activo que puede detenerse completamente por culpa de una falla de una pequeña caja reductora. En la hoja de información de este activo, la falla de la caja reductora puede listarse como se muestra a continuación:

Por lo general, los modos de falla que afectan a un subconjunto pueden incorporarse en un nivel de análisis más alto si el subconjunto no tiene más de seis modos de falla posibles a ser considerados y que puedan causar cualquier falla funcional del sistema de nivel superior.

	MODO DE FALLA	EFECTOS DE FALLA
1	Se agarrotan los cojinetes de la caja reductora	Se detiene el motor y suena una alarma en la sala de control. Tiempo muerto para remplazar la caja reductora por una de reserva 3 hs. Se ajustan los cojinetes en el taller
2	Se desgastan los dientes de los engranajes	El motor no se detiene pero igualmente la máquina se para. Tiempo muerto para remplazar la caja reductora por una de reserva 3 hs. Se cambian los engranajes en el taller
3	Se agarrota la caja reductora por falta de lubricante	Se detiene el motor y suena una alarma en la sala de control. Tiempo muerto para remplazar la caja reductora por una de reserva 3 hs. La caja reductora agarrotada podría tener que descartarse.
	....etc	

Opción 2

Listar la falla del subconjunto como un modo de falla simple en la hoja de información para empezar, luego confeccionar una nueva hoja de información para analizar las funciones, fallas funcionales, modos de falla y efectos del subconjunto como un ejercicio por separado.

Por ejemplo, la falla de la caja reductora puede listarse de la siguiente manera:

	MODO DE FALLA	EFECTOS DE FALLA
1	Falla la caja reductora	La caja reductora se analiza por separado
	....etc	

Por lo general es conveniente tratar a los subconjuntos de esta manera si tienen más de diez modos de falla que puedan causar cualquier falla funcional del sistema principal.

(si existen entre 7 y 9 modos de falla por falla funcional, puede usarse la opción 1 ó 2 teniendo en cuenta que un análisis por separado implica más análisis, pero menos modos de falla por análisis).

Opción 3

Listar la falla del subconjunto en la hoja de información como un modo de falla simple –en otras palabras, a un nivel equivalente al nivel 1 o 2 de la Figura 4.7- registrar sus efectos y dejarlo así.

Por ejemplo, si se consideró apropiado tratar así la falla de la caja reductora, podría ser listado de la siguiente manera:

	MODO DE FALLA	EFECTOS DE FALLA
1	Falla la caja reductora	Se detiene el motor y suena una alarma en la sala de control. Tiempo muerto para remplazar la caja reductora, 3 hs.
	....etc	

Esta forma de tratar los subconjuntos sólo puede adoptarse para un componente o subconjunto que tenga las siguientes características:

- Cuando falla no está sujeto a un diagnóstico detallado ni a rutinas de reparación, pero puede ser reemplazado fácilmente para luego ser descartado o reparado.
- Es pequeño pero complejo.
- No tiene ningún modo de falla dominante.
- No es susceptible a ninguna forma de mantenimiento preventivo.

Opción 4

En ciertos casos, un subconjunto complejo podría sufrir uno o dos modos de falla dominantes que sean evitables, y algunos modos de falla menos probables que por su frecuencia y/o sus consecuencias no convenga prevenir.

Por ejemplo, un motor eléctrico pequeño que trabaja en un ambiente con mucho polvo tiene altas posibilidades de fallar por sobrecalentamiento porque la rejilla que cubre su ventilador de enfriamiento se tape y por lo general son pocas las fallas por otras causas, se dan muy espaciadamente y no tienen consecuencias serias. En este caso, los modos de falla para este motor pueden listarse de la manera siguiente:

- Ventilador del motor tapado con polvo
- Falla el motor (por otras razones)

En realidad esta opción es una combinación de las opciones 1 y 3.

Servicios

La falla de suministros (electricidad, agua, vapor, aire comprimido, gas, vacío, etc.) se trata como un modo de falla simple desde el punto de vista del activo que los recibe, ya que un análisis detallado de estas fallas está fuera del activo en cuestión. Este tipo de fallas y sus consecuencias se documentan con fines informativos ("falla el suministro eléctrico") para luego ser analizados en detalle cuando se trate el servicio como un todo.

Una Hoja de Información Completa

Los efectos de falla se registran en la última columna de la Hoja de Información, junto al modo de falla correspondiente, como lo muestra la Figura 4.13.

HOJA DE INFORMACIÓN RCMII

© 1998 ALADON LTD

SISTEMA		SISTEMA N°	Facilitador:	Fecha	Hoja N°
	Turbina a gas de 5MW	216 - 05	N Smith	07 - 07 - 1998	1
SUBSISTEMA		**SUBSISTEMA N°**	**Auditor:**	**Fecha**	**de**
	Sistema de Escape	216 - 05 - 11	P Jones	07 - 08 - 1998	3

FUNCIÓN		FALLA FUNCIONAL (Pérdida de función)		MODO DE FALLA		EFECTO DE FALLA (Qué sucede cuando se produce una falla)
1	Conducir sin restricciones todos los gases calientes de la turbina hasta un punto fijado a 10 metros encima del techo de la sala de turbinas.	A.	Incapaz de canalizar los gases	1	Montantes del silenciador corroídos	El ensamble del silenciador colapsa y cae al fondo del conducto. La contrapresión hace que la turbina se acelere violentamente y se pare a una alta temperatura de escape. Tiempo de parada de máquina para reemplazar el silenciador, hasta cuatro semanas.
		B	Flujo de gases restringido	1	Se desprende parte del silenciador por fatiga	Según la naturaleza del atasco, la temperatura de escape puede subir hasta parar la turbina. Partículas de deshecho sueltas podrían dañar partes de la turbina. Tiempo de parada de máquina para reparar el silenciador, 4 semanas.
		C	No puede contener los gases	1	Se agujerea la junta flexible por corrosión	La junta flexible está dentro de la campana de la turbina, de modo que la mayor parte de la fuga de los gases de escape sería evacuada por el sistema de extracción de la campana. No es probable que los mecanismos existentes de detección de incendio y gases dentro de la campana detecten una fuga de gases de escape, y es improbable que la temperatura suba lo suficiente como para hacer disparar la alarma detectora de fuego. Una pérdida grave puede hacer que se sobrecaliente el separador de partículas sólidas y líquidas en los gases, así como fundir la alarma de control situada cerca de la fuga, con consecuencias imprevisibles. Los equilibrios de presión dentro de la campana son tales que es probable que poco, o ningún, gas pueda escapar por una fuga pequeña, de manera que es posible que no se detecte una fuga pequeña por el olfato o el oído. Tiempo de parada de máquina para reemplazar la junta, hasta 3 días.
				2	Junta del conducto colocada incorrectamente	Los gases se fugan al interior de la sala de turbinas y la temperatura ambiente sube. El sistema de ventilación de la sala de turbinas evacuaría los gases a través de las rejillas a la atmósfera, por lo cual se considera poco probable que la concentración de gases de escape alcance niveles nocivos. Una fuga pequeña en este punto puede ser audible. Tiempo de parada de máquina para reparar, hasta 4 días.
				3	Fuelle superior agujereado por corrosión	Los fuelles superiores están situados fuera de la sala de turbinas, de manera que los gases procedentes de una fuga aquí se dispersarían a la atmósfera. Puede que suba el nivel de ruido del ambiente. Tiempo de parada de máquina para reparar, hasta 1 semana.
		D	No puede transportar los gases a un punto situado a 10metros encima del techo	1	Bulones de montaje de la chimenea de escape cortadas por oxidación	Probablemente la chimenea comience a inclinarse, y sea sostenida por los cables de anclaje por un tiempo, antes de derrumbarse. Si cayera, existe una gran posibilidad de que dañe una estructura ocupada por personas. Tiempo de parada de máquina para reparar, entre varios días y varias semanas.
				2	Chimenea de escape derribada por vientos fuertes	La estructura del conducto está diseñada para soportar vientos de hasta 350 Km./h, por lo que solo tiene posibilidades de caerse durante una tormenta si los cables de anclaje han sido debilitados, quizá por corrosión. De ocurrir, podría caer sobre un módulo de viviendas. Tiempo de parada de máquina para reparar, hasta varias semanas.
				1	Malla de retención de material del silenciador corroída	La mayoría del material se volaría hacia afuera, pero es posible que parte de él caiga al fondo del conducto y obstruya la salida de la turbina, causando una alta temperatura de gases de escape y posible interrupción en el servicio de la turbina. Los niveles de ruido subirían progresivamente. Tiempo de parada de máquina para reparar, alrededor de 2 semanas.
2	Reducir el nivel de ruido del escape a Nivel de Ruido 30 de ISO, a 50 metros.	A	El nivel de ruido excede el Nivel de Ruido 30 de ISO, a 50 metros	2	Fugas del conducto fuera de la sala de turbinas	..., etc.

Figura 4.13: La Hoja de Información de RCM

5 Consecuencias de Falla

En los capítulos anteriores se explicó que el proceso RCM implica la formulación de siete preguntas acerca del activo seleccionado:

- ***¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociados al activo en su actual contexto operacional?***
- ***¿De qué manera falla en satisfacer dichas funciones?***
- ***¿Cuál es la causa de cada falla funcional?***
- ***¿Qué sucede cuando ocurre cada falla?***
- ***¿En qué sentido es importante cada falla?***
- ***¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir cada falla?***
- ***¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada?***

Las respuestas a las primeras cuatro preguntas se discutieron detalladamente en los Capítulos 2 a 5. En estos Capítulos se mostró cómo se usa la Hoja de Información RCM para documentar las funciones del activo que se está analizando, y cómo listar las fallas funcionales asociadas, los modos de falla y sus efectos.

Las últimas tres preguntas se refieren a cada modo de falla individual. Este Capítulo trata la quinta pregunta:

- *¿De qué manera importa cada falla?*

5.1 Técnicamente Factible y Merecer la Pena

Cada vez que ocurre una falla en un activo físico, de alguna manera afecta a la organización que lo utiliza. Algunas fallas afectan la producción, la calidad del producto o la atención al cliente. Otras representan un riesgo para la seguridad o el medio ambiente. Algunas incrementan los costos operativos, por ejemplo al incrementar el consumo de energía, mientras que algunas tienen impacto en cuatro, cinco, o seis de estas áreas. Algunas otras aparentemente no tienen efecto alguno si ocurren por sí solas, pero ponen en riesgo a la organización, exponiéndola a fallas mucho más serias.

Si cualquiera de estas fallas no es prevenida, el tiempo y el esfuerzo que se necesitan para repararlas también afecta a la organización, porque la reparación de fallas consume recursos que podrían ser mejor aprovechados en otras tareas más rentables.

La naturaleza y la gravedad de estos efectos definen las consecuencias de la falla. En otras palabras, definen la manera en la que los dueños y los usuarios de los activos creerán que cada falla es importante. (Nótese que los efectos de la falla describen *qué sucede* cuando ocurre una falla, mientras que las consecuencias describen cómo (y cuánto) *importa*. Entonces podemos decir que, si podemos reducir los efectos de una falla en términos de frecuencia y/o severidad, estaremos reduciendo sus consecuencias.)

Si las consecuencias son serias, entonces se harán esfuerzos considerables para evitar, eliminar o minimizar sus consecuencias. Sobre todo si la falla puede herir o matar a una persona, o si tiene efectos serios sobre el madio ambiente. Esto también es válido si las fallas interfieren con la producción o las operaciones, o si pueden causar daños secundarios significativos.

Por otro lado, si la falla solo tiene consecuencias menores, es posible que no se tome ninguna acción proactiva, y que la falla simplemente sea reparada una vez que ocurra.

Este enfoque sobre las consecuencias hace que RCM comience el proceso de selección de tareas asignando los efectos a cada modo de falla y clasificándolos dentro de una de las cuatro categorías definidas por RCM. El próximo paso es encontrar una tarea proactiva que sea físicamente posible de realizar y que reduzca, o que permita realizar una tarea que reduzca, las consecuencias de la falla al punto que sea tolerable para el dueño o el usuario del activo. Si podemos encontrar dicha tarea, se dice que es *técnicamente factible*. Los criterios que gobiernan la factibilidad técnica se examinan en detalle en los Capítulos 6 y 7.

Si una tarea es técnicamente factible, podemos entonces pasar al tercer paso en el cual nos preguntaremos si realmente la tarea reduce las consecuencias de la falla a un punto que justifique los costos directos e indirectos de hacerla. (Los costos directos son los costos de mano de obra o de los materiales necesarios para hacer la tarea y para hacer cualquier otro trabajo de reparación asociado; los costos indirectos incluyen los costos de todo tiempo muerto necesario para realizar la tarea.) Si la respuesta es sí, diremos que la tarea *merece la pena*.

Una tarea proactiva merece la pena si reduce las consecuencias del modo de falla asociado a un grado tal que justifique los costos directos e indirectos de hacerla.

Si no es posible encontrar una tarea proactiva adecuada, la naturaleza de las consecuencias de falla también indican qué acción "a falta de" debería ser tomada. Las tareas "a falta de" vuelven a verse en los Capítulos 8 y 9.

El resto de este Capítulo considera los criterios utilizados para evaluar las consecuencias de la falla, y así decidir si *merece la pena* realizar algún tipo de tarea proactiva. Estas consecuencias se dividen en cuatro categorías en dos etapas distintas. La primera etapa separa las funciones ocultas de las funciones evidentes.

5.2 Funciones Ocultas y Evidentes

Hemos visto que todo activo tiene más de una, y a veces docenas de funciones. Cuando la mayoría de estas funciones fallan, se hace inevitablemente evidente que ha ocurrido una falla.

Por ejemplo, algunas fallas activan luces de advertencia, alarmas sonoras o ambas. Otras hacen que se paren las máquinas o que se interrumpa alguna otra parte del proceso. Otras dan lugar a problemas de calidad de producto, o a un incremento en el consumo de energía, y otras van acompañadas de efectos físicos obvios tales como ruidos fuertes, escapes de vapor, olores extraños o manchas de líquido en el suelo.

Por ejemplo, la Figura 2.7 muestra tres bombas que volvemos a representar en la Figura 5.1 a continuación. Si se agarrota un cojinete de la bomba A, se pierde la capacidad de bombeo. Esta falla por si sola inevitablemente se manifestará a los operadores, tan pronto como cuando suceda o al interrumpirse alguna operación situada más adelante en el proceso. (Posiblemente los operadores no se darán cuenta inmediatamente de que la anomalía tiene su origen en el rodamiento, pero inevitablemente repararían en que algo anormal ha sucedido).

Figura 5.1:
Tres bombas



Las fallas de este tipo se califican de evidentes porque tarde o temprano alguien se dará cuenta cuando se producen por sí solas. Esto lleva a la siguiente definición de una función evidente:

Una función evidente es aquella cuya falla eventualmente e inevitablemente se hará evidente por sí sola a los operadores en circunstancias normales

No obstante, algunas fallas ocurren de tal forma que nadie sabe que el elemento se ha averiado a menos que se produzca alguna otra falla.

Por ejemplo, si fallase la bomba C de la Figura 5.1, nadie se daría cuenta de que ha fallado porque en circunstancias normales la bomba B seguiría funcionando. Es decir, la falla de la bomba C por sí sola no tendría ninguna repercusión directa a menos que fallase la bomba B (lo cual sería una circunstancia anormal).

La bomba C exhibe una de las características más importantes de una función oculta, que es que la falla de la bomba *por sí sola* no es evidente a los operarios bajo circunstancias normales. Es decir, no será evidente hasta que la bomba B también falle. Esto lleva a la siguiente definición de una función oculta:

Una función oculta es aquella cuya falla no se hará evidente a los operarios bajo circunstancias normales, si se produce por sí sola.

El primer paso en el proceso de RCM es separar las funciones ocultas de las evidentes porque las ocultas necesitan de un manejo especial. Como se explica en la parte 6 de este Capítulo estas funciones están asociadas a dispositivos de seguridad sin seguridad inherente. Dado que este tipo de funciones suman hasta *la mitad de los modos de falla que pueden afectar a los equipos más modernos y complejos,* las funciones ocultas bien podrían convertirse en el tema dominante del mantenimiento en los próximos diez años. Sin embargo, para poner en perspectiva a las funciones ocultas, primero consideraremos las fallas evidentes.

Categorías de Fallas Evidentes

Las fallas evidentes se clasifican en tres categorías de importancia decreciente:

- ***Consecuencias para la seguridad y el medio ambiente***. Una falla tiene consecuencias para la seguridad si puede lesionar o matar a alguien. Tiene consecuencias para el medio ambiente si puede infringir alguna normativa relativa al medio ambiente de carácter corporativo, regional o nacional.
- ***Consecuencias operacionales***. Una falla tiene consecuencias operacionales si afecta a la producción o a las operaciones (volumen de producción, calidad de producto, servicio al cliente o costo operacional, además del costo directo de la reparación).
- ***Consecuencias no operacionales***. Las fallas evidentes que caen dentro de ésta categoría no afectan ni a la seguridad ni a la producción, de modo que sólo involucran el costo directo de la reparación.

Con esta jerarquización de las fallas evidentes, RCM garantiza que se consideren las repercusiones a la seguridad y el medio ambiente en *todo* modo de falla evidente. Mediante este enfoque el RCM inequívocamente coloca a las personas antes que a la producción.

También significa que se evalúan en un mismo análisis las consecuencias sobre la seguridad, el medio ambiente y las económicas, lo cual es mucho más eficaz que considerarlas por separado.

Las próximas cuatro secciones de este Capítulo consideran a cada una de estas categorías detalladamente, comenzando por las categorías evidentes y pasando a los temas más complejos que hacen a las funciones ocultas.

5.3 Consecuencias Ambientales y para la Seguridad

La Seguridad ante todo

Como hemos visto, el primer paso en el proceso de evaluación de las consecuencias es identificar funciones ocultas para que éstas puedan ser tratadas apropiadamente. Todos los otros modos de falla – en otras palabras las fallas que no se clasifican como ocultas – deben ser evidentes por definición. El proceso de RCM considera primero las implicancias ambientales y para la seguridad de cada modo de falla evidente. Los párrafos siguientes explican que el proceso RCM considera primero las implicancias de cada modo de falla evidente, sobre la seguridad y el medio ambiente. Existen dos razones para esto:

- Día a día crece la convicción entre empleados, empleadores, consumidores y en toda la sociedad en general de que es simplemente intolerable que durante el curso de los negocios se lesione o mate a alguien, y por lo tanto debe hacerse todo lo posible para minimizar la posibilidad de que ocurra cualquier tipo de incidente que pueda afectar a la seguridad o al medio ambiente.
- La comprensión pragmática que la probabilidad que se tolera para incidentes relacionados con la seguridad es de varios ordenes de magnitud menor a aquellas que se toleran en fallas que tienen consecuencias operacionales. Como consecuencia de esto, en la mayoría de los casos en los que desde el punto de vista de la seguridad vale la pena realizar una tarea proactiva, dicha tarea también tiende a ser más que adecuada desde el punto de vista operacional.

En cierto sentido, la seguridad se refiere a la seguridad de los individuos en su lugar de trabajo. Concretamente, RCM pregunta si alguien podría resultar lesionado o muerto, como resultado directo del modo de falla en sí o bien como resultado de otro daño que pudiera ser ocasionado por la falla.

Un modo de falla tiene consecuencias para la seguridad si causa una pérdida de función u otros daños que pudieran lesionar o matar a alguien.

En otro nivel, la "seguridad" se refiere a la integridad o bienestar de la sociedad en general. Hoy en día las fallas que afectan a la sociedad tienden a calificarse como problemas "ambientales". De hecho, en muchas partes del mundo se está llegando rápidamente al punto en el cual, o las organizaciones se adaptan a los requisitos ambientales de la sociedad, o se les prohibe continuar con sus actividades. Así que, fuera de las consideraciones que pueda tener cada uno al respecto, el cumplimiento de las expectativas medio ambientales se está volviendo un requisito para la supervivencia de las empresas.

En el Capítulo 2 se explicó cómo las expectativas de la sociedad se expresan en la forma de normativas ambientales municipales, regionales y nacionales. Algunas organizaciones tienen, además, sus propios reglamentos corporativos aún más rigurosos. Se dice que un modo de falla tiene consecuencias ambientales si pudiera conducir a la infracción de cualquiera de éstas normativas.

Un modo de falla tiene consecuencias ambientales si causa una pérdida de función u otros daños que pudieran conducir a la infracción de cualquier normativa o reglamento ambiental conocido.

Notemos que al considerar si una falla tiene consecuencias ambientales o sobre la seguridad, estamos considerando que un modo de falla por sí solo podría tener dicho tipo de consecuencias. Esto es diferente a lo que se explica en la parte 6 de este capítulo, en la que consideramos la falla de los dos elementos de un sistema protegido.

La Cuestión del Riesgo

Aunque la mayoría de las personas quisieran vivir en un medio en el que no exista posibilidad alguna de muerte o daño físico, por lo general se acepta que hay un elemento de riesgo en todo lo que hacemos. En otras palabras, el cero absoluto es inalcanzable, aunque sea un objetivo por el que vale la pena seguir luchando. Esto inmediatamente nos lleva a preguntarnos qué *es* alcanzable.

Para responder a esta pregunta, primero debemos considerar con mayor detalle la cuestión del riesgo.

La valoración del riesgo consta de tres elementos. El primero se pregunta qué pudiera pasar si ocurriera el evento en cuestión. El segundo se pregunta cuán probable es que ocurra el evento. La combinación de estos dos elementos nos provee de una medida del grado de riesgo. El tercero, y con frecuencia el elemento más discutido, se pregunta si el riesgo es tolerable.

Por ejemplo, consideremos un modo de falla que podría resultar en la muerte o daño físico de diez personas (lo que puede ocurrir). Las posibilidades de que ocurra este modo de falla es de una en mil en un año cualquiera (la probabilidad de que ocurra). Basándose en estos datos, el riesgo asociado con esta falla es:

10 x (1 en 1 000) = 1 muerte cada 100 años

Ahora consideremos un segundo modo de falla que podría causar 1000 muertes, pero la posibilidad de que ocurra éste modo de falla es de 1 en 100 000 en un año cualquiera. El riesgo asociado con ésta falla es:

1 000 x (1 en 100 000) = 1 muerte cada 100 años

En estos ejemplos, el riesgo es el mismo aunque los datos en que se basa son bastante diferentes. Notemos también que estos ejemplos no indican si el riesgo es tolerable o no, simplemente lo cuantifica. Si el riesgo es tolerable o no, es una pregunta aparte y mucho más complicada, la cual discutiremos más adelante.

Nota: A lo largo de ésta exposición, los términos "probabilidad" (1 en 10 de una falla en un período) y "tasa de falla" (1 en 10 períodos promedio, correspondiente a una media de tiempo entre fallas de 10 períodos) son utilizados como si fuesen intercambiables cuando se aplican a fallas al azar. En un sentido estricto, esto no es verdad. Sin embargo si el tiempo medio entre fallas (TMEF ó MTBF- Mean Time Between Failures-) es mayor que 4 períodos, la diferencia es tan pequeña que usualmente puede ser ignorada.

Los párrafos siguientes consideran cada uno de éstos tres elementos de riesgo en mayor detalle.

¿Qué podría pasar si ocurriese la falla?

Deben tenerse en cuenta dos cosas al considerar lo que pudiera pasar si ocurriese una falla. Estas son, *qué sucede realmente*, y si como consecuencia *es probable que alguien resulte lastimado o muerto*.

Lo que sucede realmente si ocurre cualquier modo de falla debe ser registrado en la hoja de trabajo de información de RCM como efectos de falla, como se explicó claramente en el Capítulo 4. En la Parte 5 de dicho capítulo hay una lista de efectos típicos que representan una amenaza para la seguridad o para el medio ambiente.

El hecho de que éstos efectos *podrían* matar o herir a alguien no significa necesariamente que lo harán cada vez que ocurran. Algunos hasta podrían ocurrir con frecuencia y sin embargo no matar a nadie. Sin embargo, el tema no es si dichas consecuencias son inevitables, sino si son posibles.

Por ejemplo, si fallase el gancho de un puente grúa utilizado para cargar bobinas de acero, la carga que cae podría matar o herir a cualquier persona que se encontrase parada cerca o debajo de ella en ese momento. Si nadie estuviera cerca, entonces nadie saldría herido. Sin embargo, la posibilidad de que alguien pudiera resultar herido significa que este modo de falla debería ser tratado como un riesgo para la seguridad y analizado de manera acorde.

Este ejemplo demuestra que el proceso de RCM evalúa las consecuencias para la seguridad al nivel más conservador. Si es razonable asumir que cualquier modo de falla *podría* afectar la seguridad o el medio ambiente, asumimos que *puede hacerlo*, en cuyo caso debe ser sometido a un análisis posterior. (Luego vemos que las posibilidades de que alguien resulte herido son tomadas en consideración al evaluar la tolerabilidad del riesgo).

Surge una situación más compleja cuando tratamos con riesgos para la seguridad que ya están cubiertos por alguna clase de protección inherente. Como vimos, uno de los objetivos principales del proceso RCM es el de establecer la manera más efectiva de manejar cada falla en el contexto de sus consecuencias. Esto solamente puede hacerse si antes se evalúan las consecuencias como si no se hiciera nada para manejar la falla (en otras palabras, para predecirlas o para disminuir sus consecuencias).

Los dispositivos de protección que se diseñan para tratar con la falla o con el estado de falla (alarmas, sistemas de desconexión o de alivio) no son más que sistemas de manejo de fallas con protección inherente. Por lo tanto, para asegurarse que el análisis se lleve a cabo desde una base-cero adecuada, las consecuencias de las fallas de las funciones protegidas deben evaluarse como si este tipo de dispositivos de protección no existiesen.

Por ejemplo, una falla que puede provocar un incendio siempre se la considera como un riesgo para la seguridad, ya que no necesariamente la presencia de un sistema de extinción de fuego garantiza que el fuego vaya a ser controlado y extinguido.

Entonces el proceso RCM puede usarse para validar (o revalidar) la conveniencia del dispositivo de protección mismo desde tres puntos de vista diferentes:

- *Su aptitud para proveer la protección requerida.* Esto se hace definiendo la función del mecanismo de protección, de la manera explicada en el Capítulo 2.
- Si el dispositivo de protección responde *lo suficientemente rápido* como para evitar las consecuencias, como se discutirá en el Capítulo 7.
- Qué debe hacerse para asegurar que el dispositivo de protección *continúe funcionando* cuando se lo requiera, como se explica en la parte 6 de este capítulo y en el Capítulo 8.

¿Qué probabilidad hay que ocurra la falla?

En la parte 4 del Capítulo 4 se menciona que solo deberían incluirse en la Hoja de Información de RCM los modos de falla que tienen posibilidades razonables de ocurrir en el contexto en cuestión. En consecuencia, si la Hoja de Trabajo de Información ha sido preparada sobre una base realista, el mero hecho de que el modo de falla haya sido registrado sugiere que hay alguna posibilidad de que pudiera ocurrir, y por lo tanto que debería ser sometido a un análisis posterior.

(A veces puede ser más prudente listar ciertos modos de falla aunque sean improbables y luego descartarlos sólo como para indicar que fueron considerados en el análisis. En estos casos, podría ponerse en la columna de efectos de la falla un comentario como "Este modo de falla se considera muy improbable como para realizar un análisis más detallado")

¿Es tolerable el riesgo?

Uno de los aspectos más difíciles de la administración de seguridad es la medida en que varían las expectativas de qué es tolerable, de individuo a individuo y de grupo a grupo. Muchos factores influyen sobre esas creencias, pero el más dominante es *el grado de control que un individuo cree tener sobre la situación*. Las personas casi siempre toleran un mayor nivel de riesgo cuando creen que tienen control personal sobre la situación que cuando creen que la situación está fuera de su control.

Por ejemplo, la gente tolera niveles de riesgo mucho más altos cuando manejan sus autos que cuando viajan en avión. (El grado en el cual la creencia de control personal sobre la situación rige la percepción del riego está dada por las asombrosas estadísticas, que dicen que podría morir 1 persona de cada 11 000 000 que viaja en avión en EEUU de Nueva York a Los Ángeles, mientras que podría morir 1 persona de 14 000 que hacen el viaje manejando. ¡A pesar de esto todavía hay gente que hace el viaje manejando porque creen que es más "seguro"!)

Este ejemplo muestra la relación que existe entre la probabilidad de morir que cualquier persona está preparada a tolerar y la sensación de creer que controla la situación.

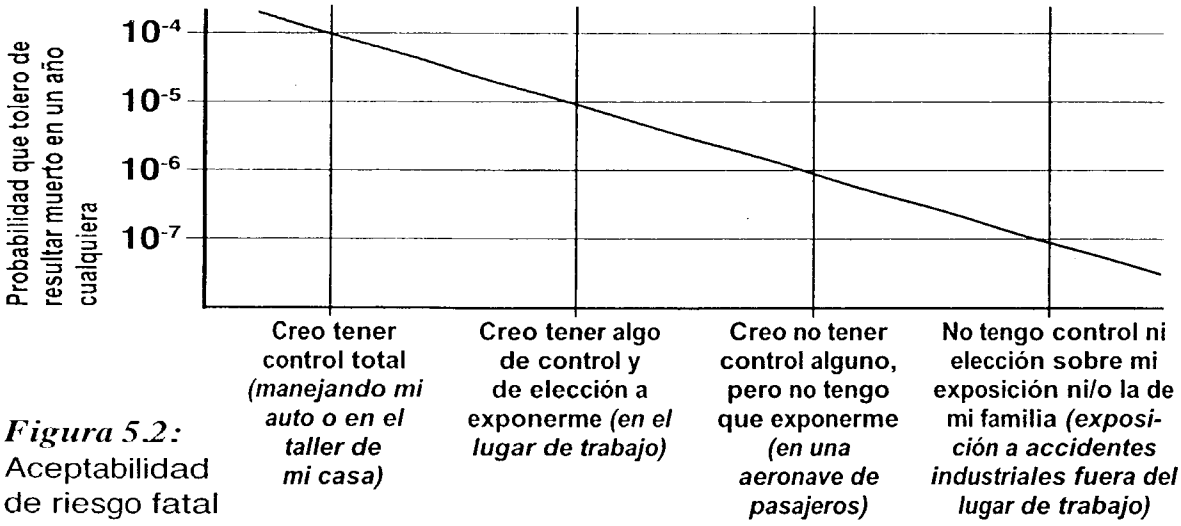


Figura 5.2: Aceptabilidad de riesgo fatal

Los datos de este ejemplo no tienen la intención de ser prescriptivas y no reflejan necesariamente el criterio del autor–solo ilustran lo que un individuo podría decidir que está preparado a tolerar. Notemos también que están basados en la visión de un individuo que viaja por negocios periódicamente. Este punto de vista debe ser traducido al grado de riesgo para toda la población (todos los trabajadores del lugar, todos los ciudadanos de un pueblo, o hasta la población entera de un país).

En otras palabras, si acepto una probabilidad de 1 en 100 000 (10^{-5}) de morir en el trabajo en un año y tengo 1 000 compañeros de trabajo que comparten la misma opinión, entonces todos aceptamos que como promedio 1 persona morirá en nuestro lugar de trabajo cada 100 años – y que esa persona podría ser yo, y podría suceder éste año.

Debemos tener en cuenta que cualquier cuantificación de riesgo hecha de ésta manera sólo puede ser una aproximación general. En otras palabras, si yo digo que tolero una probabilidad de 10^{-5}, no es más que una número indicativo. Indica que estoy preparado a aceptar una probabilidad de morir en el trabajo que es aproximadamente 10 veces más baja que la que acepto cuando manejo (alrededor de 10^{-4}).

Siempre teniendo en cuenta que estamos tratando con aproximaciones, el próximo paso es traducir la probabilidad que mis compañeros de trabajo y yo estamos preparados a aceptar, que cualquiera de nosotros podría morir a causa de *cualquier* evento en el trabajo, a una probabilidad tolerable para *cada evento* (modo de falla o falla múltiple) que podría matar a alguien.

Por ejemplo, continuando con la lógica del ejemplo anterior, la probabilidad de que uno de mis 1000 compañeros de trabajo muera en un año es de 1 en 100 (asumiendo que todas las personas en el lugar de trabajo afrontan aproximadamente los mismos riesgos). Además, si las actividades llevadas a cabo en el lugar de trabajo incluyen, por ejemplo, 10 000 eventos que podrían matar a alguien, entonces la probabilidad promedio de que cada evento pueda matar a una persona debe ser reducida a 10^{-6} en un año. Esto significa que la probabilidad de un evento que es capaz de matar a 10 personas debe ser reducido a 10^{-7}, mientras que la probabilidad de un evento que tiene 1 chance en 10 de matar a una persona debe ser reducido a 10^{-5}.

Las técnicas por las cuales uno mueve en forma ascendente y descendente las jerarquías de probabilidad de ésta manera se conocen como evaluaciones de riesgo cuantitativas o probabilísticas. Esto se estudia en detalle en el Apéndice 3. Los puntos clave a tener en cuenta en este tema son que:

- La decisión de lo que es tolerable debe comenzar con la *probable víctima*. La manera de involucrar a dichas "probables víctimas" en esta decisión se discutirá más adelante en este Capítulo.
- Es posible vincular lo que una persona tolera directa y cuantitativamente a una probabilidad tolerable de cada modo de falla.

Aunque la percepción del grado de control generalmente domina las decisiones acerca de la tolerabilidad del riesgo, de ningún modo es el único tema. Otros factores que nos ayudan a decidir lo que es tolerable son:

- *valores individuales:* el análisis en profundidad de este tema esta mas allá del alcance de este libro. Basta contrastar los puntos de vista de riesgo tolerable que acepta un alpinista con el de aquellas personas que sufren de vértigo o bien comparar el riesgo que toleran las personas que trabajan en una mina bajo tierra con el de las personas que sufren de claustrofobia.
- *valores de industria*: si bien hoy en día toda industria reconoce la necesidad de operar con la máxima seguridad posible, no podemos eludir la realidad de que algunas son intrínsecamente más peligrosas que otras. Algunas compensan niveles de riesgo más altos con niveles salariales más altos. Cada individuo que trabaja en esa industria debe evaluar si vale la pena correr el riesgo implícito; en otras palabras, si el beneficio justifica el riesgo.
- *el efecto sobre las "generaciones futuras":* la seguridad de los niños – especialmente de los que aún no han nacido– tiene un efecto especialmente poderoso en las opiniones de la gente acerca de lo que es tolerable. Generalmente los adultos muestran un desprecio sorprendente y hasta alarmante por su propia seguridad. (Obsérvese cuánto tiempo toma convencer a una persona de usar ropa de protección.) Pero su actitud cambia completamente cuando se trata de sus hijos.

Por ejemplo, el autor trabajó con un grupo que tuvo la oportunidad de discutir sobre las propiedades de cierto producto químico. Las palabras como "tóxico" y "cancerígeno" se utilizaban con indiferencia, a pesar de que los miembros de este grupo eran quienes estaban bajo mayor riesgo. Pero en cuanto supieron que este producto químico era también mutagénico y teratogénico, y se les explicó el significado de estas palabras, repentinamente este producto químico comenzó a tratarse con mucho más respeto.

- *conocimiento:* las percepciones de riesgo son muy influenciadas por el conocimiento del activo físico que tienen las personas, el proceso del que forma parte, y los mecanismos de falla asociados con cada modo de falla. Cuanto más conocen, mejor es su juicio. (La ignorancia puede ser un cuchillo de doble filo. En algunas situaciones las personas enfrentan riesgos mayores por ignorancia y en otras exageran demasiado los riesgos, también por ignorancia. Por otro lado, debemos recordar que también el acostumbramiento puede traer problemas.)

La percepción del riesgo también es influenciada por muchos otros factores, tales como el valor depositado en la vida humana en diferentes grupos culturales, valores religiosos, y hasta factores como la edad del individuo y su estado civil.

Todos estos factores significan que es imposible especificar un estándar de tolerabilidad que sea absoluto y objetivo para cualquier riesgo. Esto sugiere que la tolerabilidad de cualquier riesgo sólo puede ser evaluada partiendo de la base de que es al mismo tiempo relativa y subjetiva – "relativa" en el sentido que el riesgo es comparado con otros riesgos en los que hay un consenso relativamente claro, y "subjetiva" porque en esencia se trata de una cuestión de discernimiento o juicio. Pero, ¿el *juicio de quién*?

¿Quién debería evaluar los riesgos?

La diversidad de los factores tratados anteriormente significa que es simplemente imposible para cualquier persona – o hasta para una organización – asignar riesgos de manera tal que sean universalmente tolerables. Si quien evalúa el riesgo es demasiado conservador puede que la gente lo ignore o ridiculice la evaluación. Si es demasiado relajado, puede terminar acusado de jugar con la vida de las personas (o de realmente matarlas).

Esto sugiere que una evaluación de riesgo satisfactoria sólo puede ser realizada por un grupo. En la medida de lo posible, el grupo debe representar a las personas que probablemente tengan un claro entendimiento del mecanismo de falla, los efectos de falla (especialmente la naturaleza de cualquier riesgo), la probabilidad de que las fallas ocurran, y de las posibles medidas que pueden ser tomadas para anticiparla o prevenirla. El grupo también debe incluir a las personas que tengan un punto de vista legítimo sobre la tolerabilidad de los riesgos. Esto significa representantes de las probables víctimas (generalmente operarios o personal de mantenimiento en el caso de riesgos directos para la seguridad) y la gerencia (que son responsables cuando alguien resulta herido o si se infringe una normativa ambiental).

Si se aplica con el enfoque correcto y de una manera estructurada, la sabiduría colectiva de dicho grupo hará lo posible por asegurar que la organización se esfuerce para identificar y manejar todos los modos de falla que pudieran afectar la seguridad y el medio ambiente. (El uso de éstos grupos sigue la tendencia mundial de las leyes que enuncian que la seguridad es responsabilidad de todo el personal, no sólo de la gerencia).

Los grupos de ésta naturaleza generalmente pueden llegar a un consenso rápido cuando tratan con riesgos directos para la seguridad, porque ellos mismos están incluidos entre las personas en riesgo. Los riesgos ambientales no son tan simples, porque la sociedad en general es la "posible víctima" y muchos de los temas incluidos son poco conocidos. Entonces cualquier grupo del que se espera que considere si una falla podría infringir una normativa o regulación ambiental, debe primero averiguar cuáles de esas normativas y regulaciones cubren el proceso que se está revisando.

Seguridad y Mantenimiento Proactivo

Si una falla pudiese afectar la seguridad o el medio ambiente, el proceso de RCM estipula que debemos intentar prevenirla. La discusión anterior sugiere que:

Para modos de falla que tienen consecuencias para la seguridad o el medio ambiente, sólo merece la pena realizar una tarea proactiva si reduce la probabilidad de la falla a un nivel tolerablemente bajo.

Si no pudiese hallarse una tarea proactiva que logre éste objetivo satisfaciendo al grupo que está haciendo el análisis, estaríamos tratando con un riesgo ambiental o para la seguridad que no puede ser adecuadamente anticipado o prevenido. Esto significa que algo debe ser *cambiado* para hacer que el sistema sea seguro. Éste "algo" podría ser el activo físico mismo, un proceso, o un procedimiento operativo. Los cambios de este tipo a realizarse por única vez se clasifican como "rediseños", y por lo general se realizan para alcanzar alguno de los objetivos siguientes:

- Reducir a un nivel tolerable la probabilidad que ocurra la falla
- Cambiar las cosas para que la falla no tenga consecuencias para el medio ambiente o para la seguridad.

La cuestión del rediseño se discute con mayor profundidad en el Capítulo 9.

Notemos que al tratar con temas ambientales y de seguridad, RCM no introduce el tema económico. Si no es seguro, tenemos la obligación de prevenir que falle, o bien de hacerlo seguro. Esto sugiere que el proceso de decisión para modos de falla que tienen consecuencias para la seguridad o el medio ambiente, puede ser resumido como lo muestra la Figura 5.3:

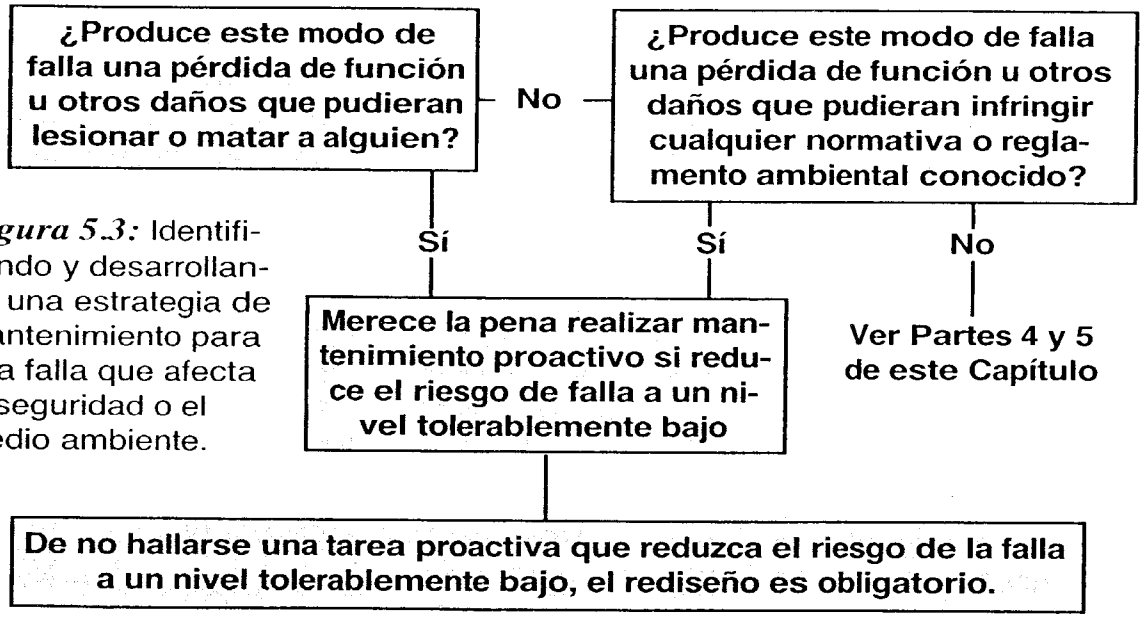


Figura 5.3: Identificando y desarrollando una estrategia de mantenimiento para una falla que afecta la seguridad o el medio ambiente.

Las bases sobre las que determinamos la factibilidad técnica y la frecuencia de los distintos tipos de tareas proactivas se verá en los Capítulos 6 y 7.

RCM y Legislación de Seguridad

Frecuentemente surge la pregunta sobre la relación entre RCM y las leyes de seguridad (la legislación ambiental se trata directamente).

Hoy en día, la mayoría de las leyes que rigen sobre la seguridad simplemente demandan que los usuarios sean capaces de demostrar que están haciendo todo lo que es prudente para asegurar que sus activos físicos sean seguros. Esto ha llevado a un gran incremento del énfasis dado al concepto de *traza de auditoría*, que básicamente requiere que los usuarios de los activos físicos sean capaces de mostrar evidencia documentada de que hay una base racional y defendible para sus programas de mantenimiento. Prácticamente en todos los casos, RCM satisface completamente éste tipo de requerimientos.

Sin embargo algunos reglamentos demandan que deben realizarse tareas específicas en cierto tipo de equipos a intervalos especificados. Si el proceso de RCM sugiere una tarea diferente y/o un intervalo diferente, es aconsejable continuar haciendo la tarea especificada por el reglamento y discutir el cambio sugerido con la autoridad reguladora apropiada.

5.4 Consecuencias Operacionales

Cómo las Fallas Afectan a las Operaciones

La función primaria de la mayoría de los equipos en la industria está vinculada de algún modo con la necesidad de producir ingresos o de apoyar alguna actividad económica.

Por ejemplo, la función primaria de la mayoría de los equipos utilizados en la fabricación es la de añadir valor a los materiales, mientras los clientes pagan directamente para acceder a equipos de transporte y comunicación (autobuses, camiones, trenes o aviones).

Las fallas que afectan las funciones primarias de estos activos físicos afectan la capacidad de generación de ingresos de la compañía. La magnitud de éstos efectos depende de la carga de máquina y de la disponibilidad de alternativas. Sin embargo en la mayoría de los casos los efectos son mayores – frecuentemente mucho mayores – que el costo de reparar las fallas. Esto también se aplica a los equipos de las industrias de servicio, tales como entretenimiento, comercio y hasta la industria bancaria.

Por ejemplo, si fallan las luces en un estadio durante un partido, los espectadores suelen querer que se les devuelva el dinero. Lo mismo se aplica si falla el proyector en un cine. Si falla el aire acondicionado en un restaurante o un negocio, los clientes se van. Los bancos pierden sus negocios si fallan los cajeros automáticos.

En general las fallas afectan las operaciones de cuatro maneras:

- *afectan al volumen de producción total*. Ocurre esto cuando el equipo deja de funcionar o cuando trabaja demasiado lento. Esto resulta en el incremento de los costos de producción en el caso en que la planta tenga que trabajar horas extra para cumplir con la producción, o en la pérdida de ventas si la planta está trabajando a su máxima capacidad.
- *afectan la calidad del producto*. Si una máquina no puede mantener las tolerancias de un producto o si una falla hace que el material se deteriore, dará como resultado scrap o retrabajos costosos. En un sentido más general, la "calidad" también abarca conceptos como la precisión de sistemas de navegación, la puntería de sistemas de balística, etc.
- *afectan el servicio al cliente*. Las fallas afectan a los clientes de muchas maneras, comenzando por las demoras en la entrega de los pedidos hasta los retrasos en los vuelos comerciales. Cuando los retrasos son importantes o frecuentes pueden traer aparejados importantes penalidades, aunque en la mayoría de los casos no redunda en una pérdida de ganancias inmediata. De cualquier modo los problemas de servicio crónicos tarde o temprano hacen que los clientes pierdan confianza y busquen otros proveedores.
- *incremento del costo operacional sumado al costo directo de la reparación*. Por ejemplo, la falla puede hacer que aumente el consumo de energía o que deba usarse un proceso más costoso para realizar la producción.

En empresas sin fines de lucro como las Fuerzas Armadas, algunas fallas también pueden afectar la capacidad de realizar sus funciones primarias, dando lugar muchas veces a resultados devastadores.

"Por la falta de un clavo, se perdió una herradura. Por la falta de una herradura, se perdió un caballo. Por la falta de un caballo, se perdió un mensaje. Por la pérdida de un mensaje, se perdió una batalla. Por la pérdida una batalla, se perdió la guerra. Todo por faltar un clavo."

Aunque podría ser difícil evaluar los resultados de perder una guerra, las fallas de este tipo siguen teniendo implicancias económicas desde un punto de vista materialista. Si esto pasa muy seguido, sería necesario tener (por ejemplo) dos caballos para estar seguros de poder cumplir con la tarea, o sesenta tanques en vez de cincuenta, o seis portaaviones en vez de cinco. Este tipo de redundancias son de hecho muy costosas.

La severidad de este tipo de consecuencias llevan a que, si una falla evidente no representa una amenaza a la seguridad o el medio ambiente, el proceso RCM se enfoque en las consecuencias operacionales de la falla.

Una falla tiene consecuencias operacionales si tiene un efecto adverso directo sobre la capacidad operacional.

Como hemos visto, estas consecuencias tienden por naturaleza a ser *económicas*, por lo que generalmente son evaluadas en términos económicos. Sin embargo, en ciertos casos extremos (como perder una guerra), el "costo" puede tener que ser evaluado a partir de una base más cualitativa.

Evitando Consecuencias Operacionales

El efecto económico global de cualquier modo de falla que tiene consecuencias operacionales depende de dos factores:

- cuánto cuesta la falla cada vez que ocurre, en términos de su efecto sobre la capacidad operacional, más el costo de la reparación.
- con qué frecuencia ocurre.

En la parte anterior de éste Capítulo no prestamos demasiada atención a la frecuencia probable de las fallas. (Los porcentajes de falla no influyen mucho en las fallas relacionadas con la seguridad, porque el objetivo en éstos casos es evitar cualquier falla sobre la cual se pudiera calcular un porcentaje). Sin embargo, si las consecuencias de las fallas son económicas, el costo total *es* afectado por la frecuencia con las que se producen dichas consecuencias. Es decir, para evaluar la trascendencia económica de éstas fallas, debemos evaluar cuánto pueden costar *a lo largo de un período de tiempo*.

Tomemos como ejemplo la bomba de la Figura 2.1 que volvemos a mostrar en la Figura 5.4. Esta bomba se controla por medio de un flotante que la activa cuando el nivel de agua del tanque Y es menor a 120 000 litros, y otro flotante que la apaga cuando el nivel del tanque Y alcanza los 240 000 litros. Una alarma de bajo nivel está colocada justo debajo del nivel de 120 000 litros. Si el tanque se queda sin agua, el proceso aguas abajo debe detenerse. Esto le cuesta a la organización que usa la bomba U$S 5000 por hora.

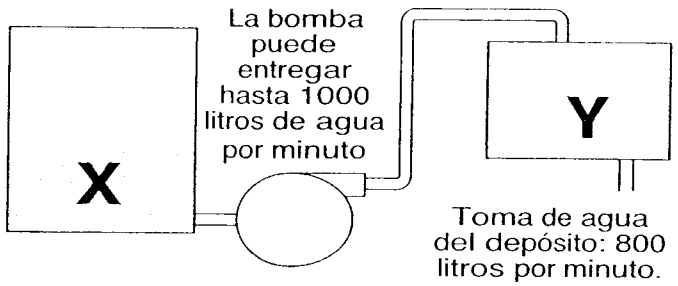


Figura 5.4: Bomba andando sola

	MODO DE FALLA	EFECTO DE LA FALLA
1	Los cojinetes se agarrotan debido al desgaste normal	El motor se detiene pero no suena la alarma en la sala de control. Baja el nivel del tanque hasta que suena la alarma de bajo nivel a los 120 000 litros. Tiempo para el reemplazo de cojinetes, 4 horas. (el tiempo medio de ocurrencia de esta falla es de aproximadamente 3 años)

Figura 5.5: AMFE para la falla de cojinete de la bomba andando sola

Supongamos que el grupo de análisis determinó que un modo de falla que puede afectar a esta bomba es "Los cojinetes se agarrotan debido al desgaste normal". Para simplificar la explicación asumamos que el motor de la bomba tiene un interruptor de sobrecarga y que no tiene una alarma conectada en la sala de control.

Este modo de falla y sus efectos podrían describirse en una Hoja de Información RCM como lo muestra la Figura 5.5.

Se toma agua del tanque a razón de 800 litros por minuto, con lo que el tanque queda vacío 2,5 horas después que suena la alarma de bajo nivel. Toma 4 horas reemplazar los cojinetes, con lo que el proceso aguas abajo parará durante 1,5 horas. Con lo que los costos de la falla serán de

1,5 x U$S 5.000 = U$S 7500

en pérdida de producción cada tres años, más el costo de reparar los cojinetes.

Asumamos que es técnicamente posible monitorear el ruido que hacen los cojinetes una vez por semana (las bases sobre las cuales sustentamos este criterio se verán con mayor detalle en el próximo capítulo). Si se detecta que el cojinete está haciendo un ruido anormal, las consecuencias operacionales se pueden evitar llenando el tanque antes de empezar a trabajar en los cojinetes. Esto nos da 5 horas de tiempo y por lo tanto si hacemos el cambio de cojinetes en 4 horas no interferiremos con la producción.

Asumamos también que la bomba se encuentra en una estación de bombeo sin control humano. También se estuvo de acuerdo en que el monitoreo debería llevarlo a cabo un mecánico de mantenimiento y que la tarea le llevaría 20 minutos. Tomemos el costo total de la mano de obra por hora del mecánico es de U$S 24, con lo que el costo de mano de obra para la tarea es de U$S 8 por cada vez que se realiza el monitoreo. Si el TMEF (Tiempo Medio Entre Fallas) de los cojinetes es de 3 años, tendremos que hacer 150 chequeos por cada falla. Dicho de otra manera, el costo de hacer el monitoreo es:

150 x U$S 8 = U$S 1 200

cada tres años, más el costo de reemplazar los cojinetes.

En este ejemplo, la tarea programada es sin duda costo-eficaz en relación con el costo de las consecuencias operacionales de la falla más el costo de reparación. Entonces si una falla tiene consecuencias operacionales, el criterio para decidir si merece la pena realizar una tarea proactiva es económico.

Para modos de falla con consecuencias operacionales, merece la pena realizar una tarea proactiva si a lo largo de un período de tiempo, cuesta menos que el costo de las consecuencias operacionales más el costo de reparar la falla que pretende evitar.

Si no se puede encontrar una tarea proactiva que sea costo-eficaz, entonces *no merece la pena realizar ningún mantenimiento proactivo* para tratar de anticipar o prevenir el modo de falla en cuestión. En algunos casos, la opción más costo-eficaz en éste punto podría ser simplemente convivir con la falla.

Sin embargo, si no puede hallarse una tarea proactiva y las consecuencias de falla todavía son intolerables, puede querer cambiarse el diseño del activo físico (o cambiar el proceso) para reducir los costos totales por:

- reducción de la frecuencia (y por ende el costo total) de la falla
- reducción o eliminación de las consecuencias de la falla
- transformando una tarea proactiva en costo-eficaz.

El rediseño se tratará con mayor detalle en el Capítulo 9.

Nótese que en el caso de modos de falla que tengan consecuencias para la seguridad o el medio ambiente, el objetivo es reducir la probabilidad de falla a niveles realmente bajos. En el caso de consecuencias operacionales, el objetivo es reducir la probabilidad (o la frecuencia) a un nivel económicamente tolerable. Como se dijo en los primeros párrafos de la parte 3 de este capítulo, dicha frecuencia tiende a ser mucho mayor que la que toleraríamos para la mayoría de aquellos que implican riesgos para la seguridad, con lo que el proceso RCM asume que una tarea que reduce la probabilidad de una falla relacionada con la seguridad a un nivel tolerable, también será útil para tratar las fallas con consecuencias operacionales.

Para empezar, nuevamente sólo consideraremos la conveniencia de realizar cambios *después* de haber establecido si es posible obtener el funcionamiento deseado del activo en su configuración actual. En este caso las modificaciones también necesitan ser justificadas desde el punto de vista de los costos, mientras que en el caso de modos de falla con consecuencias sobre la seguridad o el medio ambiente estábamos obligados a realizar una tarea "a falta de".

Teniendo en cuenta estos comentarios, el proceso de decisión para fallas con consecuencias operacionales puede ser resumido como lo muestra la Figura 5.6.

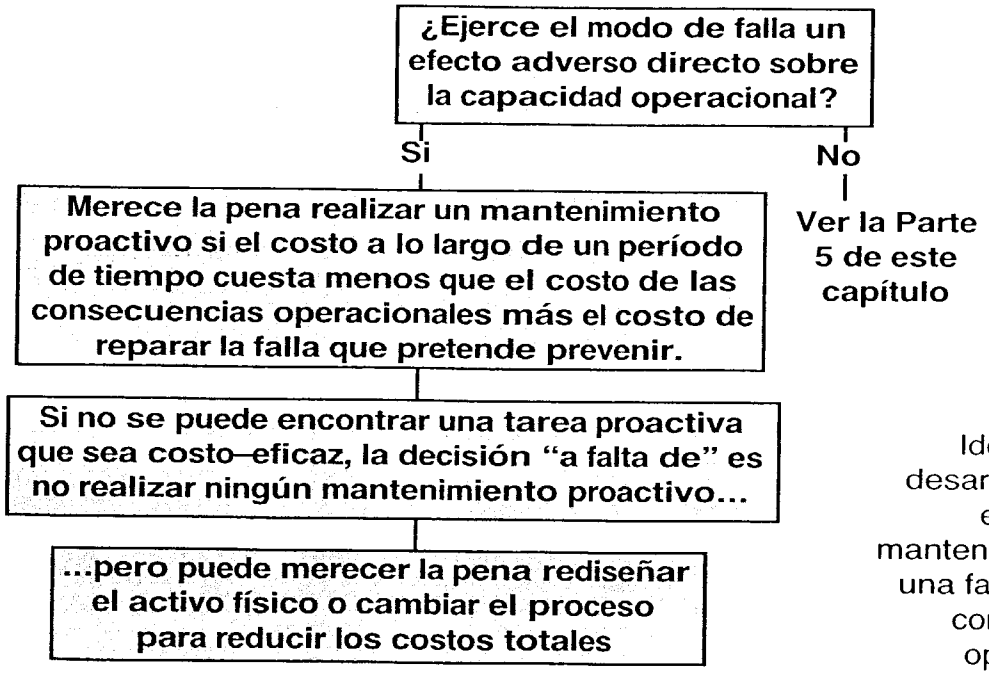


Figura 5.6: Identificando y desarrollando una estrategia de mantenimiento para una falla que tiene consecuencias operacionales

Téngase en cuenta que se realiza este análisis para cada modo de falla individual y no para el activo como un todo. Esto se hace porque cada tarea proactiva se diseña para prevenir un modo de falla específico, con lo que la factibilidad económica de cada tarea sólo puede compararse con los costos del modo de falla que ha de prevenir. En cada caso se trata solamente de una decisión hacer / no hacer.

En la práctica, cuando consideramos modos de falla individuales de este tipo, no siempre es necesario hacer un estudio de costo – beneficio basado en los costos de tiempos muertos actuales y en los TMEFs como se mostró en el ejemplo de la Página 110. Esto es porque, por lo general, es intuitivamente obvia la conveniencia económica de realizar una tarea proactiva cuando se analizan ciertos modos de falla con consecuencias operacionales.

Pero, tanto si analizamos formalmente o intuitivamente las consecuencias económicas, este aspecto del proceso de RCM debe realizarse meticulosamente. (De hecho, este paso es con frecuencia obviado por la gente que es nueva en el proceso. En particular la gente de mantenimiento tiende a implementar tareas considerando nada más si son técnicamente factibles; esto da como resultado elegantes planes de mantenimiento pero excesivamente costosos.)

Finalmente, debe tenerse en cuenta que las consecuencias operacionales de cualquier falla están fuertemente influidas por el contexto en el que opera el activo. Esta es otra de las razones por la cual debe tenerse mucho cuidado en que el contexto operacional sea el mismo antes de aplicar un programa de mantenimiento desarrollado para un activo a otro. Los puntos clave fueron discutidos en la Parte 3 del Capítulo 2.

5.5 Consecuencias No Operacionales

Las consecuencias de una falla evidente que no ejerce un efecto adverso directo para la seguridad, el medio ambiente, o la capacidad operacional, son clasificadas como *no operacionales*. Las únicas consecuencias asociadas con estas fallas son los costos directos de reparación, con lo que estas consecuencias también son *económicas*.

Considere por ejemplo las bombas de la figura 5.7. Dichas bombas están instaladas de manera similar a la de la Figura 5.4, excepto que ahora tenemos dos bombas (ambas idénticas a la bomba de la Figura 5.4).

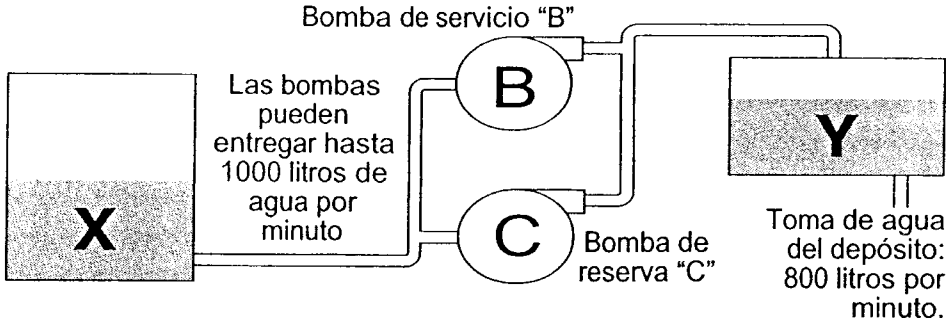


Figura 5.7: Bomba con bomba de reserva

La bomba de servicio se enciende por medio de un interruptor de bajo nivel cuando el nivel de agua del Tanque Y cae a 120 000 litros, y se apaga por medio de otro flotante cuando el nivel alcanza los 240 000 litros. Al mismo tiempo existe un tercer interruptor colocado justo debajo del interruptor de bajo nivel de la bomba de servicio, y está diseñado para que haga sonar una alarma en la sala de control y que encienda la bomba de servicio. Si el tanque se quedara sin agua, el proceso aguas abajo debe detenerse. Esto también le cuesta a la organización que usa la bomba unos U$S 5000 por hora.

Igual que antes, supongamos que el grupo de análisis determinó que un modo de falla que puede afectar a esta bomba es "Los cojinetes se agarrotan debido al desgaste normal". Asumamos que el motor de la bomba de servicio tiene un interruptor de sobrecarga y que otra vez, no tiene una alarma conectada en la sala de control. Este modo de falla y sus efectos podrían describirse en una Hoja de Información RCM como lo muestra la Figura 5.8.

	MODO DE FALLA	EFECTO DE LA FALLA
1	Los cojinetes se agarrotan debido al desgaste normal	El motor se detiene pero no suena la alarma en la sala de control. Baja el nivel del tanque hasta que suena la alarma de bajo nivel a los 120 000 litros y se enciende automáticamente la bomba de reserva. Tiempo para el reemplazo de cojinetes, 4 horas. (el tiempo medio de ocurrencia de esta falla es de aproximadamente 3 años)

Figura 5.8: AMFE para la falla de cojinete de la bomba con una bomba de reserva

En este ejemplo, la bomba de reserva se enciende cuando la bomba de servicio falla, con lo que el tanque no llega a vaciarse. Por lo tanto el único costo asociado a este modo de falla es:

el costo de cambiar los cojinetes

Asumamos que todavía es técnicamente posible monitorear el ruido que hacen los cojinetes una vez por semana. Si se detecta que el cojinete está haciendo un ruido anormal, los operarios pueden encender la bomba de reserva manualmente y reemplazar los cojinetes. Esto nos da 5 horas de tiempo y por lo tanto si hacemos el cambio de cojinetes en 4 horas no interferiremos con la producción.

Asumamos también que la bomba se encuentra en una estación de bombeo sin control humano. También se estuvo de acuerdo en que el monitoreo—que también lleva 20 minutos- debería llevarlo a cabo un mecánico de mantenimiento a un costo de U$S 8 por cada vez que se realiza el monitoreo. Otra vez, tendremos que hacer 150 chequeos por cada falla. Dicho de otra manera, el costo de hacer el monitoreo es:

150 x U$S 8 = U$S 1 200 más el costo de reemplazar los cojinetes.

En este ejemplo, el costo de hacer la tarea es mucho mayor que el de no hacerla. Como resultado de esto, no merece la pena hacer una tarea proactiva *a pesar de que la bomba es técnicamente idéntica a la que describimos en la figura 5.4*. Esto sugiere que solamente merece la pena tratar de prevenir una falla que no tiene consecuencias operacionales, si en un período de tiempo determinado, el costo de la tarea preventiva es menor que el costo de arreglar la falla. Si no, el mantenimiento programado no merece la pena realizarse.

Para modos de falla con consecuencias no operacionales, merece la pena realizar tareas proactivas si, en un período de tiempo, cuesta menos que el costo de reparar las fallas que pretende prevenir.

Si no merece la pena realizar una tarea proactiva, entonces en algunos casos poco comunes podría justificarse una modificación por razones similares que las que se aplican a fallas con consecuencias operacionales.

Puntos Adicionales Relativos a las Consecuencias No operacionales

Es necesario considerar otros dos puntos cuando se analizan fallas con consecuencias no operacionales:

- *Daños secundarios*: Ciertos modos de falla pueden causar si no se los evita o previene, un daño secundario considerable, lo que se suma a sus costos de reparación. Una tarea proactiva puede llegar a prevenir o anticipar la falla y evitar ese riesgo. No obstante, este tipo de tareas sólo se justifican si el costo de realizarlas es menor que el costo de reparar la falla y del daño secundario.

  Por ejemplo, la descripción de los efectos de la falla que se describen en la Figura 5.8 sugiere que el agarrotamiento de los cojinetes no causa ningún daño secundario. Si es así, el análisis es válido. Pero, si la falla no anticipada de los cojinetes también causara (por ejemplo) que se corte el eje, entonces una tarea proactiva que detecte la falla inminente de los cojinetes permitiría a los operadores apagar la bomba antes que se dañe el eje. En este caso el costo de una falla no anticipada de los cojinetes es:

  el costo de reemplazar los cojinetes y el eje.

  Por otro lado, el costo de la tarea proactiva (por cada falla de los cojinetes) sigue siendo:

  U$S 1 200 mas el costo de reemplazar los cojinetes.

  Obviamente, merecerá la pena realizar la tarea si cuesta más de U$S 1 200 reemplazar el eje. Si cuesta menos de U$S 1 200, la tarea sigue sin merecer la pena.

- *Funciones Protegidas*: Sólo podríamos decir que una falla no tiene consecuencias operacionales porque dispone de un dispositivo redundante o de reserva, si es razonable asumir que el dispositivo de protección será funcional cuando la falla ocurra. Esto significa, por supuesto, que un programa de mantenimiento apropiado debe ser aplicado al dispositivo de protección (la bomba de reserva del ejemplo anterior). Este punto lo veremos en profundidad en la próxima parte de este capítulo.

  Si las consecuencias de una falla múltiple de un sistema protegido son particularmente serias, sería conveniente tratar de prevenir la falla de la función protegida al igual que la del dispositivo de protección para reducir la probabilidad de una falla múltiple a un nivel tolerable. (Como se explicó en la Página 101, si la falla múltiple tiene consecuencias para la seguridad, puede ser conveniente evaluar las consecuencias como si no existiese ninguna protección, para luego revalidar la misma como parte del proceso de selección de tareas.)

5.6 Consecuencias de Fallas Ocultas

Fallas Ocultas y Dispositivos de Seguridad

El Capítulo 2 menciona que el aumento del número de formas en las que un equipo puede fallar ha dado lugar a un crecimiento en la variedad y la severidad de las consecuencias de las fallas evidentes. También se mencionó que los dispositivos de protección cada vez son más utilizados para intentar eliminar (o por lo menos reducir) dichas consecuencias, y se explicó que esos dispositivos seguridad funcionan en una de cinco maneras:

- Alertan a los operadores ante condiciones anormales
- Detienen el equipo en caso de falla
- Eliminan o alivian las condiciones anormales que siguen a una falla y que de otra manera podrían causar daños más serios
- Asumen el control de una función que ha fallado
- Previenen que surjan situaciones peligrosas.

La función esencial de estos dispositivos es la de garantizar que las consecuencias de la falla de la función protegida sean mucho menos graves de lo que serían si no hubiera protección. Entonces cualquier dispositivo de seguridad es de hecho parte de un sistema con al menos dos componentes:

- el dispositivo de protección
- la función protegida

Por ejemplo, la Bomba C en la Figura 5.7 podría considerarse como un dispositivo de protección, ya que "protege" la función de bombeo si la Bomba B llega a fallar. La Bomba B es por supuesto, la función protegida.

La existencia de tales sistemas crea dos tipos de posibilidades de falla, dependiendo de si el dispositivo de seguridad tiene seguridad inherente o no. Consideraremos las implicancias de cada tipo en los párrafos siguientes, comenzando por los dispositivos que tienen seguridad inherente.

Dispositivos de protección con seguridad inherente

En este contexto, *seguridad inherente* significa que la falla del dispositivo por sí sola se hará evidente para el grupo de operarios bajo circunstancias normales.

En el contexto de este libro, un dispositivo con seguridad inherente es aquel cuya falla se vuelve evidente por si misma al personal de operación en circunstancias normales

Esto significa que, en un sistema que incluye un dispositivo de seguridad con seguridad inherente, hay tres posibilidades de falle en cualquier período:

La primera posibilidad es que *no falle ninguno de los dispositivos*. En este caso todo se desarrolla normalmente.

La segunda posibilidad es que *la función protegida falle antes que el dispositivo de seguridad*. En este caso el dispositivo de seguridad realiza su función asignada y, dependiendo de la naturaleza de la protección, las consecuencias de falla de la función protegida son reducidas o eliminadas.

La tercera posibilidad es que *el dispositivo de seguridad falle antes que la función protegida*. Esto sería evidente porque de no serlo el dispositivo no contaría con seguridad inherente en el sentido en que se define anteriormente. Si se hacen las cosas en forma correcta, la posibilidad de que el dispositivo protegido falle mientras el dispositivo de seguridad se encuentra averiado puede casi ser eliminada, o bien apagando la función protegida o incorporando una protección alternativa mientras se repara el dispositivo de seguridad fallado.

Por ejemplo, podría pedírsele a un operador que vigile un medidor de presión, y que esté listo para presionar el botón de parada, mientras se está reemplazando un switch de presión.

Esto significa que las consecuencias de la falla de un dispositivo de seguridad con seguridad inherente usualmente entran dentro de las categorías de "operacional" o "no operacional". La secuencia de éstos eventos se resume en la Figura 5.9.

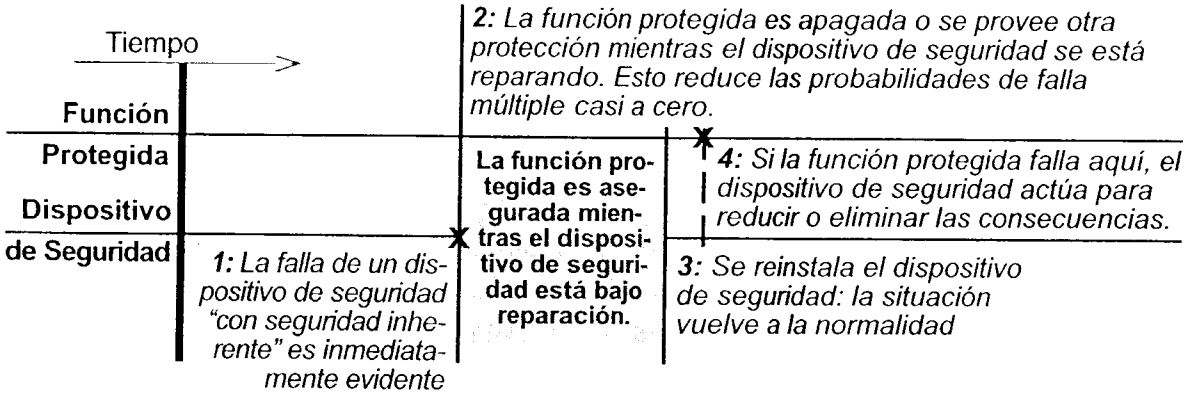


Figura 5.9: Falla de un dispositivo de seguridad "con seguridad inherente"

Dispositivos de seguridad que no cuentan con seguridad inherente

En un sistema que contiene un dispositivo de seguridad que no cuenta con seguridad inherente, el hecho que el dispositivo sea incapaz de cumplir su función *no* es evidente bajo circunstancias normales. Esto crea cuatro posibilidades de falla en cualquier período dado, dos de las cuales son las mismas que se aplican a los dispositivos con seguridad inherente. La primera es cuando *ninguno de los dispositivos falla*, en cuyo caso todo sucede normalmente como antes.

La segunda posibilidad es que *falle la función protegida en un momento en que el dispositivo de seguridad todavía está funcionando*. En este caso el dispositivo de seguridad también lleva a cabo su función, entonces las consecuencias de la falla de la función protegida son nuevamente reducidas o eliminadas completamente.

Por ejemplo, consideremos una válvula de alivio (dispositivo de seguridad) montada en un recipiente presurizado (la función protegida). Si la presión asciende más allá de los límites tolerables, la válvula deja escapar parte del fluido y al hacerlo reduce o elimina las consecuencias de la presión excesiva. De manera similar, si la bomba B en la Figura 5.7 falla, la bomba C toma su función.

La tercera posibilidad es que *falle el dispositivo de seguridad mientras la función protegida sigue funcionando*. En este caso, la falla no tiene consecuencias directas. De hecho nadie sabe que el dispositivo de seguridad se encuentra en estado de falla.

Por ejemplo, si se traba la válvula de alivio, quedando en posición cerrada, nadie sería consciente de este hecho mientras que la presión en el recipiente presurizado permaneciera dentro de los límites operacionales normales. De manera similar, si la bomba C fallase de alguna manera mientras que la bomba B está trabajando, nadie sabría de este hecho a menos que fallara también la bomba B.

La discusión anterior sugiere que las funciones ocultas pueden ser identificadas al preguntarse lo siguiente:

¿Será evidente para los operadores la pérdida de función originada por este modo de falla por sí solo bajo circunstancias normales?

Si la respuesta a esta pregunta es no, entonces se trata de un modo de falla oculto. Si la respuesta es sí, es evidente. Notemos que en este contexto, "por sí solo" significa que nada más ha fallado. Notemos también que asumimos *en este punto del análisis*, que no se está haciendo nada para chequear si la función oculta sigue funcionando. Esto es porque tales chequeos son una forma de mantenimiento programado, y el propósito del análisis es precisamente ver si tal mantenimiento es necesario. Retomaremos estos dos puntos a lo largo de este capítulo.

La cuarta posibilidad durante un ciclo cualquiera es que *el dispositivo de seguridad falle, y luego falle la función protegida* mientras el dispositivo de seguridad está en estado de falla. La situación es conocida como *falla múltiple* (ésta es una posibilidad real simplemente porque la falla del dispositivo de seguridad no es evidente, por eso nadie sabría de la necesidad de tomar una acción correctiva – o alternativa – para evitar la falla múltiple).

Sólo ocurre una falla múltiple si una función protegida falla mientras que el dispositivo de protección se encuentra en estado de falla

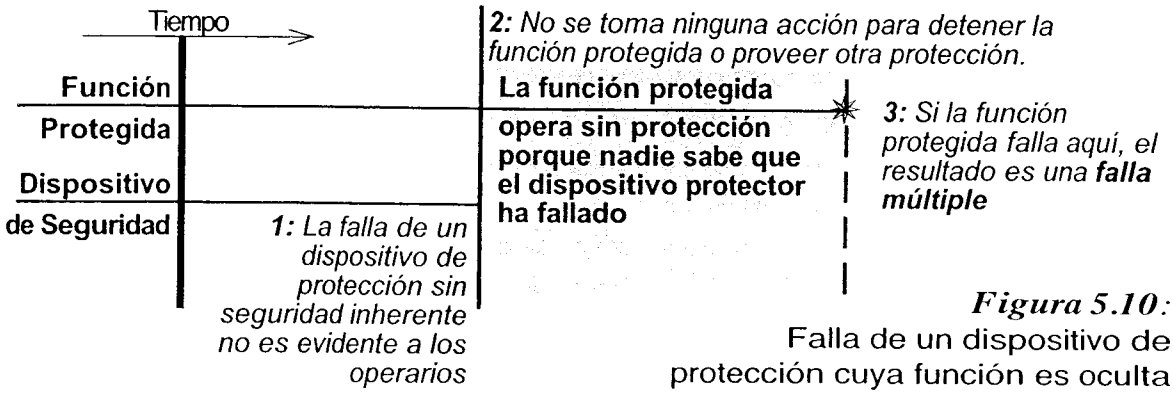


Figura 5.10: Falla de un dispositivo de protección cuya función es oculta

La secuencia de eventos que lleva a una falla múltiple es resumida en la Figura 5.10.

En el caso de la válvula de alivio, si la presión en el recipiente asciende excesivamente mientras la válvula se encuentra atascada, el recipiente probablemente explotará (excepto que alguien actúe con rapidez o que haya otra protección en el sistema). Si la Bomba B falla mientras la Bomba C se encuentra fallada, el resultado será una pérdida total del bombeo.

Dado que la prevención de fallas trata principalmente de evitar las consecuencias de la falla, este ejemplo también sugiere que cuando desarrollamos programas de mantenimiento para funciones ocultas, nuestro objetivo es el de prevenir la falla múltiple asociada, o al menos reducir las probabilidades de que ocurra.

El objetivo de un programa de mantenimiento para una función oculta es prevenir la falla múltiple asociada, o al menos reducir las probabilidades de que ocurra

Cuánto nos esforzamos en tratar de prevenir la falla oculta depende de las consecuencias de la falla múltiple.

Por ejemplo, las Bombas B y C podrían estar bombeando agua de refrigeración a un reactor nuclear. En este caso, si el reactor no puede apagarse suficientemente rápido, la consecuencia final de la falla múltiple podría se una fusión nuclear, con consecuencias catastróficas sobre la seguridad, el medio ambiente y las operaciones.

Por otro lado, las bombas podrían estar bombeando agua hacia un tanque que tiene una capacidad suficiente para abastecer el proceso durante dos horas. En este caso, las consecuencias podrían ser que la producción se detenga después de dos horas si ninguna de las dos bombas pudiera ser reparada antes que el tanque se vacíe. Un análisis posterior podría mostrar que en el peor de los casos, la falla múltiple le podría costar a la organización (por ej.) U$S 2000 en producción perdida.

En el primer ejemplo, las consecuencias de la falla múltiple son realmente serias, con lo que haremos grandes esfuerzos para preservar la integridad de la función oculta. En el segundo caso, las consecuencias de la falla múltiple son puramente económicas, entonces el "cuánto cuesta" influenciaría el "cuánto nos esforzamos" en tratar de prevenir la falla oculta.

Otros ejemplos de fallas ocultas y de las fallas múltiples que podrían traer aparejadas si no se detectan son:

- *Interruptores de vibración*: Un interruptor de vibración diseñado para apagar un gran ventilador podría configurarse de manera tal que su falla fuera oculta. De cualquier forma, esto tiene importancia solamente si la vibración del ventilador aumenta a niveles intolerables (una segunda falla), haciendo que los cojinetes del ventilador y tal vez hasta el mismo ventilador se desintegre (la consecuencia de la falla múltiple)
- *Interruptores de último nivel*: los interruptores de *último* nivel están diseñados para activar una alarma o para apagar un equipo si un interruptor de nivel primario falla. Dicho de otra manera, si se traba el interruptor de último nivel, no habrá ninguna consecuencia a menos que el interruptor de nivel primario también haya fallado (una segunda falla), con lo que el recipiente o el tanque terminará por vaciarse (la consecuencia de la falla múltiple).
- *Mangueras de incendio*: la falla de una manguera de incendio no tiene consecuencias directas. Tiene importancia solamente en caso de incendio (una segunda falla), cuando se trata de usar la manguera fallada, lo que podría resultar en pérdida de vidas (la consecuencia de la falla múltiple).

Otros casos típicos de funciones ocultas incluyen equipamientos médicos de emergencia, la mayoría de los tipos de detectores de incendios, alarmas de incendio y equipos para combatir el fuego, cables y botones de parada de emergencia, estructuras de contención secundarias, interruptores de presión y temperatura, dispositivos de protección por sobrecargas o sobrevelocidades, plantas de reserva, componentes estructurales redundantes, interruptores de circuitos por sobretensión y fusibles, y sistemas de energía de emergencia (grupos electrógenos).

La Disponibilidad que Requieren las Funciones Ocultas

Hasta aquí, esta parte del Capítulo ha definido fallas ocultas y descripto la relación entre dispositivos de seguridad y funciones ocultas. La siguiente pregunta nos lleva a analizar con más detalle el funcionamiento que requerimos de las funciones ocultas.

Una de las conclusiones más importantes a la que se llegó hasta el momento, es que la única consecuencia directa de una falla oculta es un incremento en la exposición al riesgo de una falla múltiple. Y ya que es esta última la que más deseamos evitar, un elemento clave del desempeño requerido de una función oculta debe estar vinculado con la falla múltiple asociada.

Hemos visto que cuando un sistema está protegido por un dispositivo sin seguridad inherente, sólo ocurre una falla múltiple si el dispositivo protegido falla mientras el dispositivo de seguridad se encuentra fallado, como lo ilustra la Figura 5.10.

Entonces la *probabilidad* de una falla múltiple en cualquier período debe estar dada por la probabilidad de que la función protegida falle cuando el dispositivo de seguridad se encuentra fallado durante el mismo período. La Figura 5.11 muestra que esto puede calcularse de la siguiente manera:

Probabilidad de una falla múltiple = Probabilidad de una falla de la función protegida x Promedio de no-disponibilidad del dispositivo de protección

La probabilidad tolerable de la falla múltiple es determinada por los usuarios del sistema, como se trata en la siguiente parte de este capítulo y en el Apéndice 3. Generalmente la probabilidad de falla de la función protegida es un dato conocido. Por lo tanto si se conocen éstas dos variables, la no-disponibilidad permitida puede ser expresada de la siguiente manera:

$$\text{No-disponibilidad permitida del dispositivo de protección} = \frac{\text{Probabilidad de una falla múltiple}}{\text{Probabilidad de falla de la función protegida}}$$

Entonces un elemento crucial del funcionamiento requerido de cualquier función oculta es la disponibilidad requerida para reducir la probabilidad de la falla múltiple asociada a un nivel tolerable. La discusión anterior sugiere que esta disponibilidad está determinada en las tres etapas siguientes:

- primero establecer qué probabilidad de falla múltiple la organización está preparada a tolerar.
- luego determinar la probabilidad de que falle la función protegida en el período en cuestión (esto también se conoce como índice de demanda)
- finalmente, determinar qué disponibilidad debe lograr la función oculta para reducir la probabilidad de la falla múltiple al nivel requerido.

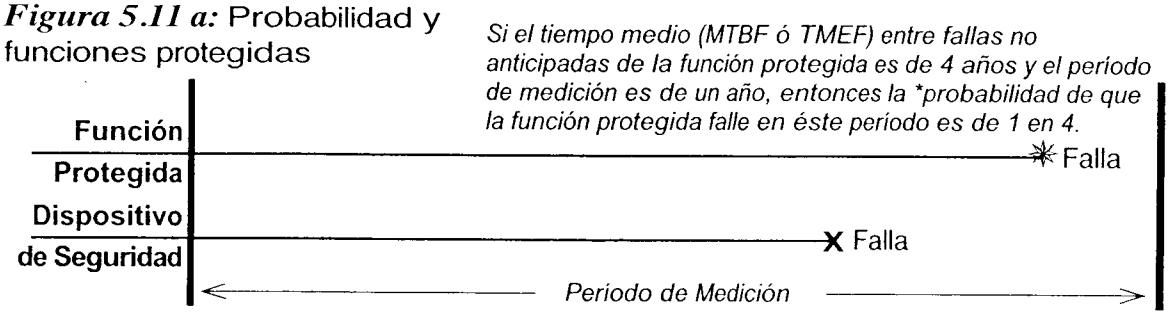
Cuando calculemos el riesgo asociado con el sistema protegido, existe la tendencia a considerar la probabilidad de falla del dispositivo protegido y del dispositivo de protección en conjunto. Esto lleva a creer que la única manera de variar la probabilidad de falla múltiple es cambiando el "hardware" (es decir, cambiando el sistema), tal vez agregando más dispositivos de protección o cambiando los componentes existentes con otros que se crea que son más confiables.

En realidad, esto no es correcto, ya que *por lo general es posible variar tanto la probabilidad de falla de la función protegida como (especialmente) la indisponibilidad del dispositivo de protección,* adoptando políticas de mantenimiento y operación adecuadas. Por lo tanto, *por lo general también es posible reducir la probabilidad de falla múltiple a prácticamente cualquier nivel de falla múltiple que se requiera dentro de lo razonable* adoptando este tipo de políticas. (por supuesto que cero es un ideal imposible de alcanzar).

Figura 5.11:
CÁLCULO DE LA PROBABILIDAD * DE UNA FALLA MÚLTIPLE

La probabilidad * que falle una función protegida en cualquier período es la inversa de su tiempo medio entre fallas, como lo ilustra la Figura 5.11a:

Figura 5.11 a: Probabilidad y funciones protegidas



La probabilidad que el dispositivo de protección esté fallado en un momento cualquiera está dada por el porcentaje de tiempo que está en estado de falla. Esto por supuesto es medido por su no-disponibilidad (también conocido como tiempo de parada de máquina o tiempo muerto fraccional), como lo muestra la Figura 5.11 b abajo:

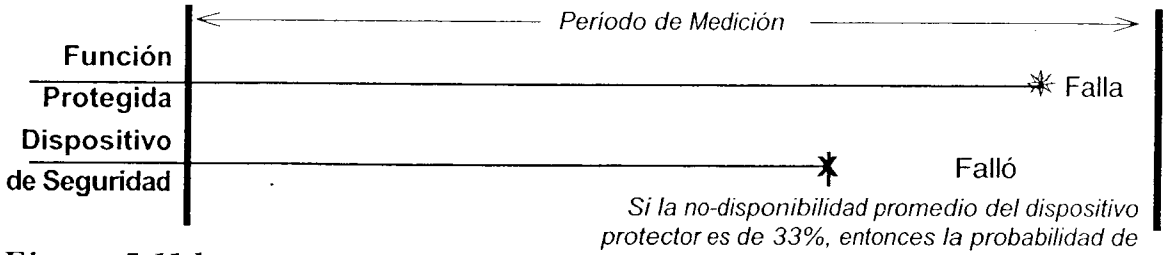


Figura 5.11 b:
Probabilidad y dispositivos de seguridad

La probabilidad de la falla múltiple es calculada multiplicando la probabilidad de falla de la función protegida por la no-disponibilidad promedio del dispositivo protector. Para el caso descripto en las Figuras 5.11(a) y (b) anteriores, la probabilidad de una falla múltiple sería como lo indica la Figura 5.11(c):

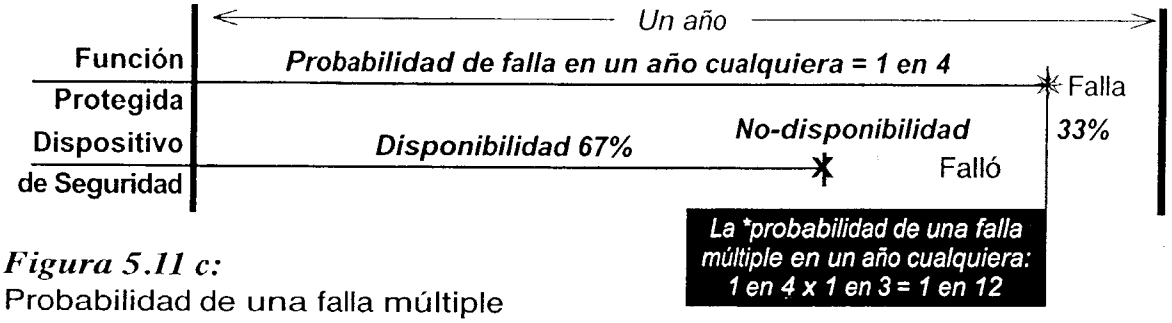


Figura 5.11 c:
Probabilidad de una falla múltiple

* Ver nota en la página 100

Por ejemplo, las consecuencias que tiene que las dos bombas de la Figura 5.7 estén en estado de falla podrían ser tales que sus usuarios están preparados a tolerar una probabilidad de falla múltiple de menos de 1 en 1 000 en cualquier año (10^{-3}). Supongamos también que si la bomba de servicio está mantenida adecuadamente, el tiempo medio entre fallas no anticipadas puede llevarse a diez años, lo que corresponde a una probabilidad de falla durante un año cualquiera de una en diez, o 10^{-1}.

Con lo que para reducir la probabilidad de falla múltiple a menos de 10^{-3}, la no-disponibilidad de la bomba de reserva no puede dejarse que sea mayor que 10^{-2}, ó 1%. Dicho de otra manera, debe mantenerse de manera tal que su disponibilidad sea del 99%. Esto se muestra en la Figura 5.12.

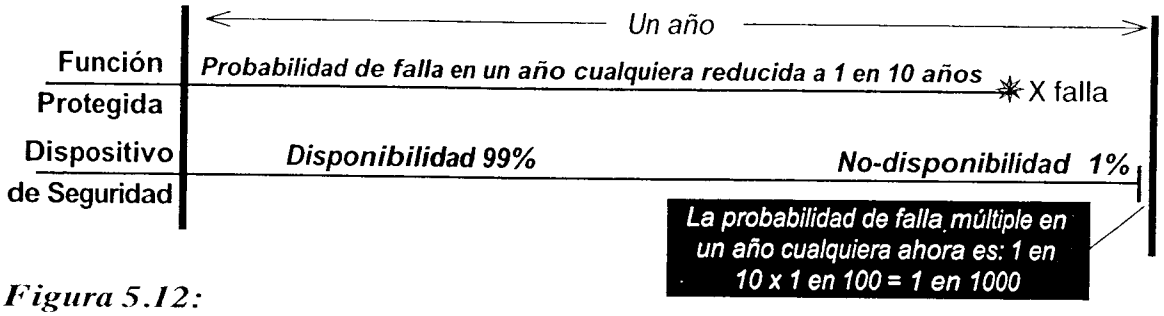


Figura 5.12:
Disponibilidad deseada de un dispositivo de protección

En la práctica, la probabilidad que se considera tolerable para cualquier falla múltiple depende de sus consecuencias. En la gran mayoría de los casos *la evaluación debe ser realizada por los usuarios del activo físico*. Estas consecuencias varían enormemente de un sistema a otro, por lo que lo que se estima tolerable varía con la misma amplitud. Para ilustrar este punto, la Figura 5.13 sugiere cuatro evaluaciones posibles para cuatro sistemas diferentes:

FALLA DE LA FUNCIÓN PROTEGIDA	ESTADO DE FALLA DEL DISPOSITIVO DE PROTECCIÓN	FALLA MÚLTIPLE	FRECUENCIA TOLERABLE DE FALLA MÚLTIPLE
Error de ortografía en un memo o e-mail interno entre oficinas	El corrector de ortografía de un programa de procesador de textos, incapaz de detectar errores	Error de ortografía no detectado	¿10 por mes?
El motor de 10 KW de la bomba B sobrecargado	Disyuntor atascado en posición cerrada	El motor se quema: 800 dólares para rebobinar	¿1 en 50 años?
Falla la bomba de servicio B	Bomba de reserva C fallada	Pérdida total de la capacidad de bombeo: 18 000 dólares de producción perdida	¿1 en 1 000 años?
Exceso de presión en la caldera	Válvulas de alivio atascadas en posición cerrada	Explota la caldera: mueren 10 personas	¿1 en 10 000 000 años?

Figura 5.13: Frecuencia de fallas múltiples

Como mencionamos anteriormente, estos niveles de tolerabilidad no pretenden ser taxativos y no necesariamente reflejan el punto de vista del autor. Pretenden demostrar que en cualquier sistema protegido, *alguien* debe decidir qué es tolerable antes que sea posible decidir el nivel de protección necesaria, y que ésta evaluación será diferente para sistemas diferentes.

En la Parte 3 de este capítulo se dijo que si una falla múltiple pudiera afectar la seguridad, ese "alguien" debe ser un grupo que incluya representantes de las posibles víctimas junto con la gerencia. Esto también es válido para fallas múltiples que tienen consecuencias económicas.

Por ejemplo, en el caso del error de ortografía, la "posible víctima" es quien escribe la carta. En la mayoría de las organizaciones, las consecuencias de esto no suelen ser muy embarazosas (si es que alguien detecta el error). En el caso del motor eléctrico, la persona que seguramente más lo tiene en cuenta (dicho de otra manera, la "posible víctima") será la persona responsable por el presupuesto de mantenimiento, o bien, el propio gerente de mantenimiento. En el caso de pérdida de bombeo, la cantidad de dinero es tal que para decidir el nivel tolerable, deben participar los gerentes de los niveles jerárquicos más altos.

La Figura 5.13 también sugiere que las probabilidades que una organización estaría dispuesta a tolerar de fallas con consecuencias operacionales tienden a ser menores a medida que las consecuencias son más importantes.
Esto sugiere además que podría diseñarse para cualquier organización una lista de riesgos económicos tolerables "estándar" para ayudar a desarrollar programas de mantenimiento diseñados para brindar dichos niveles de riesgo. Esto podría tener una forma como la que se muestra en la Figura 5.14.

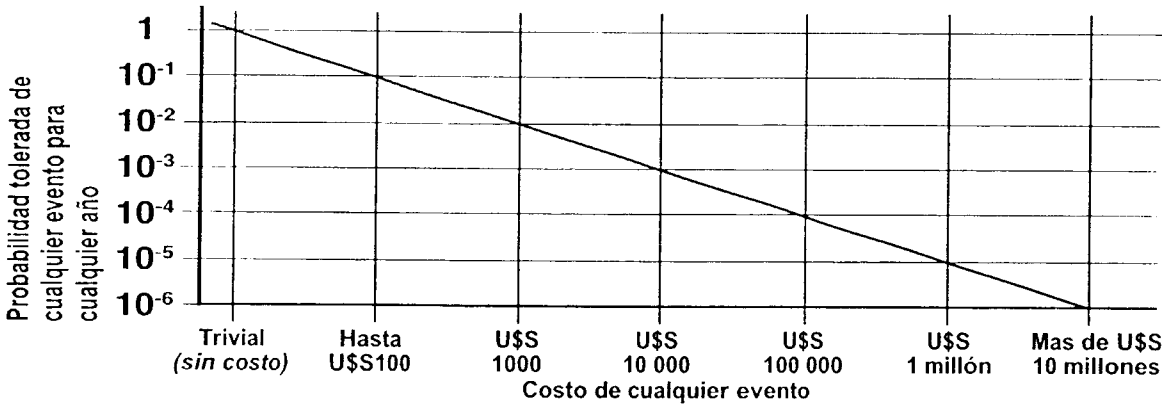


Figura 5.14: Tolerabilidad de riesgo económico

Una vez más, téngase en cuenta que estos niveles de tolerabilidad no pretenden ser prescriptivos y no son ninguna clase de estándar universal propuesto. Los riesgos económicos que cada organización está dispuesta a tolerar es cuestión de cada empresa.

Las Figuras 5.2 y 5.14 sugieren que sería posible determinar un programa de riesgo que combine en un solo gráfico los riesgos con consecuencias para la seguridad y los económicos. En el Apéndice 3 se discute cómo podría hacerse.

En algunos casos, podría no ser necesario, de hecho a veces es imposible, realizar un análisis cuantitativo riguroso de la probabilidad de falla múltiple tal cual como se describió anteriormente. En estos casos, podría ser suficiente hacer una buena estimación de la disponibilidad requerida del dispositivo de protección sobre la base cualitativa de asignación de confiabilidad de la función protegida y de las posibles consecuencias de una falla múltiple. Este enfoque se vuelve a discutir en el Capítulo 8. De cualquier manera si la falla múltiple es realmente muy seria, debe hacerse un análisis riguroso.

Los párrafos siguientes consideran con más detalle cómo es posible influir sobre:

- la tasa con la que fallan las funciones protegidas
- la disponibilidad de los dispositivos de protección

Mantenimiento de Rutina y Funciones Ocultas

En un sistema que incorpora un dispositivo de seguridad sin seguridad inherente, la probabilidad de una falla múltiple puede ser reducida de la siguiente manera:

- reduciendo la frecuencia de falla de la función *protegida*
  - * haciendo algún tipo de mantenimiento proactivo
  - * cambiando la manera en que se opera la función protegida
  - * cambiando el diseño de la función protegida
- incrementando la disponibilidad del dispositivo de protección
  - * haciendo algún tipo de mantenimiento proactivo
  - * verificando periódicamente si el dispositivo de protección ha fallado
  - * modificando el dispositivo de protección

Prevenir la falla de la función protegida

Hemos visto que la probabilidad de una falla múltiple está en parte basada en la frecuencia de falla de la función protegida. Esta podría, casi con certeza, ser reducida mejorando el mantenimiento o la operación del dispositivo protegido o, como último recurso, cambiando el diseño.

Puntualmente, si las fallas de la función protegida pueden ser anticipadas o prevenidas, aumentaría el tiempo medio entre fallas (no anticipadas) de esta función. Esto a su vez reduciría la probabilidad de la falla múltiple.

Por ejemplo, una manera de prevenir la falla simultánea de las Bombas B y C es tratando de prevenir la falla no anticipada de la Bomba B. Si reducimos el número de estas fallas, el tiempo medio entre fallas de la Bomba B aumentaría, con lo que la probabilidad de falla múltiple sería menor, como lo muestra la Figura 5.12.

De cualquier manera, debemos recordar que la razón por la cual se instaló el dispositivo de seguridad es porque la función protegida es vulnerable a fallas no anticipadas con consecuencias serias.

Segundo, si no se toma ninguna medida para evitar la falla del dispositivo de protección, será inevitable que tarde o temprano falle y deje de brindar protección. *Si pasa esto, la probabilidad de falla múltiple es igual a la probabilidad que tiene de fallar la función protegida por si misma.*

O esta situación es intolerable, o para empezar no deberíamos haber instalado el dispositivo de protección. Esto indica que debemos por lo menos tratar de encontrar una manera práctica de evitar que fallen los dispositivos de seguridad que no tienen seguridad inherente.

Prevenir la falla oculta

Para prevenir una falla múltiple, debemos tratar de asegurar que la función oculta no se encuentre en estado de falla cuando falla la función protegida. Si pudiera encontrarse una tarea proactiva que fuera lo suficientemente buena como para asegurar un 100% de disponibilidad del dispositivo protector, entonces la falla múltiple sería teóricamente imposible.

Por ejemplo, si pudiera encontrase una tarea proactiva que asegure que la Bomba C tenga una disponibilidad del 100% cuando se usa como bomba de reserva, estaríamos seguros que C siempre podría remplazar a B cuando esta falle.

(En este caso la falla múltiple sólo sería posible si los usuarios operan la Bomba C mientras la B está siendo reparada o cambiada. De cualquier manera, todavía el riesgo de falla múltiple sigue siendo bajo, ya que la B podría repararse rápidamente y por ende el tiempo en el que la organización está en una situación riesgosa es poco. Si la organización está o no preparada para asumir el riesgo de hacer funcionar la Bomba C mientras que la B está apagada depende de las consecuencias de la falla múltiple y de si es posible agregar otras formas de protección, como hemos discutido anteriormente.)

En la práctica, es poco probable que cualquier tarea proactiva pudiera lograr que cualquier función alcanzara una disponibilidad de 100% indefinidamente. Lo que debe hacer, sin embargo, es dar la disponibilidad necesaria para reducir la probabilidad de una falla múltiple a un nivel tolerable.

Por ejemplo, asumamos que encontramos una tarea proactiva que haga que la Bomba C tenga un 99% de disponibilidad. Si el tiempo medio entre fallas no anticipadas de la Bomba B es de 10 años, la probabilidad de la falla múltiple será de 10^{-3} (1 en 1000) para cualquier año, como hemos discutido antes.

Si la disponibilidad de la bomba C pudiera llevarse a 99,9% entonces la probabilidad de la falla múltiple podría reducirse a 10^{-4} (1 en 10 000), y así siguiendo.

Entonces para fallas ocultas, merece la pena realizar una tarea proactiva si asegura la disponibilidad necesaria para reducir la probabilidad de una falla múltiple a un nivel tolerable.

Para fallas ocultas, merece la pena realizar una tarea proactiva si asegura la disponibilidad necesaria para reducir la probabilidad de una falla múltiple a un nivel tolerable.

En los Capítulos 6 y 7 se discute las distintas formas de prevenir las fallas. No obstante, esos capítulos también explican que muchas veces es imposible encontrar una tarea proactiva que asegure la disponibilidad requerida. Esto se aplica especialmente a aquellos equipos que sufren de fallas ocultas. Con lo que si no podemos encontrar una manera de *prevenir* una falla oculta, debemos encontrar alguna otra forma de mejorar la disponibilidad de la función oculta.

Detectar la falla oculta

Si no podemos encontrar una manera adecuada de *prevenir* una falla oculta, todavía es posible reducir el riesgo de una falla múltiple revisando la función oculta periódicamente para saber si sigue funcionando. Si esta revisión (llamada tarea de "búsqueda de falla") es llevada a cabo a intervalos adecuados y si la función es restaurada en cuanto se descubre que está defectuosa, todavía es posible asegurar altos niveles de disponibilidad. La tarea de búsqueda de falla programada se discutirá en profundidad en el Capítulo 8.

Modificar los equipos

En muy pocos casos es imposible encontrar alguna clase de tarea de rutina que asegure el nivel de disponibilidad deseado, o es poco práctico hacer la tarea con la frecuencia requerida. Sin embargo, todavía tenemos que hacer algo para reducir el riesgo de la falla múltiple a un nivel tolerable. Por eso, en estos casos es generalmente necesario reconsiderar el diseño.

Si la falla múltiple pudiera afectar la seguridad o el medio ambiente, el rediseño es obligatorio. Si la falla múltiple sólo tiene consecuencias económicas, la necesidad de rediseñar es evaluada en términos económicos.

Las formas en que se puede usar el rediseño para reducir el riesgo o para cambiar las consecuencias de una falla múltiple se discuten en el Capítulo 9.

Funciones Ocultas: El Proceso de Decisión

La Figura 5.15 resume todo lo que hemos dicho acerca del desarrollo de una estrategia de mantenimiento para funciones ocultas:

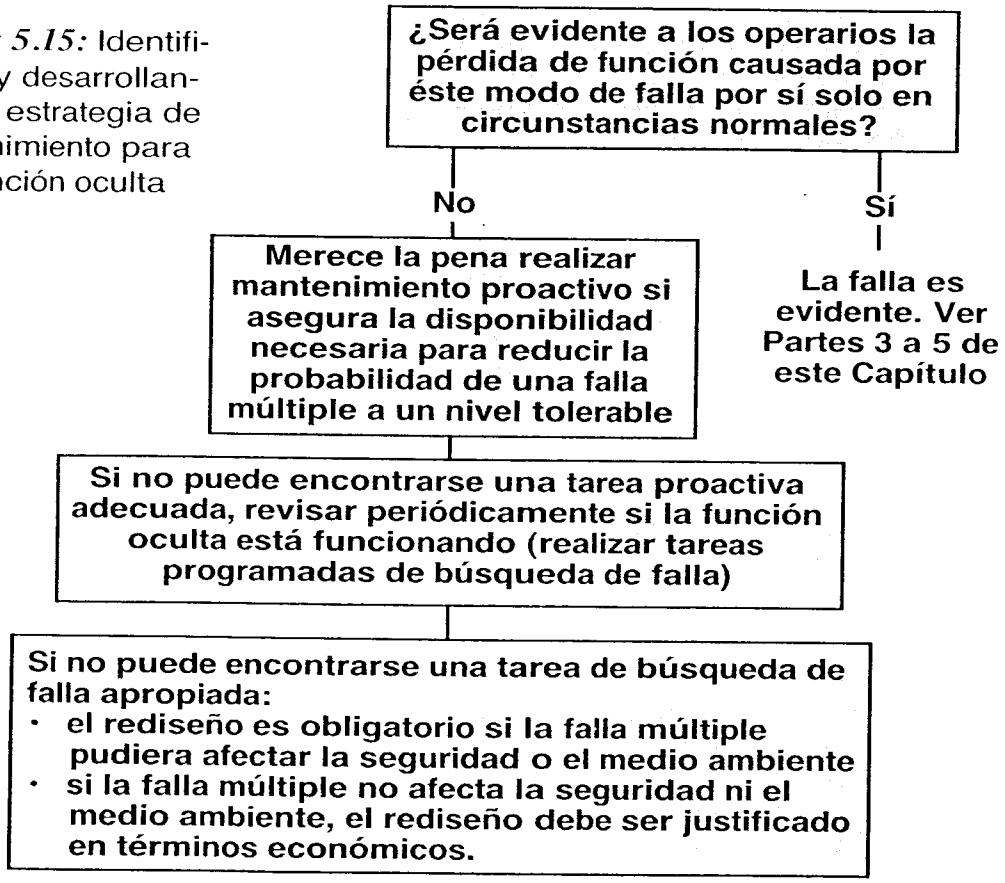


Figura 5.15: Identificando y desarrollando una estrategia de mantenimiento para una función oculta

Puntos Suplementarios respecto de las Funciones Ocultas

Deben tenerse en cuenta seis temas cuando se contesta la primer pregunta de la Figura 5.15:

- La distinción entre fallas funcionales y modos de falla
- El tiempo
- Las funciones primarias y secundarias de los dispositivos de protección
- Qué se entiende exactamente por "operarios"
- Qué son "circunstancias normales"
- Dispositivos con "seguridad inherente"

En los próximos párrafos se discute cada uno de estos temas con mayor detalle.

Falla funcional y modo de falla

En esta etapa del proceso RCM, ya se registró en la Hoja de Información RCM cada modo de falla que es razonablemente probable que cause cada falla funcional. Esto implica básicamente dos cosas:

- Primero, no estamos preguntando qué fallas pueden ocurrir. Estamos tratando de establecer si cada modo de falla que hemos identificado es oculto o evidente.
- Segundo, no estamos preguntando si los operarios pueden diagnosticar el modo de falla. Lo que preguntamos es si la pérdida de la función causada por el modo de falla será evidente en circunstancias normales. (Para decirlo de otra manera, preguntamos si el modo de falla tiene algún efecto o síntoma que bajo circunstancias normales, permitirá creer al observador que el ítem no puede seguir cumpliendo con su función, o al menos que ha ocurrido algo que no es normal.)

Por ejemplo, consideremos el motor de un auto al que se le tapa la manguera de combustible. La mayoría de los conductores (o sea, los operadores) no serán capaces de diagnosticar este modo de falla sin la ayuda de un experto, con lo que podríamos estar tentados a decir que es una falla oculta. Sin embargo, la pérdida de la función causada por este modo de falla es evidente, ya que el auto se detiene.

El tiempo

Existe muchas veces la tentación de decir que una falla es "oculta" si pasa un período de tiempo considerable desde el momento en que ocurre la falla al momento en que se la descubre. De hecho, este no es así. Si la pérdida de función tarde o temprano se vuelve aparente para los operadores por sí misma como resultado directo e inevitable de la falla, la falla es evidente, sin importar el tiempo que pase entre la falla en cuestión y el momento en que se la descubre.

Por ejemplo, si el tanque que alimenta la Bomba A de la Figura 5.4 tarda varias semanas en vaciarse, la falla de la bomba no se hace aparente en el mismo momento en que ocurre. Esto puede llevarnos a decir que esta falla es oculta. Esto no es así ya que el tanque se vacía como consecuencia directa e inevitable de la falla de la Bomba A por sí misma. Con lo que la falla de la Bomba A inevitablemente será evidente para los operarios.

En cambio, la falla de la Bomba C de la Figura 5.7 sólo se pondrá en evidencia si también falla la Bomba B (excepto que alguien revise la Bomba C de vez en cuando.) Si la Bomba B fuera mantenida y operada de manera tal que nunca fuera necesario prender la Bomba C, es posible que la falla de la Bomba C 'por si misma' nunca fuera descubierta.

Este ejemplo muestra que el tiempo no debe tenerse en cuenta para considerar si una falla es o no oculta. Simplemente preguntamos si alguien tarde o temprano se va a dar cuenta que ha ocurrido la falla *por sí misma* y no si alguien se va a dar cuenta de la falla *en el mismo momento* en que ocurre.

Funciones primarias y secundarias

Hasta ahora nos enfocamos sólo en las función primaria de los dispositivos de protección, que será la de ser capaz de cumplir con la función para la cual han sido diseñados en el momento que se los necesita. Como vimos, esto es por lo general después de que falle la función protegida. No obstante, una función secundaria importante que tienen todos estos dispositivos es la de no activarse cuando nada esté mal (no exista falla del protegido).

Por ejemplo, la función primaria de un sensor de presión puede enunciarse como:

- Ser capaz de transmitir una señal cuando la presión cae debajo de los 250psi.

Con lo que una función secundaria implícita será:

- No transmitir una señal cuando la presión es mayor a 250psi.

La falla de la función primaria es oculta, mientras que la falla de la función secundaria es evidente ya que si ocurre, el sensor transmitirá una señal de interrupción falsa y la máquina se detendrá. Si es probable que suceda esto en la práctica, debe listarse como un modo de falla de la función que se detiene (usualmente la función primaria de la máquina). Como consecuencia de esto, por lo general no se necesita listar la *función* secundaria implícita por separado, pero el modo de falla debería listarse para la función pertinente si es probable que ocurra.

Los operarios

Cuando nos preguntamos si la falla es evidente, el término *operarios* se refiere a cualquier persona que tenga la oportunidad de observar el equipo o lo que está haciendo en algún momento durante el curso de sus actividades normales diarias, y que pueda confiarse en que reportará la falla.

Las fallas pueden ser observadas por gente con puntos de vista muy diferentes. Operadores, conductores, inspectores de calidad, especialistas, supervisores y hasta inquilinos de edificios. Sin embargo, si cualquiera de estas personas puede detectar y reportar una falla depende de cuatro elementos críticos:

- El observador debe estar en una posición en la que pueda detectar el modo de falla mismo o la pérdida de función causada por el modo de falla. Podría ser una posición física, o el acceso a un equipo o a determinada información (incluyendo información gerencial) que le llame la atención hacia el hecho de que algo anda mal.

- El observador debe ser capaz de reconocer la condición como una falla.
- El observador debe entender que es parte de su trabajo el reportar fallas.
- El observador debe tener acceso a un procedimiento de reporte de fallas.

Circunstancias Normales

Un análisis detallado por lo general revela que ciertas tareas que hacen los operadores son en realidad actividades de mantenimiento. Cuando se consideran estas tareas es conveniente empezar de cero, ya que podría resultar que las tareas o sus frecuencias deban ser modificadas completamente. Dicho de otra manera, cuando preguntamos si la falla será evidente para los operarios en circunstancias "normales", la palabra "normal" significa lo siguiente:

- Que no se está haciendo nada para *prevenir* la falla. Si una tarea proactiva está logrando prevenir la falla, podría decirse que la falla es "oculta" porque no ocurre. No obstante, en el Capítulo 4 se dijo que los modos de falla y sus efectos deben listarse y se debe aplicar el resto del proceso RCM como si no se estuviera haciendo ninguna tarea proactiva, ya que uno de los propósitos fundamentales del análisis es primero rever si se necesita hacer cualquiera de estas tareas.
- Que no se está haciendo ninguna tarea específica para *detectar* la falla. Un número sorprendente de tareas que forman partes de las tareas normales del operador son en realidad rutinas diseñadas para controlar si las funciones ocultas siguen funcionando.

  Por ejemplo, el apretar todos los días un botón de un panel de control para controlar si todas las luces de alarma del panel funcionan, es de hecho una tarea de búsqueda de fallas.

  Más tarde veremos que el proceso de selección de tareas de RCM cubre las tareas de búsqueda de fallas, con lo que también debemos asumir en esta etapa del análisis que este tipo de tareas tampoco se están haciendo (a pesar que la tarea realmente sea una parte genuina de las tareas de rutina del operador). Esto es porque el proceso RCM puede revelar una tarea más efectiva, o que es necesario hacer la misma tarea con mayor o menor frecuencia.

(Más allá de la cuestión de las tareas de mantenimiento, por lo general existen muchas dudas sobre cuáles son las tareas "normales" del operador. Esto pasa más que nada donde los procedimientos de operación estándar están mal documentados o directamente no existen. En estos casos, el proceso de análisis RCM ayuda mucho a clarificar cuáles debieran ser estas tareas, y puede hacer mucho para ayudar a establecer las fundaciones de un conjunto completo de procesos operativos. Esto se aplica especialmente a plantas de alta tecnología.)

Dispositivos con seguridad inherente

Muchas veces se dice que un circuito de protección tiene seguridad inherente cuando en realidad no la tiene. Esto generalmente ocurre cuando se considera sólo una parte del circuito en vez de todo el circuito.

Un ejemplo nuevamente puede ser un sensor de presión, esta vez montado sobre un cojinete hidrostático. El sensor fue diseñado para apagar la máquina si la presión de aceite en el cojinete cae por debajo de cierto nivel. Surgió durante una discusión que si la señal eléctrica que va desde el sensor hasta el panel de control se interrumpiera, la máquina se apagaría, con lo que en principio se determinó que la falla del sensor era evidente.

Sin embargo, discusiones posteriores revelaron que un diafragma dentro del sensor podría deteriorarse con el paso del tiempo, con lo que el sensor podría dejar de detectar cambios de presión. Esta falla era oculta, y el programa de mantenimiento del sensor se desarrolló considerando esto.

Para evitar este problema, cuando se hace el análisis de cualquier circuito de control, debe tenerse cuidado de incluir los sensores y los actuadores, al igual que los circuitos eléctricos mismos.

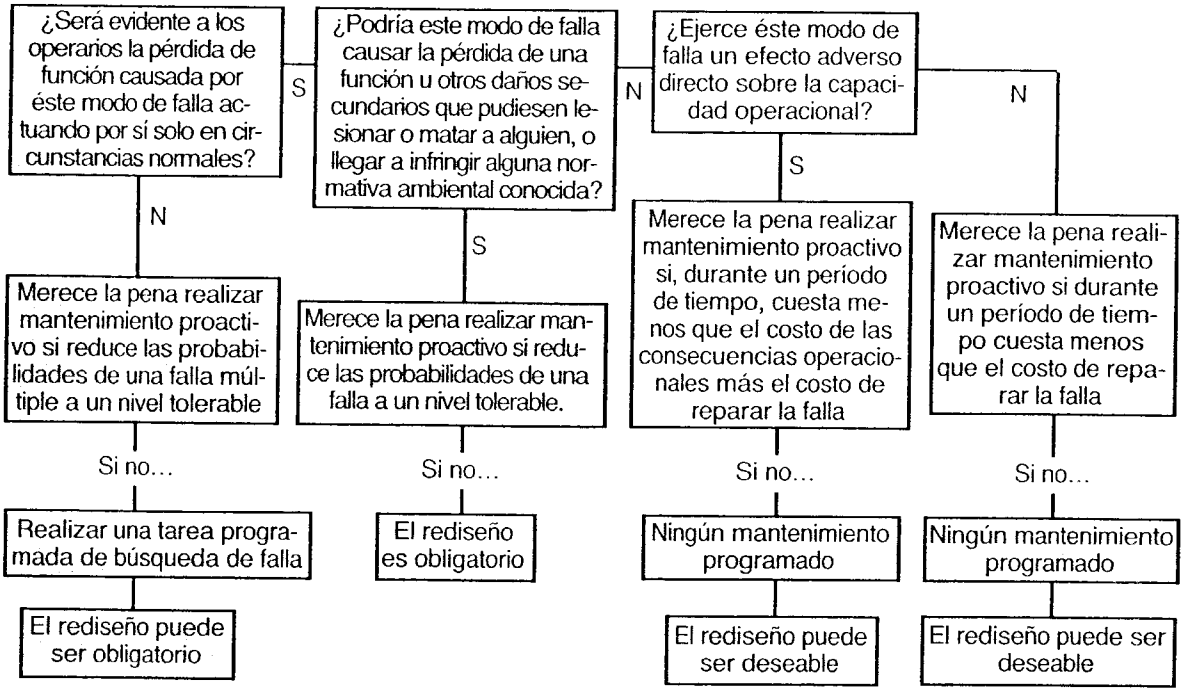


Figura 5.16: La evaluación de las consecuencias de falla

5.7 Conclusión

Este Capítulo ha demostrado cómo el proceso de RCM provee un marco estratégico de trabajo completo para manejar las fallas. Como lo resume la Figura 5.16, este marco de trabajo:

- clasifica todas las fallas basándose en sus consecuencias. Al hacerlo así, separa las fallas ocultas de las fallas evidentes, y luego ordena las consecuencias de las fallas evidentes en un orden de importancia decreciente
- provee una base para decidir caso por caso, si merece la pena realizar mantenimiento proactivo
- sugiere qué acción debe tomarse si no puede encontrarse una tarea proactiva adecuada.

Los diferentes tipos de tareas proactivas y "acciones a falta de", son abordados en los próximos cuatro Capítulos, junto con un enfoque integrado de la evaluación de consecuencias y selección de tareas.

6 Mantenimiento Proactivo 1: Tareas Preventivas

6.1 Factibilidad Técnica y Tareas Preventivas

Como mencionamos en el Capítulo 1, las acciones que pueden tomarse para manejar las fallas pueden dividirse en las siguientes dos categorías:

- *Tareas proactivas*: estas tareas se llevan a cabo antes que ocurra una falla, con el objetivo de prevenir que el componente llegue a un estado de falla. Abarcan lo que comúnmente se denomina mantenimiento "predictivo" y "preventivo", aunque RCM utiliza los términos *reacondicionamiento cíclico, sustitución cíclica, y mantenimiento a condición.*
- *Acciones a falta de:* estas tratan con el estado de falla, y son elegidas cuando no es posible identificar una tarea proactiva efectiva. Las acciones a falta de incluyen *búsqueda de falla, rediseño, y mantenimiento a rotura.*

Estas dos categorías corresponden a la sexta y séptima pregunta del proceso de decisión básico de RCM:

- ***¿Qué puede hacerse para predecir o prevenir cada falla?***
- ***¿Qué sucede si no puede encontrarse una tarea predictiva o preventiva apropiada?***

Los Capítulos 6 y 7 se ocupan de la sexta pregunta. Esta estudia el criterio utilizado para decidir si las tareas proactivas son *técnicamente factibles*. También describen en mayor detalle cómo decidimos si merece la pena realizar ciertas categorías de tareas. (Los Capítulos 8 y 9 profundizan sobre las acciones "a falta de".)

En los capítulos anteriores se explicó que valía la pena realizar una tarea proactiva si esta lograba reducir las consecuencias de la falla lo suficiente como para justificar los costos directos e indirectos de hacer la tarea. También se dijo que antes de considerar si merece la pena realizar una tarea, debemos por supuesto determinar si es técnicamente factible realizarla. La factibilidad técnica de una tarea se define como:

Una tarea es técnicamente factible si físicamente permite reducir o realizar una acción que reduzca las consecuencias del modo de falla asociado, a un nivel que sea aceptable al dueño o usuario del activo.

Desde el punto de vista técnico, existen dos temas a tener en cuenta para la selección de tareas proactivas. Estos son:

- la relación entre la edad del componente que se está considerando y la probabilidad de que falle
- qué sucede una vez que ha comenzado a ocurrir la falla

Durante este capítulo consideraremos las tareas que se aplican cuando existe una relación entre la edad (o exposición al esfuerzo) y la falla. El Capítulo 7 considera los casos más difíciles en los cuales no existe tal relación.

6.2 Edad y Deterioro

Todo activo físico que cumple una función, está en contacto con el mundo real, esto lo lleva a estar sujeto a una variedad de esfuerzos. Estos esfuerzos hacen que el activo físico se deteriore, disminuyéndose su *resistencia al esfuerzo*. Finalmente esta resistencia cae al punto en que el activo físico ya no puede cumplir con el funcionamiento deseado – en otras palabras, falla. Este proceso se ilustró por primera vez en la Figura 4.3, y se muestra nuevamente de una manera levemente distinta en la Figura 6.1.

La exposición al esfuerzo es medida de varias maneras incluyendo la cantidad producida, distancia recorrida, ciclos operacionales cumplidos, tiempo calendario o tiempo de funcionamiento. Todas estas unidades están relacionadas con el tiempo, con lo que es común referirse a la exposición total al esfuerzo como la *edad* del componente. Esta conexión entre el esfuerzo y el tiempo sugiere que debe haber una relación directa entre el grado de deterioro y la edad del componente. Si esto es así, entonces deberíamos decir que el punto en que ocurre la falla también debe depender de la edad del componente, como lo muestra la Figura 6.2.

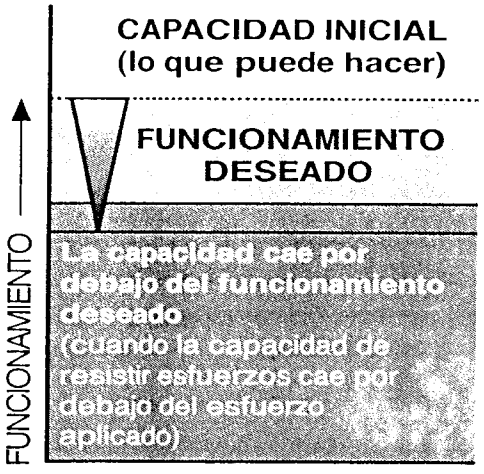


Figura 6.1:
Deterioro hasta la falla

Sin embargo la Figura 6.2 está basada en las dos presunciones clave:

- el deterioro es directamente proporcional al esfuerzo aplicado, y
- el esfuerzo es aplicado consistentemente.

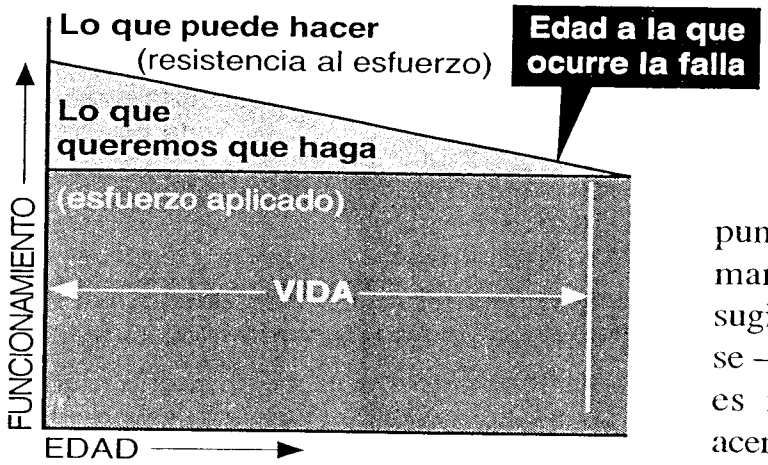


Figura 6.2: Absolutamente predecible

Si esto fuera cierto para todos los activos, seríamos capaces de predecir la vida de los equipos con gran precisión. El punto de vista clásico del mantenimiento preventivo sugiere que esto puede hacerse – todo lo que necesitamos es información suficiente acerca de las fallas.

Sin embargo en el mundo real, la situación no es tan precisa. Este capítulo comienza analizando la realidad, considerando una situación en la que hay una relación clara entre la edad y la falla. En el Capítulo 7 se avanza hacia una visión de la realidad más general.

Fallas relacionadas con la edad

Aún componentes que parecen idénticos varían su resistencia inicial a la falla sutilmente. La tasa a la cual esta resistencia declina con la edad también varía. Además, no hay dos componentes sujetos a idénticos esfuerzos a lo largo de sus vidas. Aún cuando estas variaciones sean muy pequeñas, pueden tener un efecto desproporcionado sobre la edad en la que falla el componente. En la Figura 6.3 se muestra lo que ocurre con dos componentes puestos en servicio con resistencia a la falla similar.

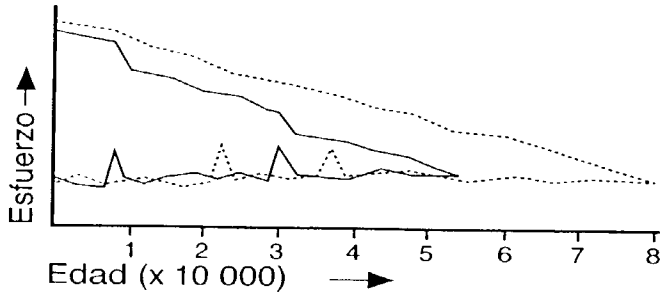


Figura 6.3: Una visión realista de las fallas relacionadas con la edad

La pieza B generalmente es expuesta a un nivel de esfuerzo más alto durante su vida que la pieza A. Entonces se deteriora más rápidamente. El deterioro también se acelera en respuesta a dos picos de esfuerzo a los 8 000 Km y a los 30 000 Km. Por otro lado, por alguna razón la pieza A parece deteriorarse a un ritmo constante sin importar los dos picos de esfuerzo a los 23 000 Km y 37 000 Km. Finalmente, un componente falla a los 63 000 Km y el otro a los 80 000 Km.

Este ejemplo muestra que la edad a la cual fallan componentes idénticos trabajando aparentemente bajo las mismas condiciones, varía mucho. En la

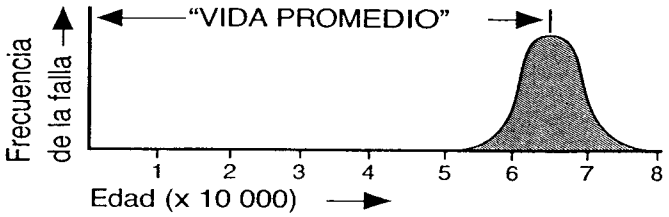


Figura 6.4: Frecuencia de falla y "vida promedio"

práctica, aunque algunas partes duran mucho más que otras, las fallas de muchas partes que se deterioran de esta manera tenderían a concentrarse alrededor de una vida promedio, como lo muestra la Figura 6.4.

Entonces, aun en los casos en que la resistencia a la falla declina con la edad, el punto en que ocurre la falla normalmente es menos predecible de lo que sugiere el sentido común. En el Capítulo 12 se analizan las implicancias cuantitativas de esta situación con mayor profundidad. También explica que la curva de frecuencia de la falla que se ve en la Figura 6.4 puede ser dibujada como una curva de probabilidad condicional de falla, como lo muestra la Figura 6.5. (El término *vida útil* define la edad en la que hay un rápido incremento en la probabilidad condicional de falla. Se utiliza para distinguir esta edad de la *vida promedio* que aparece en la Figura 6.4.)

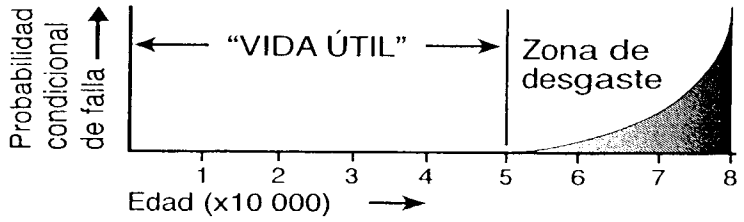


Figura 6.5: Probabilidad condicional de falla y "vida útil"

Si se analizan de este modo una gran cantidad de modos de falla aparentemente idénticos relacionados con la edad, es fácil encontrar algunos que ocurren prematuramente. En el Capítulo 12 también se explica por qué ocurre esto. El resultado de tales fallas prematuras es una curva de probabilidad condicional como lo muestra la Figura 6.6. Esto es igual al patrón de falla B de la Figura 1.5.

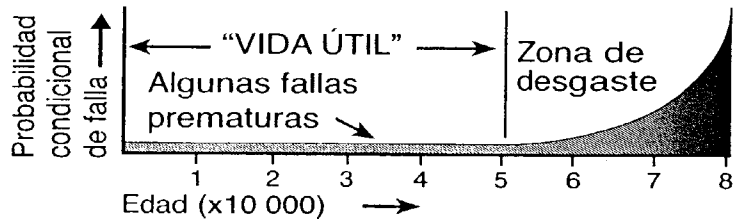


Figura 6.6: El efecto de fallas prematuras

Este punto de vista respecto de fallas relacionadas con la edad es algo simplista, ya que de hecho hay tres maneras en que la probabilidad de falla puede aumentar a medida que un componente envejece. Estas se ven en la Figura 6.7.

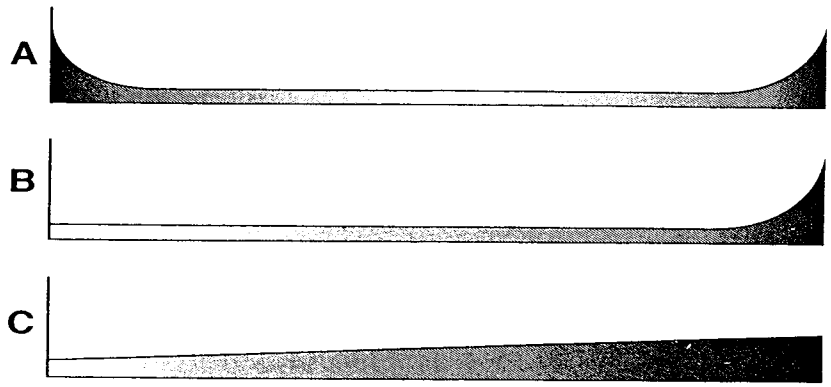


Figura 6.7: Fallas relacionadas con la edad

Estos patrones de falla fueron presentados en el Capítulo 1 y se discutirán con mucho más detalle en el Capítulo 12. La característica que comparten los patrones A y B es que ambos muestran un punto en el que hay un rápido incremento de la probabilidad condicional de falla. El patrón C tiene un incremento constante de la probabilidad de falla, pero no muestra una zona de desgaste definida. Las tres partes siguientes de este capítulo consideran las implicancias de estos patrones de falla desde el punto de vista del mantenimiento preventivo.

6.3 Fallas Relacionadas con la Edad y Mantenimiento Preventivo

Desde hace siglos – y por cierto desde que se generalizó el uso de las máquinas – el hombre ha tendido a creer que la mayoría de los equipos tienden a comportarse como lo muestran las Figuras 6.4 a 6.6. En otras palabras, la mayoría de las personas todavía tienden a asumir que los componentes similares que realizan tareas similares, funcionarán confiablemente durante un período, quizás con una pequeña cantidad de fallas tempranas al azar, y que luego la mayoría de los componentes se "desgastarán" aproximadamente al mismo tiempo.

En general, los patrones de falla relacionados con la edad se aplican a componentes muy simples, o a componentes complejos que sufren de un modo de falla dominante. En la práctica, comúnmente se los encuentra bajo condiciones de desgaste directo (mayormente cuando el equipo entra en contacto directo con el producto). También se los asocia con fatiga, corrosión, oxidación y evaporación.

Las características del desgaste ocurren mayormente cuando los equipos entran en contacto directo con el producto. Las fallas relacionadas con la edad también tienden a estar asociadas con la fatiga, la oxidación, la corrosión y la evaporación.

Algunos ejemplos de puntos en los cuales *los equipos* entran en contacto *con el producto* incluyen revestimientos refractarios, impulsores de bombas, asientos de válvulas, sellos, herramientas de máquinas, transportadores a tornillo, revestimientos de trituradoras y tolvas, superficies internas de tuberías, matrices, etc.

La fatiga afecta a los componentes –especialmente a las piezas metálicas- que están sujetas a ciclos de carga que tienen una frecuencia razonablemente alta. La tasa y el grado en que la *oxidación* y la *corrosión* afectan a un componente, depende de su composición química, del grado de protección que tenga y del medio en el que está operando. La *evaporación* afecta a los solventes y a las fracciones más volátiles de los productos petroquímicos.

Bajo ciertas circunstancias, se dispone de dos opciones preventivas para reducir la incidencia de este tipo de modos de falla, estas son las *tareas de reacondicionamiento cíclico* y las *tareas de sustitución cíclica*. Estas categorías se consideran con mayor detalle en la próxima parte de este capítulo.

6.4 Tareas de Reacondicionamiento y Sustitución Cíclica

Los modos de falla que conforman los Patrones A o B de la Figura 6.7 son más probables que ocurran después del fin de su *vida útil* como se muestra en la Figura 6.5. Si una pieza o componente es uno de los que sobreviven hasta el fin de su vida útil, es posible sacarlo de servicio antes que entre en la zona de desgaste y tomar alguna clase de acción para prevenir que falle, o por lo menos para reducir las consecuencias de la falla. A veces, esta acción implica hacer algo para restablecer la capacidad inicial de un elemento o un componente que ha sido cambiado. Si hacemos estos a intervalos fijos sin intentar determinar la condición de la pieza o componente afectado antes de someterlo al proceso de reacondicionamiento, la acción se conoce como *reacondicionamiento cíclico*. Específicamente:

El reacondicionamiento cíclico consiste en reacondicionar la capacidad de un elemento o componente antes o en el límite de edad definido, independientemente de su condición en ese momento.

Las tareas de reacondicionamiento cíclico también se conocen como *tareas de retrabajos cíclicos*. Incluyen también revisiones o cambios completos hechos a intervalos preestablecidos para prevenir modos de falla específicos relacionados con la edad.

En el caso de algunos modos de falla relacionados con la edad, simplemente es imposible recuperar la capacidad inicial del elemento o del componente una vez que ha alcanzado el fin de su vida útil. En estos casos, la capacidad inicial sólo puede ser restaurada descartándolo y reemplazándolo por uno nuevo. En otros casos, el reacondicionamiento cíclico de un elemento es técnicamente posible, pero es mucho más costo-eficaz cambiarlo por uno nuevo. En ambos casos, si el elemento o componente se reemplaza por uno nuevo a intervalos fijos sin intentar evaluar la condición del activo viejo, la tarea se conoce como *sustitución cíclica*.

Las tareas de sustitución cíclica consisten en descartar un elemento o componente antes, o en el límite de edad definida, independientemente de su condición en ese momento.

Nótese que los términos de reacondicionamiento y sustitución cíclica muchas veces se pueden aplicar exactamente a la misma tarea, y el término apropiado depende del nivel al cual se lleva a cabo el análisis.

Por ejemplo, si se desgasta el impulsor de una bomba a una tasa predecible y por lo tanto puede reemplazarse por uno nuevo a intervalos fijos, la tarea de reemplazo pueden describirse como sustitución cíclica del impulsor o el reacondicionamiento cíclico de la bomba.

Por esto tendemos a considerar el reacondicionamiento cíclico y la sustitución cíclica juntos. Pero, la distinción se vuelve importante cuando se considera un modo de falla que puede prevenirse con cualquiera de las dos tareas cuando se las considera al mismo nivel de análisis.

Por ejemplo, se sabe que cierto tipo de motor eléctrico puede sufrir de fallas en sus devanados después de una determinada cantidad de tiempo de servicio. En este caso, podría ser posible restituir la capacidad inicial rebobinando el motor (reacondicionamiento cíclico) o sustituyéndolo por uno nuevo (sustitución cíclica).

Por esta razón, el resto de esta sección considera las características del reacondicionamiento cíclico y de sustitución cíclica juntas, pero también tiene cuidado en remarcar sus principales diferencias.

La Frecuencia de Tareas de Reacondicionamiento y Sustitución Cíclica

La frecuencia con la que se realiza cada tarea de reacondicionamiento cíclico está determinada por la vida útil del elemento, como lo muestra la Figura 6.5. En otras palabras:

La frecuencia de una tarea de reacondicionamiento o sustitución cíclica está determinada por la edad en la que el elemento o componente muestra un rápido incremento en la probabilidad condicional de falla.

En el caso del Patrón C, necesitan ser analizados al menos cuatro intervalos de reacondicionamiento diferentes para determinar el intervalo óptimo (si es que existe).

En general, está muy difundida la creencia que todos los elementos "tienen una vida", y reacondicionando el elemento o instalando uno nuevo antes que se alcance esta "vida" automáticamente se lo hace "seguro". Esto no siempre es verdad, con lo que RCM tiene un cuidado especial focalizado en la seguridad cuando se consideran tareas de reacondicionamiento y sustitución cíclicas.

De hecho, RCM reconoce dos tipos diferentes de vida-límite cuando se trata con este tipo de tareas. La primera se aplica a tareas que tienden a evitar fallas con consecuencias para la seguridad, y se llama límite de *vida-segura*. Aquellos que tienden a prevenir fallas que no tiene consecuencias para la seguridad se llaman límites de *vida-económica*.

Límites de vida-segura

Los límites de vida-segura sólo se aplican a las fallas que tienen consecuencias para la seguridad o el medio ambiente, con lo que las tareas asociadas deben reducir la probabilidad de que ocurra una falla antes del fin de su vida útil a un nivel tolerable. (Un método para decidir qué es tolerable se discutió en la parte 3 del Capítulo 5 y en el Apéndice 3 de este libro. En este contexto se usan probabilidades del orden de 10^{-6} y hasta 10^{-9}). Esto significa que los límites de vida-segura no pueden aplicarse a elementos que conforman el patrón A, ya que la mortalidad infantil implica que podrían fallar prematuramente un número significativo de elementos. De hecho, no se pueden aplicar a ningún modo de falla en el que exista una probabilidad significativa de ocurrencia de falla cuando el elemento entra en servicio.

En condiciones ideales, los límites de vida-segura deben determinarse antes que el elemento se ponga en servicio. El elemento debería probarse en un ambiente que simule las condiciones operativas para determinar que vida realmente es capaz de alcanzar, y una fracción conservadora de esa vida se usa como límite de vida-segura. Esto se muestra en la Figura 6.8.

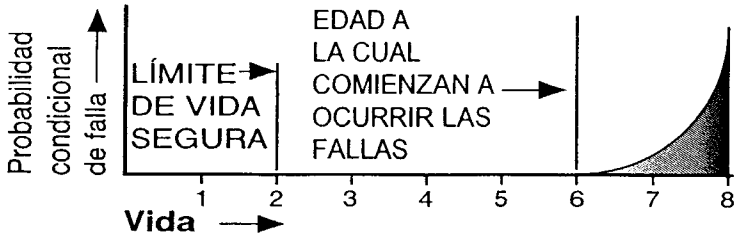


Figura 6.8:
Límites de vida-segura

Nunca existe una correlación perfecta entre el ambiente de prueba y el ambiente de operación. El ensayo de partes que tienen una vida larga hasta la falla son muy costosos y obviamente toman mucho tiempo, con lo que por lo general no hay suficiente información como para poder determinar con confianza las curvas de supervivencia. En estos casos los límites de vida segura ciertas veces pueden determinarse dividiendo el promedio por un factor arbitrario como ser tres o cuatro. Esto implica que la probabilidad condicional de falla en la vida límite debería ser esencialmente cero.

Límites de vida-económica

La experiencia operativa sugiere que desde el punto de vista económico muchas veces son deseables el reacondicionamiento cíclico o la sustitución cíclica. El límite de vida asociado se conoce como límite de vida-económica. Dicho límite por lo general es igual a la vida útil. El aspecto económico de la sustitución cíclica y del reacondicionamiento cíclico se discutirá con más detalle al final de este capítulo.

La Factibilidad Técnica del Reacondicionamiento Cíclico

Los comentarios anteriores indican que para que la tarea de reacondicionamiento cíclico sea técnicamente factible, los primeros criterios que han de satisfacerse son:

- que debe haber un punto en el que haya un incremento de la probabilidad condicional de falla (en otras palabras el elemento debe tener una "vida útil")
- que debemos estar razonablemente seguros acerca de la duración de esta vida.

En segundo lugar, la mayoría de los elementos deben sobrevivir a esta edad. Si demasiados elementos fallan antes de llegar a ella, el resultado neto sería un aumento de las fallas imprevistas. Esto no sólo podría acarrear consecuencias inadmisibles, sino que significa que las tareas de reacondicionamiento asociadas se están realizando fuera de secuencia. Esto a su vez trastorna el proceso completo de planificación. (Notemos que si la falla supone consecuencias para la seguridad o el medio ambiente, la probabilidad de que ocurra una falla antes del límite-seguro debe reducirse a un nivel realmente bajo – efectivamente cero- como se discutió anteriormente)

Finalmente, el reacondicionamiento cíclico debe restaurar la resistencia original a la falla del activo físico, o al menos algo que se aproxime lo suficiente a la condición original como para asegurar que el elemento continúe siendo capaz de cumplir la función deseada por un período de tiempo razonable.

Por ejemplo, nadie en sus cabales trataría de reacondicionar una lamparita eléctrica de uso doméstico, simplemente porque no es capaz de restaurarla a su condición inicial (además de una cuestión económica). Por otro lado, podría decirse que recapando las cubiertas de un camión se restaura la misma a una condición cercana a la original.

Estos puntos llevan a las siguientes conclusiones generales acerca de la factibilidad técnica del reacondicionamiento cíclico:

Las tareas de reacondicionamiento cíclico son técnicamente factibles si:

- ***hay una edad identificable en la que el elemento muestra un rápido incremento en la probabilidad condicional de falla***
- ***la mayoría de los elementos sobreviven a esta edad (todos los elementos si la falla tiene consecuencias para la seguridad o el medio ambiente)***
- ***se restaura la resistencia original del elemento a la falla.***

La Factibilidad Técnica de la Sustitución Cíclica

Los comentarios hechos indican que una tarea de sustitución cíclica es técnicamente factible bajo las circunstancias siguientes:

Las tareas de sustitución cíclica son técnicamente factibles si:

- ***hay una edad identificable en la que el elemento muestra un rápido incremento en la probabilidad condicional de falla***
- ***la mayoría de los elementos sobreviven a esta edad (todos los elementos si la falla tiene consecuencias para la seguridad o el medio ambiente)***

Por lo general no es necesario preguntar si la tarea restaurará la resistencia original porque se reemplaza el elemento por uno nuevo.

La Efectividad de las Tareas de Reacondicionamiento Cíclico

Aunque sea técnicamente factible, puede que no merezca la pena el reacondicionamiento cíclico porque puede que otras tareas sean aún más efectivas como se explica en el Capítulo 7.

Si no puede encontrarse una tarea más efectiva, existe a menudo la tentación de seleccionar tareas de reacondicionamiento cíclico simplemente basándose en si son técnicamente factibles. Un límite de edad aplicado a un elemento que se comporta como lo muestra la Figura 6.6 significa que algunos elementos recibirán atención antes de que la necesiten, mientras que otros puede que fallen prematuramente, pero el efecto neto puede que sea una reducción global en el número de fallas imprevistas. Sin embargo, aún puede ser que en este caso no valga la pena realizar reacondicionamiento cíclico,

ya que como mencionamos anteriormente, una reducción en el número de fallas no es suficiente si la falla tiene consecuencias para la *seguridad o el medio ambiente*. Esto es así ya que para que merezca la pena, la tarea debe reducir la probabilidad de falla que tiene este tipo de consecuencias a un nivel realmente muy bajo (efectivamente cero).

Por otro lado, si las consecuencias son económicas, necesitamos estar seguros de que a lo largo de un período de tiempo, el costo de realizar la tarea de reacondicionamiento cíclico o de sustitución cíclica es menor al costo de permitir que ocurra la falla. Para decirlo de otra manera, la única justificación para un límite de vida económica es su costo-eficacia. Esto se da porque el reacondicionamiento cíclico incrementa el número de trabajos en el taller de reparaciones, mientras que la sustitución cíclica incrementa el consumo de elementos o componentes que están sujetos a ser descartados. Porqué esto es así se muestra en la figura del final de la página.

Al considerar las fallas que tienen consecuencias operacionales, notemos que una tarea de reacondicionamiento cíclico o de sustitución cíclica podría afectar las operaciones por sí misma. En la mayoría de los casos es probable que este efecto sea menor que las consecuencias de la falla porque:

- normalmente se realizaría en un momento en el que afecta un mínimo a la producción (usualmente durante uno de los llamados "huecos" de producción).
- es probable que lleve menos tiempo de lo que llevaría reparar la falla porque es posible planear más en detalle la tarea programada.

La Figura 6.9 muestra un modo de falla que depende de la edad y cuya vida útil es de 12 meses, mientras que su vida promedio es de 18 meses. En un período de 3 años, la falla ocurre dos veces si no se realiza ningún mantenimiento preventivo, mientras que la tarea preventiva se debería haber hecho tres veces. En otras palabras, la tarea preventiva debe hacerse 50% más seguido que lo que debiera realizarse la tarea correctiva si dejásemos que ocurra la falla.

Si cada falla cuesta (por ej.) U$S 2000 en pérdidas de producción y reparación, el costo de las fallas en tres años hubiese sido de U$S 4000. Si el costo de las tareas preventivas es por ejemplo de U$S 1100, en el mismo período de tiempo su costo hubiese sido de U$S 3300. Con lo que en este caso la tarea es costo-eficaz.

Por otro lado, si la vida promedio hubiese sido de 24 meses y mantenemos el resto de los valores iguales, las fallas sólo ocurrirán 1,5 veces cada tres años, y costarían U$S 3000 en ese período de tiempo. Las tareas cíclicas todavía costarían U$S 3300 para estos tres años, con lo que no sería costo-eficaz.

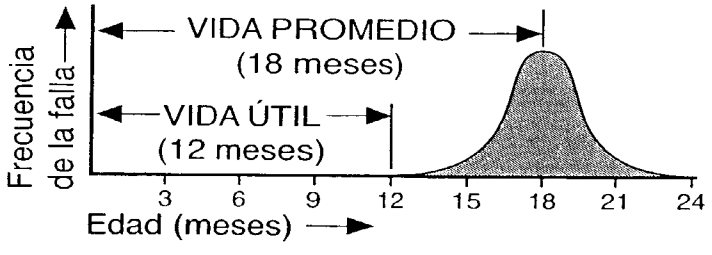


Figura 6.9: "Vida útil" y "vida promedio"

Si no hay consecuencias operacionales, el reacondicionamiento y la sustitución cíclica sólo se justifican si cuesta sustancialmente menos que el costo de la reparación (lo cual puede ser el caso si la falla provoca daños secundarios importantes).

Esto quiere decir que en general, *vale la pena* aplicar el concepto de límite de vida económica si se reduce o evita las consecuencias operacionales de una falla no anticipada, y/o si la falla que previene causa un daño secundario significativo. Obviamente, antes de poder determinar la costo-efícacia de las tareas de sustitución cíclica, necesitamos conocer el patrón de fallas.

Para activos nuevos, esto significa que un modo de falla con importantes consecuencias económicas también debería ser sometido a un programa de ensayos para determinar el límite de su vida útil y si este es aplicable. Pero, muy pocas veces existe suficiente evidencia para incluir desde el comienzo la sustitución cíclica o el reacondicionamiento cíclico en un plan de mantenimiento programado. En la práctica, sólo puede determinarse de manera correcta la frecuencia de dichas tareas si se dispone de información histórica confiable. Dicha información, cuando el activo es puesto en servicio por primera vez, está disponible en muy pocas ocasiones, con lo cual generalmente es imposible especificar tareas de reacondicionamiento cíclico o de sustitución cíclica en programas de mantenimiento planeados antes de la puesta en servicio. (Por ejemplo, en el programa inicial de mantenimiento desarrollado para el Douglas DC 10, se asignaron tareas de reacondicionamiento a solo siete componentes). No obstante, los elementos sujetos a modos de falla muy costosos deben someterse a un estudio de determinación de "vida" tan pronto como sea posible para averiguar si pueden obtenerse beneficios de las tareas de reacondicionamiento y/o sustitución cíclica.

6.5 Fallas no Asociadas con la Edad

Uno de los desarrollos más desafiantes de la administración del mantenimiento moderno ha sido el descubrimiento de que en realidad muy pocos modos de falla se ajustan a alguno de los patrones de falla que muestra la Figura 6.7. Como analizamos en los párrafos siguientes, esto se debe principalmente a una combinación de variaciones en el esfuerzo aplicado y complejidad creciente.

Esfuerzo variable

Contrariamente a las creencias que se nombran en la parte 2 de este capítulo, el deterioro no siempre es proporcional al esfuerzo aplicado, y el esfuerzo no siempre es aplicado consistentemente. Por ejemplo, en la parte 3 del Capítulo 4 vimos que muchas fallas son causadas por incrementos en el esfuerzo aplicado, que a su vez son causado por operación incorrecta, montaje incorrecto, o daños externos.

Algunos ejemplos de este tipo de aumentos de tensiones dados en el Capítulo 4 incluyen errores en la operación (se arranca una máquina muy rápido, una máquina se pone en reversa mientras que está andando hacia delante, se alimenta el proceso con materia prima demasiado rápido) errores de montaje (se ajusta demasiado un perno, se olvidan montar partes) y daños externos (cae un rayo, se produce la inundación "del siglo", etc.)

En todos estos casos hay muy poca o casi ninguna relación entre cuánto tiempo el activo físico estuvo en servicio y la posibilidad de que ocurra la falla. Esto se muestra en la Figura 6.10, que es básicamente igual a la Figura 4.4 pero representada en función del tiempo. (Idealmente, "prevenir" fallas de este tipo es una cuestión de prevenir cualquier causa de incremento en los niveles de esfuerzo, más que una cuestión de hacer algo en el activo físico.) En la Figura 6.11, el pico de esfuerzo reduce permanentemente la resistencia a la falla, pero no causa realmente que el elemento falle (*un terremoto fisura una estructura pero no causa su derrumbe*). La reducción de la resistencia a la falla hace que el elemento se vuelva vulnerable al próximo pico, que puede o no ocurrir antes de que sea reemplazado por otro motivo.

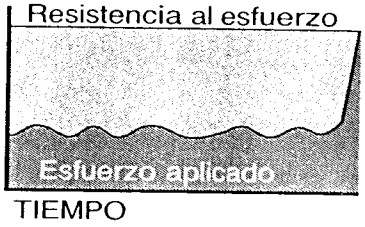


Figura 6.10

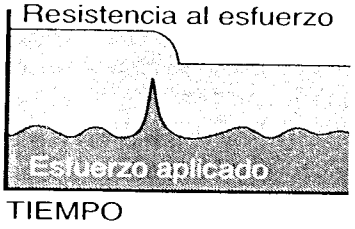


Figura 6.11

En la Figura 6.12, el pico de esfuerzo sólo reduce temporalmente la resistencia a la falla (*como en el caso de materiales termoplásticos que se ablandan cuando la temperatura se eleva y se endurecen nuevamente cuando la temperatura desciende*). Finalmente en la Figura 6.13 un pico de esfuerzo acelera la pérdida de resistencia a la falla y finalmente acorta la vida del componente considerablemente. Cuando esto sucede, puede ser muy difícil establecer la relación causa-efecto, porque la falla podría ocurrir meses o hasta años después del pico de esfuerzo.

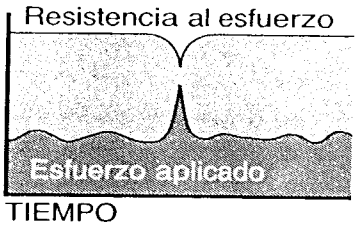


Figura 6.12

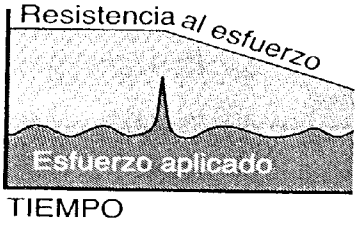


Figura 6.13

Esto sucede a menudo cuando la parte es dañada durante la instalación (que podría ocurrir si un rodamiento está mal alineado), si es dañada antes de la instalación (el cojinete se cae al suelo en el almacén de repuestos) o es maltratado en el servicio (entra suciedad en el cojinete). En estos casos, la prevención de la falla es idealmente una cuestión de asegurar que se realicen correctamente los trabajos de mantenimiento y de instalación y que las partes se cuiden adecuadamente en el almacén.

En estos cuatro ejemplos, cuando los elementos entran en servicio no es posible predecir cuando ocurrirán las fallas. Por eso, estas fallas se describen como "al azar".

Complejidad

Los procesos de falla que muestra la Figura 6.7 se aplican a ciertos mecanismos relativamente simples. En el caso de elementos complejos, la situación se torna todavía menos predecible. Los elementos se hacen más complejos para mejorar el funcionamiento (al incorporar tecnología nueva o adicional, o automatizando) o para hacerlos más seguros (utilizando dispositivos de seguridad).

Por ejemplo, Nowlan y Heap[1978] se refieren a los desarrollos hechos en el campo de la aviación civil. En la década del '30, un viaje aéreo era lento, riesgoso, realizable en condiciones climáticas razonablemente favorables en una aeronave con una autonomía de unos pocos cientos de kilómetros y capacidad para aproximadamente 20 pasajeros. La nave tenía uno o dos motores alternativos, tren de aterrizaje fijo, propulsores a hélice de paso fijo y sin flaps en las alas.

Hoy día un viaje en avión es mucho más rápido y mucho más seguro. Puede hacerse prácticamente en cualquier condición climática, en una aeronave con una autonomía de vuelo de miles de kilómetros y una capacidad de cientos de pasajeros. El avión tiene varias turbinas, equipamiento anticongelamiento, tren de aterrizaje retráctil, dispositivos móviles de elevación, sistemas de control de temperatura y presión de cabina, equipamiento de navegación y comunicación de gran alcance, sistemas de instrumentación y de soporte auxiliar complejos.

En otras palabras, se logró un mejor desempeño y una mayor seguridad al costo de una mayor complejidad. Una mayor complejidad significa equilibrar lo liviano y lo compacto, necesario para un alto rendimiento, con el tamaño y masa necesarios para tener durabilidad. Esta combinación de complejidad y compromiso:

- incrementa el número de componentes que pueden fallar, y también incrementa el número de interfases o conexiones entre los componentes. Esto a su vez incrementa el número y la variedad de fallas que pueden ocurrir.

  Por ejemplo, una gran cantidad de fallas mecánicas se vinculan con soldaduras o pernos, mientras que una significativa proporción de fallas eléctricas y electrónicas tienen que ver con conexiones entre componentes. Cuantas más conexiones de ese tipo halla, más fallas de ese tipo habrá.

- reduce el margen entre la capacidad inicial de cada componente y el funcionamiento deseado (en otras palabras, el "poder" está más cerca del "querer"), lo que reduce el margen de deterioro admisible antes de que ocurra la falla .

Estos dos argumentos a su vez sugieren que es más probable que sufran fallas al azar los elementos complejos que los elementos simples.



Figura 6.14: Fallas que no están relacionadas con la edad

Patrones D, E, y F

La combinación de esfuerzo variable y respuesta errática a los esfuerzos, en conjunto con una complejidad creciente, significa que en la práctica, cada vez más modos de falla se ajustan a los patrones que muestra la Figura 6.14. El rasgo más importante de los patrones D, E y F es que luego del período inicial, hay muy poca relación, entre la confiabilidad y la edad operacional. En estos casos, los límites de edad contribuyen poco, o nada, a reducir la probabilidad de falla.

(De hecho las grandes reparaciones programadas pueden inclusive *aumentar* las tasas de falla al introducir mortalidad infantil en sistemas que de otra manera serían estables. Esto está demostrado por el número elevado y cada vez mayor de accidentes graves que se producen en el mundo, que suceden cuando se realiza el mantenimiento o inmediatamente después de la intervención de mantenimiento. También se ratifica cuando el operador de la máquina dice que "cada vez que mantenimiento trabaja en la máquina durante el fin de semana, nos lleva hasta el miércoles ponerla a andar otra vez".)

Desde el punto de vista de la gerencia de mantenimiento, la conclusión principal que podemos extraer de estos patrones de falla es que la idea de "vida útil" simplemente no se aplica a las fallas al azar, con lo que el "reemplazo a intervalos fijos" o el "reacondicionamiento antes de tal edad" no puede aplicarse.

Como se dijo en el Capítulo 1 de este capítulo, el tomar conciencia de estos hechos ha inducido a algunas personas a abandonar totalmente la idea del mantenimiento preventivo. Aunque esto puede ser acertado para fallas con consecuencias menores, cuando las consecuencias de la falla son serias, *algo* debe hacerse para prevenir las fallas o al menos para evitar las consecuencias.

La necesidad permanente de prevenir ciertos tipos de falla, y la incapacidad creciente de las técnicas clásicas para hacerlo, impulsan el avance de nuevos métodos de prevención de fallas. Entre estos se destacan las técnicas conocidas como mantenimiento predictivo o "a condición". Estas técnicas son abordadas en detalle en el próximo capítulo.

7 Mantenimiento Proactivo 2: Tareas Predictivas

7.1 Fallas Potenciales y Mantenimiento a Condición

En el capítulo anterior hemos visto que por lo general hay poca relación, o ninguna, entre cuánto tiempo el activo físico ha estado en servicio y cuán probable es que falle. Sin embargo, aunque muchos modos de falla no se relacionan con la edad, la mayoría de ellos da algún tipo de advertencia de que están en el proceso de ocurrir, o de que están por ocurrir. Si puede encontrarse evidencia de que algo está en las últimas instancias de la falla, podría ser posible actuar para prevenir que falle completamente y/o evitar las consecuencias.

La Figura 7.1 ilustra lo que sucede en las etapas finales de la falla. Se lo llama *la curva P-F*, porque muestra cómo comienza la falla, cómo se deteriora al punto en que puede ser detectada (punto "P") y luego, si no es detectada y corregida, continúa deteriorándose –generalmente a una tasa acelerada– hasta que llega al punto de falla funcional ("F").

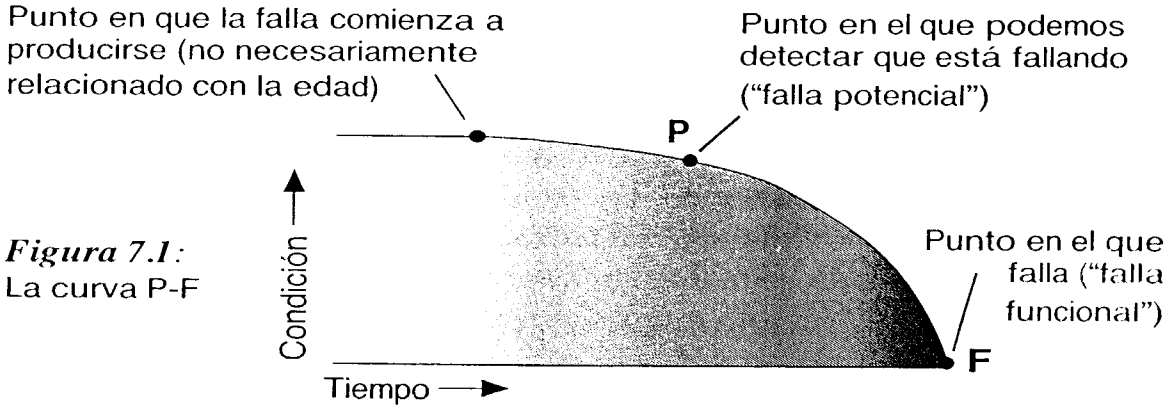


Figura 7.1: La curva P-F

El punto del proceso de la falla en el que es posible detectar si la falla está ocurriendo o si está a punto de ocurrir se conoce cómo *falla potencial*.

Una falla potencial es un estado identificable que indica que una falla funcional está a punto de ocurrir o en el proceso de ocurrir.

En la práctica, hay miles de maneras para detectar si las fallas están en el proceso de ocurrir.

Como ejemplos de fallas potenciales podemos nombrar puntos calientes que denotan deterioro del material refractario de un horno o de la aislación eléctrica, vibraciones que indican la falla inminente de un cojinete, grietas que muestran la fatiga del metal, partículas en el aceite de una caja de engranajes que revelan la falla inminente de los engranajes, desgaste excesivo de los neumáticos, etc.

Si se detecta una falla potencial, entre el punto P y el punto F que se observa en la Figura 7.1, es posible que pueda actuarse para prevenir o evitar las consecuencias de la falla funcional. (Si es posible actuar de manera significativa o no, depende de la rapidez con la que ocurra la falla, como se ve en la parte 2 de este capítulo.) Las tareas designadas para detectar fallas potenciales se conocen como *tareas a condición*.

Las tareas a condición consisten en chequear si hay fallas potenciales, para que se pueda actuar para prevenir la falla funcional o evitar las consecuencias de la falla funcional

Las tareas a condición se llaman así porque los elementos que se inspeccionan se dejan en servicio *a condición* de que continúen cumpliendo con los parámetros de funcionamiento especificados. Esto también se conoce como mantenimiento *predictivo* (porque estamos tratando de predecir si – y posiblemente cuándo – el elemento va a fallar basándonos en su comportamiento actual) o mantenimiento *basado en la condición* (porque la necesidad de acciones correctivas o para evitar las consecuencias se basa en una evaluación de la condición del elemento.)

7.2 El Intervalo P–F

Además de la falla potencial en sí misma, necesitamos considerar la cantidad de tiempo (o el número de ciclos de esfuerzo) que transcurre entre el punto en el que ocurre una falla potencial – en otras palabras, el punto en el que se hace *detectable* – y el punto en el que se deteriora llegando a la falla funcional. Como lo muestra la Figura 7.2, este intervalo se conoce como *el intervalo P-F*.

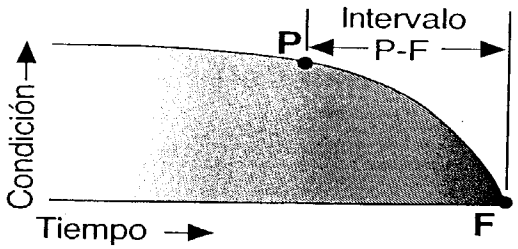


Figura 7.2: El intervalo P-F

El intervalo P-F es el intervalo entre el momento en que ocurre una falla potencial y su decaimiento hasta convertirse en una falla funcional.

El intervalo P-F nos dice con qué frecuencia deben realizarse las tareas a condición. Si queremos detectar la falla potencial antes de que se convierta en falla funcional, el intervalo entre las revisiones debe ser menor al intervalo P–F.

Las tareas a condición deben ser realizadas a intervalos menores al intervalo P–F

El intervalo P-F también es conocido como el *período de advertencia,* el *tiempo que lleva hasta la falla,* o el *período de desarrollo de la falla*. Puede ser medido en cualquier unidad que provea una indicación de la exposición al esfuerzo (tiempo en funcionamiento, unidades de producción, ciclos parada-arranque, etc.), pero por razones prácticas, generalmente es medido en términos de tiempo transcurrido. Varía para distintos modos de falla, entre fracciones de segundo a varias décadas.

Observemos que si se realiza una tarea a condición a intervalos que son más largos que el intervalo P-F, hay una posibilidad de que pasemos totalmente por alto la falla. Por otro lado si realizamos la tarea a intervalos muy cortos respecto al intervalo P-F, desperdiciaremos recursos en el proceso de chequeo.

Por ejemplo, si el intervalo P-F para un determinado modo de falla es de dos semanas y el elemento se chequea una vez por semana, la falla será detectada. En cambio, si se controla el elemento una vez por mes, es posible que nos perdamos todo el proceso de falla. Por otro lado, si el intervalo P-F es de tres meses, sería una pérdida de tiempo y de dinero chequear el elemento todos los días.

En la práctica generalmente basta con seleccionar una frecuencia de tarea igual a la mitad del intervalo P-F. Esto asegura que la inspección detectará la falla potencial antes de que ocurra la falla funcional, mientras que provee (en la mayoría de los casos) una cantidad de tiempo razonable para hacer algo al respecto. Esto lleva al concepto de *intervalo P-F neto*.

Intervalo P-F Neto

El intervalo P-F neto es el intervalo mínimo que es probable que transcurra entre el *descubrimiento* de una falla potencial y la ocurrencia de la falla funcional. Esto se ilustra en las Figuras 7.3 y 7.4. Ambas muestran una falla con un intervalo P-F de nueve meses.

La Figura 7.3 muestra que si el elemento es inspeccionado mensualmente, el intervalo P-F neto es de 8 meses. Por otra parte, si es inspeccionado en

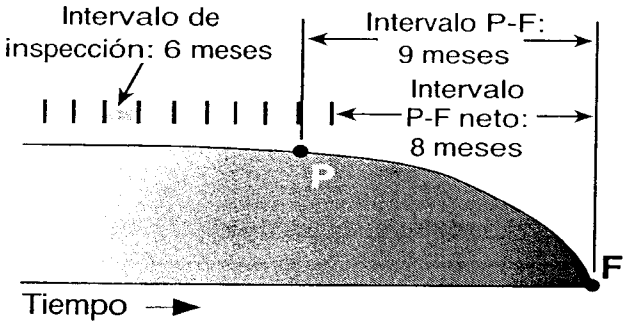


Figura 7.3:
Intervalo P-F Neto (1)

intervalos semestrales como lo muestra la Figura 7.4, el intervalo P-F neto es de 3 meses. Entonces, en el primer caso la cantidad mínima de tiempo disponible para hacer algo con relación a la falla es cinco meses mayor que en el segundo, pero la tarea de inspección debe ser realizada seis veces más a menudo.

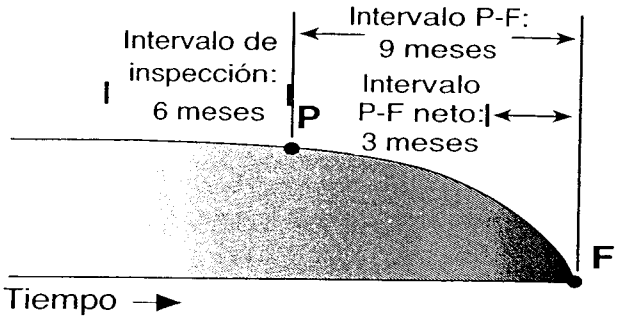


Figura 7.4: Intervalo P-F Neto (2)

El intervalo P-F neto determina la cantidad de tiempo *disponible* para tomar cualquier acción que sea necesaria para reducir o eliminar las consecuencias de la falla. Dependiendo del contexto operacional del activo físico, el aviso de una falla incipiente le permite a los usuarios de un activo físico reducir o evitar consecuencias de distintas maneras:

- *tiempo de parada:* puede planearse una acción correctiva para un momento en el que no afecte a las operaciones. La oportunidad de planear adecuadamente la acción correctiva significa que es más probable que se realice más rápidamente.

  Por ejemplo, si encontramos un componente eléctrico que está a una temperatura mayor que la adecuada, podría reemplazarse antes que se queme, cuando la máquina no se está utilizando. Notemos que, en estos casos, no se previene la falla de un componente –haga lo que se haga igualmente está condenado a romperse- pero se evitan las consecuencias operacionales de la falla.

- *costos de reparación:* los usuarios pueden actuar para eliminar el daño secundario que sería causado por fallas no anticipadas. Esto reduciría el tiempo de parada de máquina y los costos de reparación asociados con la falla.

  Por ejemplo, un aviso a tiempo podría hacer que los usuarios pudieran apagar la máquina antes que (por ej.) la rotura de un cojinete lleve al rotor a tocar el estator.

- *seguridad:* la advertencia de la falla da tiempo para detener la planta antes de que la situación se vuelva peligrosa, o para poner fuera de peligro a personas que de lo contrario podrían resultar heridas.

  Por ejemplo, si se descubre a tiempo la rajadura de una pared, se podrían apuntalar sus fundaciones y prevenir de esa manera que la pared se deteriore al punto de derrumbarse. Es muy probable que debamos desalojar las inmediaciones mientras hacemos este trabajo, pero por lo menos logramos evitar las consecuencias sobre la seguridad que podría tener que se derrumbe la pared.

Para que una tarea a condición sea técnicamente factible, el intervalo P-F neto debe ser *mayor* al tiempo requerido para realizar alguna acción que evite o reduzca las consecuencias de la falla. Si en intervalo P-F neto es demasiado corto como para tomar cualquier acción sensata, entonces es claro que la tarea a condición no es técnicamente factible.

En la práctica, el tiempo requerido varía mucho. En algunos casos puede que sea una cuestión de horas (digamos hasta el término de un ciclo de funcionamiento o la finalización de un turno) o hasta minutos (apagar una máquina o evacuar un edificio). En otros casos pueden ser semanas o hasta meses (digamos hasta una parada de producción importante).

En general, se prefieren los intervalos P-F más largos por dos razones:

- es posible hacer lo que sea necesario para evitar las consecuencias de la falla (incluyendo la planificación de la acción correctiva) de una manera más considerada y por lo tanto más controlada.
- se requieren menos inspecciones de condición

Esto explica porqué se está dedicando tanta energía a encontrar condiciones de falla potencial y técnicas a condición asociadas que den los intervalos P-F más largos posibles. Sin embargo, en algunos casos es posible hacer uso de intervalos P-F muy cortos.

Por ejemplo, las fallas que afectan el equilibrio de ventiladores muy grandes causan problemas graves muy rápidamente, por lo cual se emplean sensores de vibración instalados en línea para parar los ventiladores cuando se producen tales fallas. En este caso, el intervalo P-F es muy corto, y por ello el monitoreo es continuo. Notemos que una vez más, el dispositivo de monitoreo es utilizado para evitar las consecuencias de la falla.

Consistencia del Intervalo P-F

Las curvas de intervalos P-F ilustradas hasta ahora en este capítulo indican que el intervalo P-F para cualquier falla es constante. De hecho, este no es el caso: algunos en realidad varían en una amplia gama de valores, como lo muestra la Figura 7.5.

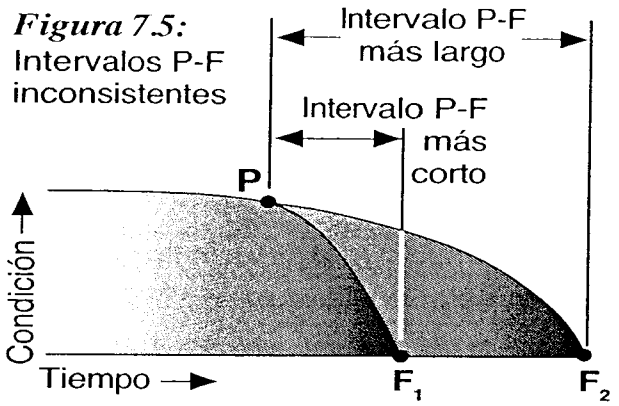


Figura 7.5: Intervalos P-F inconsistentes

Por ejemplo, cuando se discute el intervalo P-F asociado con el cambio del nivel de ruido, alguien podría decir: "Esta cosa puede hacer ruido de dos semanas hasta tres meses antes de romperse." En otros casos, los monitoreos podrían detectar una fisura en un punto particular de una estructura, en cualquier lapso entre seis meses

a cinco años antes del momento en que la estructura falle.

Está claro que en estos casos debe ser seleccionado un intervalo de tarea que sea significativamente menor al más corto de los intervalos P-F probables. Así siempre podemos estar razonablemente seguros de detectar la falla potencial antes de que se transforme en una falla funcional. Si el intervalo P-F neto asociado con este intervalo mínimo es lo suficientemente largo como para tomar una acción adecuada para manejar las consecuencias de la falla, entonces la tarea a condición es técnicamente factible.

Por el otro lado, si el intervalo P-F es muy inconsistente -como pueden ser algunos- no es posible establecer un intervalo de tarea que tenga sentido, y la tarea debe ser abandonada nuevamente a favor de alguna otra manera de tratar la falla.

7.3 Factibilidad Técnica de Tareas a Condición

Como conclusión de la discusión anterior, el criterio que debe satisfacer cualquier tarea a condición para ser técnicamente factible puede ser resumido de la siguiente manera:

Las tareas a condición programadas son técnicamente factibles si:

- ***es posible definir una condición clara de falla potencial***
- ***el intervalo P-F es razonablemente consistente***
- ***resulta práctico monitorear el elemento a intervalos menores al intervalo P-F***
- ***el intervalo P-F neto es lo suficientemente largo como para ser de alguna utilidad (en otras palabras, lo suficientemente largo como para actuar a fin de reducir o eliminar las consecuencias de la falla funcional).***

7.4 Categorías de Técnicas a Condición

Las cuatro categorías principales de técnicas a condición son las siguientes:

- técnicas de *monitoreo de condición, (condition monitoring)* que implican el uso de algún equipo especializado para monitorear el estado de otros equipos
- técnicas basadas en variaciones en la *calidad del producto*
- técnicas de *monitoreo de los efectos primarios*, que implican el uso inteligente de indicadores existentes y equipos de monitoreo de procesos
- técnicas de inspección basadas en los *sentidos humanos*.

Cada una de estas categorías es examinada a continuación.

Monitoreo de Condición

Las técnicas de mantenimiento a condición más sensibles suelen involucrar el uso de algún tipo de maquinaria para detectar fallas potenciales. En otras palabras, se emplean equipos para monitorear el estado de otros equipos. Estas técnicas se conocen como *monitoreo de condición (condition monitoring)* para distinguirlas de otros tipos de mantenimiento a condición.

El monitoreo de condición abarca varios centenares de técnicas diferentes, con lo que el estudio detallado del asunto está más allá del alcance de este capítulo. No obstante, el Apéndice 4 brinda un breve resumen de casi 100 de las técnicas más conocidas. Todas esas técnicas fueron diseñadas para detectar los *efectos* de las fallas (mejor dicho, los efectos de las fallas potenciales, como ser cambios en las características de vibración, cambios en la temperatura, partículas en el aceite lubricante, filtraciones, etc.). Estas técnicas se clasifican en el Apéndice 4 bajo los siguientes títulos:

- efectos dinámicos
- efectos de partícula
- efectos químicos
- efectos físicos
- efectos de temperatura
- efectos eléctricos

Estas técnicas se pueden considerar como versiones altamente sensibles de los sentidos humanos. Muchas de estas técnicas, hoy en día, son realmente muy sensibles y algunas pueden detectar una falla potencial varios meses (y hasta años) antes de la falla funcional. No obstante, una de las mayores limitaciones de casi todos los dispositivos de monitoreo de condición es que controlan sólo una condición. Por ejemplo, un analizador de vibración sólo monitorea vibraciones y no puede detectar cambios químicos o de temperatura. Con lo que la mayor sensibilidad se paga con la pérdida de versatilidad que tienen los sentidos humanos.

Los intervalos P-F asociados a las diferentes técnicas de monitoreo de condición varían desde unos pocos minutos a varios meses. Las diferentes técnicas también determinan las fallas con distintos grados de precisión. Se deben tener en cuenta ambos factores cuando se determina la *factibilidad* de cada técnica.

En general, las técnicas de monitoreo de condición son espectacularmente efectivas cuando son apropiadas, pero cuando son inapropiadas pueden representar una pérdida de tiempo muy costosa y a veces decepcionante. Por lo tanto, el criterio para evaluar si las tareas a condición son técnicamente factibles y si merecen la pena ser realizadas, debe ser aplicado con especial rigor a las técnicas de monitoreo de condición.

Variación de la calidad del producto

En algunas industrias, una importante fuente de datos sobre fallas potenciales es suministrada por la función Calidad. A menudo la aparición de un defecto en un artículo producido por una máquina está directamente relacionada con un modo de falla en la propia máquina. Muchos de estos efectos aparecen gradualmente, y así proporcionan evidencia oportuna de fallas potenciales. Si los procedimientos de relevamiento y evaluación de datos ya existen, cuesta muy poco utilizarlos como advertencia de falla de equipos.

Una técnica muy popular que se puede usar para esto es el Control Estadístico de Procesos (SPC-Statistical Process Control). El Control Estadístico de Procesos implica medir cierto atributo de un producto como ser una dimensión, el nivel de llenado, el peso envasado, y usarlo para sacar conclusiones sobre la estabilidad del proceso.

En la Figura 2.6 del Capítulo 2 se mostró la manera en la que pueden aparecer este tipo de medidas para un proceso que está bajo control y dentro de especificación. Las Figuras 3.4 y 3.5 del Capítulo 3 muestran dos maneras en las que un proceso puede estar fuera de control y fuera de especificación (dicho de otra manera, fallan). En la gran mayoría de los casos, la transición de estar bajo control a fallar es gradual. Los gráficos de Control Estadístico de Procesos generalmente hacen un seguimiento de esta transición.

Para ejemplificar esto, la Figura 7.6 de la página siguiente muestra un gráfico de Control Estadístico de Procesos típico en el cual al principio las mediciones están bajo control. Luego ocurre un modo de falla que causa que las mediciones comiencen a desviarse hacia un lado.

Por ejemplo, a medida que se desgasta una piedra amoladora, el diámetro de piezas se incrementa sucesivamente hasta que la piedra se ajuste o se reemplace.

En la zona 2 de la Figura 7.6 el proceso está fuera de control pero aún está dentro de especificaciones. (Oakland[1991] describe cómo hacer para identificar cambios de este tipo sumamente graduales usando un "gráfico de progresión".) Este cambio de sentido es una condición clara e identificable que indica que una falla funcional está a punto de ocurrir. En otras palabras, es una falla potencial. Si no se hace nada para rectificar la situación, tarde o temprano el proceso comenzará a producir piezas fuera de especificación, como se muestra en la zona 3 de la Figura 7.6.

Este ejemplo describe solamente una de las diversas maneras en la que puede utilizarse el Control Estadístico de Procesos para medir y manejar la variabilidad de los procesos. La descripción completa de todas las técnicas está más allá del alcance de este libro. De cualquier forma, el punto que queremos hacer notar en esta etapa es que si podemos relacionar las desviaciones en gráficos como este con modos de falla específicos, los gráficos resultan fuentes de información que pueden dar una gran ayuda a todos los esfuerzos de mantenimiento proactivo.

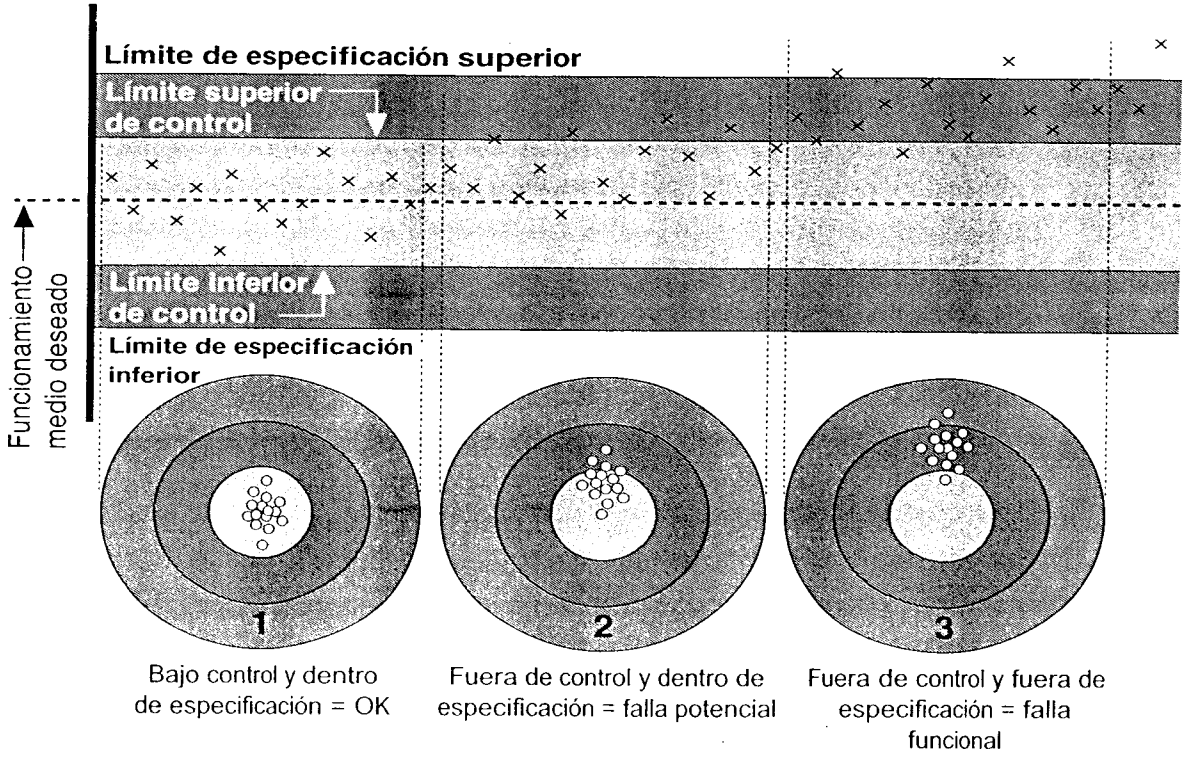


Figura 7.6: Mantenimiento a condición y Control Estadístico de Procesos

Monitoreo de los efectos primarios

Los efectos primarios (velocidad, caudal, presión, temperatura, potencia, corriente, etc.) son otra fuente de información acerca de la condición de los equipos. Los efectos pueden ser monitoreados por una persona leyendo un instrumento de medición y quizás registrando la lectura manualmente, con una computadora como parte de un sistema de control de procesos, o hasta por un registro convencional de datos.

Las mediciones de estos efectos o sus derivados se comparan con cierta información de referencia, dando de este modo evidencia de una falla potencial. Sin embargo, particularmente en el caso de la primer opción, debe asegurarse que:

- la persona que toma la medición debe conocer cuál debe ser la medida cuando todo funciona bien, qué medida corresponde a una falla potencial y cuál corresponde a una falla funcional.
- se toman las mediciones a una frecuencia menor al intervalo P-F (en otras palabras, la frecuencia debe ser menor que el tiempo que le toma a la aguja del dial moverse desde el nivel de falla potencial al de falla funcional cuando ocurre el modo de falla en cuestión).
- el instrumento de medición esté mantenido de manera tal que sea lo suficientemente preciso para este propósito.

El proceso de toma de mediciones puede ser simplificado sensiblemente si los elementos de medición tienen marcas (o bien colores) como se muestra en la Figura 7.7. En ese caso, todo lo que el operador –o cualquier otro- tiene que hacer es observar el elemento de medición y dar aviso si la aguja está en la zona de falla potencial (¿amarilla?), o tomar una acción más drástica si está en la zona de falla funcional (¿rojo?). De todas formas el elemento de medición aún debe controlase a intervalos menores que el intervalo P-F.

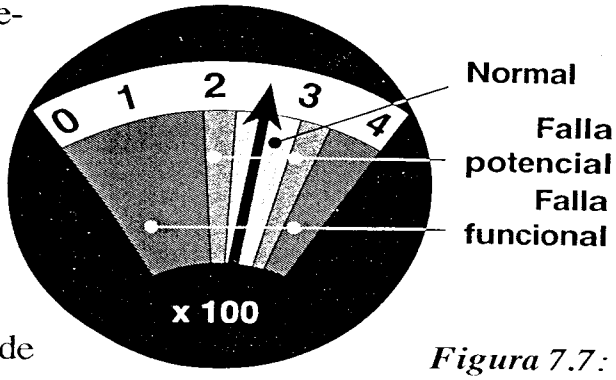


Figura 7.7: Usando elementos de medición para mantenimiento a condición

(Por razones obvias, esta sugerencia sólo se aplica a elementos de medición que están midiendo un estado fijo. También debe tenerse mucho cuidado que los elementos de medición marcados para trabajar en una máquina no sean desmontados y vueltos a colocar en un lugar equivocado)

Los sentidos humanos

Quizás las técnicas de inspección a condición más conocidas son aquellas basadas en los sentidos humanos (mirar, oír, tocar, y oler). Las dos desventajas principales de utilizar estos sentidos para detectar fallas potenciales son que:

- en el momento en que es posible detectar la mayoría de las fallas usando los sentidos humanos, el proceso de deterioro ya está bastante avanzado. Esto significa que los intervalos P-F son generalmente cortos, por lo tanto los chequeos deben ser realizados más frecuentemente y la respuesta debe ser rápida.
- el proceso es subjetivo, por lo que es difícil desarrollar criterios de inspección precisos. Además las observaciones dependen en gran parte de la experiencia y hasta del estado mental del observador.

Sin embargo, las ventajas de utilizar los sentidos humanos son las siguientes:

- el ser humano promedio es altamente versátil y puede detectar una amplia variedad de condiciones de falla, mientras que cualquier técnica de monitoreo de condición sólo puede ser utilizada para monitorear un tipo de falla potencial específico.
- puede ser muy costo-eficaz si el monitoreo es realizado por personas que de todos modos están cerca de los activos físicos en el transcurso de sus tareas normales.
- un ser humano es capaz de juzgar la gravedad de una falla potencial y por ende decidir acerca de qué acciones serán apropiadas, mientras que un dispositivo de monitoreo de condición sólo puede realizar lecturas y enviar una señal.

Selección de la Categoría Correcta

Muchos modos de falla son precedidos por más de una – a menudo varias – fallas potenciales diferentes, por lo que puede encontrarse más de una categoría de tareas a condición. Cada una de ellas tendrá un intervalo P-F diferente, y cada una requerirá diferentes tipos y niveles de habilidad.

Por ejemplo, consideremos un rodamiento de bolillas cuya falla se describe como "agarrotamiento del rodamiento debido al uso y desgaste normal". La Figura 7.8 muestra cómo esta falla puede estar precedida por una variedad de fallas potenciales, cada una de las cuales podría ser detectada por una tarea a condición diferente.

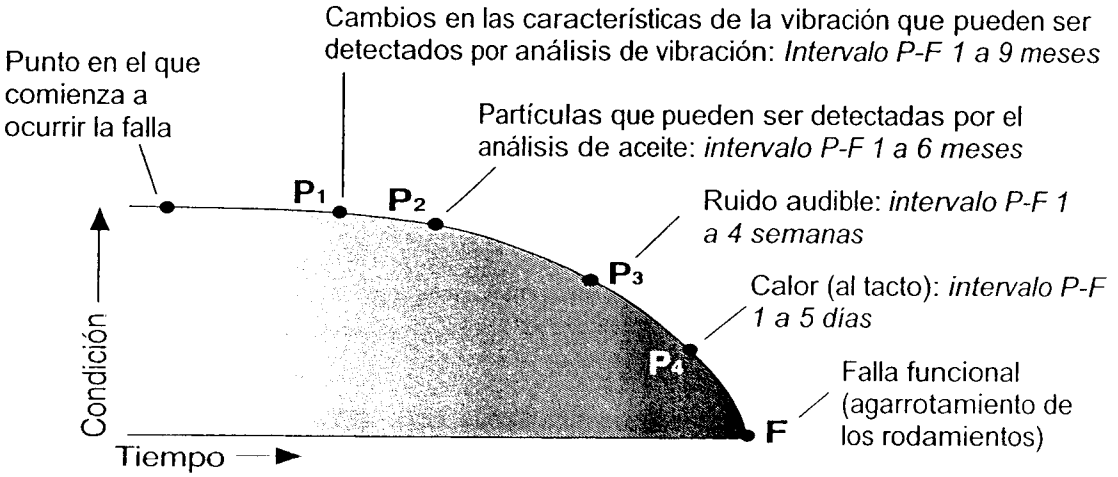


Figura 7.8:
Diferentes fallas potenciales que pueden preceder a un modo de falla

Esto no significa que todos los rodamientos vayan a exhibir estas fallas potenciales, ni tampoco necesariamente tendrán los mismos intervalos P-F. Hasta qué punto una técnica cualquiera es técnicamente factible, y que merece la pena ser realizada depende mucho del contexto operacional del rodamiento. Por ejemplo:

- el rodamiento puede estar instalado en la máquina en una ubicación tal que resulte imposible monitorear sus características de vibración
- sólo es posible detectar partículas en el aceite si el rodamiento está operando dentro de un sistema de lubricación totalmente cerrado
- los niveles de ruido de fondo pueden ser tan elevados que sea imposible detectar el ruido producido por un rodamiento averiado
- puede ser imposible llegar al alojamiento del rodamiento para comprobar cuán caliente está.

Esto significa que ninguna categoría de tarea por sí sola, será siempre más costo – eficaz que otra. Es importante tener esto en mente, porque en ciertos ámbitos hay una tendencia a presentar al *monitoreo de condición* en particular como "la respuesta" a todos nuestros problemas de mantenimiento.

De hecho, si el RCM es correctamente aplicado a un típico sistema industrial moderno y complejo, es posible encontrar que el monitoreo de condición, como se define en esta parte de este capítulo, es técnicamente factible tan solo para un 20% de los modos de falla, y que solamente merece la pena hacerlo en la mitad o menos de estos casos. (El conjunto de las cuatro categorías de mantenimiento a condición sumadas, generalmente son apropiadas para abordar del 25 al 35% de los modos de falla.) Esto no significa que no debe utilizarse el monitoreo de condición -en los casos en los que es bueno, es realmente muy bueno- pero también debemos recordar que tenemos que desarrollar estrategias apropiadas para encarar el 90% de los modos de falla restantes. En otras palabras, el monitoreo de condición es sólo una parte de la respuesta – y una parte considerablemente pequeña.

Por lo tanto para evitar desviaciones innecesarias en la selección de tareas, necesitamos:

- considerar *todas* las advertencias que tienen posibilidad de preceder cada modo de falla, junto con el espectro *completo* de tareas a condición que podrían ser utilizadas para detectar esas advertencias.
- Aplicar rigurosamente el criterio de selección de tareas de RCM para determinar cuál de ellas (si existe alguna) es la más costo – eficaz para anticipar el modo de falla en consideración.

Como en muchos otros casos de mantenimiento, la elección "correcta" finalmente depende del contexto operacional en el cual funciona el activo físico.

7.5 Tareas a Condición: Algunos escollos

Cuando se considera si es técnicamente posible el mantenimiento a condición, se necesita prestar un cuidado especial a dos temas. Estos se refieren a la distinción entre fallas potenciales y funcionales, y la distinción entre falla potencial y edad. Dichos temas se discuten detalladamente a continuación

Fallas potenciales y funcionales

En la práctica, a veces existe cierta confusión al distinguir entre fallas potenciales y funcionales. Esto pasa porque ciertas condiciones pueden ser consideradas correctamente como fallas potenciales en un contexto determinado y como fallas funcionales en otro. Esto es muy común en el caso de fugas.

Por ejemplo, una fuga menor en una junta de bridas de una tubería puede considerarse como una falla potencial si la tubería transporta agua. En este caso, la tarea a condición podría ser "Controlar que las juntas de la tubería no tengan pérdidas". La frecuencia de la tarea se basa en la cantidad de tiempo que le toma a una fuga "aceptablemente" pequeña convertirse en una fuga "inaceptablemente" grande, e iniciar una acción correctiva adecuada cuando se descubra una fuga menor.

Pero, si la tubería transporta una sustancia tóxica como cianuro, ninguna fuga, por pequeña que sea, puede ser considerada como falla potencial. En este caso no es viable pedirle a nadie que verifique si existen pérdidas, con lo que necesitamos encontrar algún otro método para manejar la falla. Esto casi con certeza traerá aparejado alguna clase de modificación.

Este ejemplo refuerza la importancia de acordar qué quiere decirse con falla funcional *antes* de considerar qué debe hacerse para prevenirla.

El intervalo P-F y el tiempo de operación

Cuando se aplican estos principios por primera vez, por lo general la gente tiene ciertas dificultades para distinguir entre la "vida" de un componente y el intervalo P-F. Esto los lleva a basar las frecuencias de las tareas a condición sobre la "vida" real o imaginaria del elemento. Si existe, esta vida es por lo general varias veces mayor al intervalo P-F, con lo que la tarea logra poco o nada. En realidad, medimos la vida de un componente hacia delante desde el momento en que entra en servicio. El intervalo P-F se mide hacia atrás desde la falla funcional, con lo que los dos conceptos por lo general no tienen nada que ver uno con el otro. La distinción es importante porque las fallas que no están relacionadas con la edad (dicho de otra manera, fallas aleatorias) pueden ser precedidas por una advertencia de la misma manera que aquellas que lo están.

Por ejemplo, la Figura 7.9 representa un componente que tiene un patrón de fallas aleatorio (patrón E). Uno de los componentes falló después de 5 años, el segundo en seis meses y el tercero después de dos años. En cada caso, la falla funcional estuvo precedida por una falla potencial con un intervalo P-F de cuatro meses.

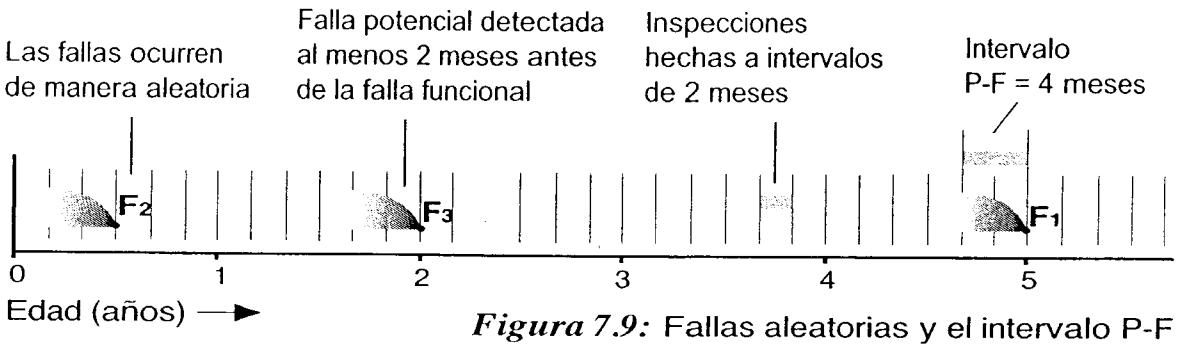


Figura 7.9: Fallas aleatorias y el intervalo P-F

La Figura 7.9 muestra que para detectar la falla potencial, necesitamos hacer la tarea de inspección cada 2 meses. Como la falla ocurre de manera aleatoria, no sabemos cuándo va a ocurrir la próxima, con lo cual el ciclo de inspecciones debe comenzar en el mismo momento en que el elemento se pone en servicio. En otras palabras, los tiempos de inspección no tienen nada que ver con la edad o la vida del componente.

No obstante, esto no significa que las tareas a condición se aplican sólo a los elementos que fallan de manera aleatoria. También se pueden realizar en elementos que tienen patrones de falla relacionados con la edad, como se explica más adelante en este capítulo.

7.6 Curvas P-F Lineales y No-Lineales

En la primer parte de este capítulo se explicó que las últimas etapas de deterioro pueden describirse con la curva P-F. En esta parte, analizaremos dicha curva con más detalle, viendo en principio las curvas P-F no-lineales y luego considerando las lineales.

Las últimas etapas de deterioro

La Figura 7.1 de la Página 148 sugiere que por lo general el deterioro se acelera en las etapas finales. Para ver por qué esto es así, consideremos con más detalle qué pasa cuando falla un rodamiento a bolillas por "uso y desgaste normal".

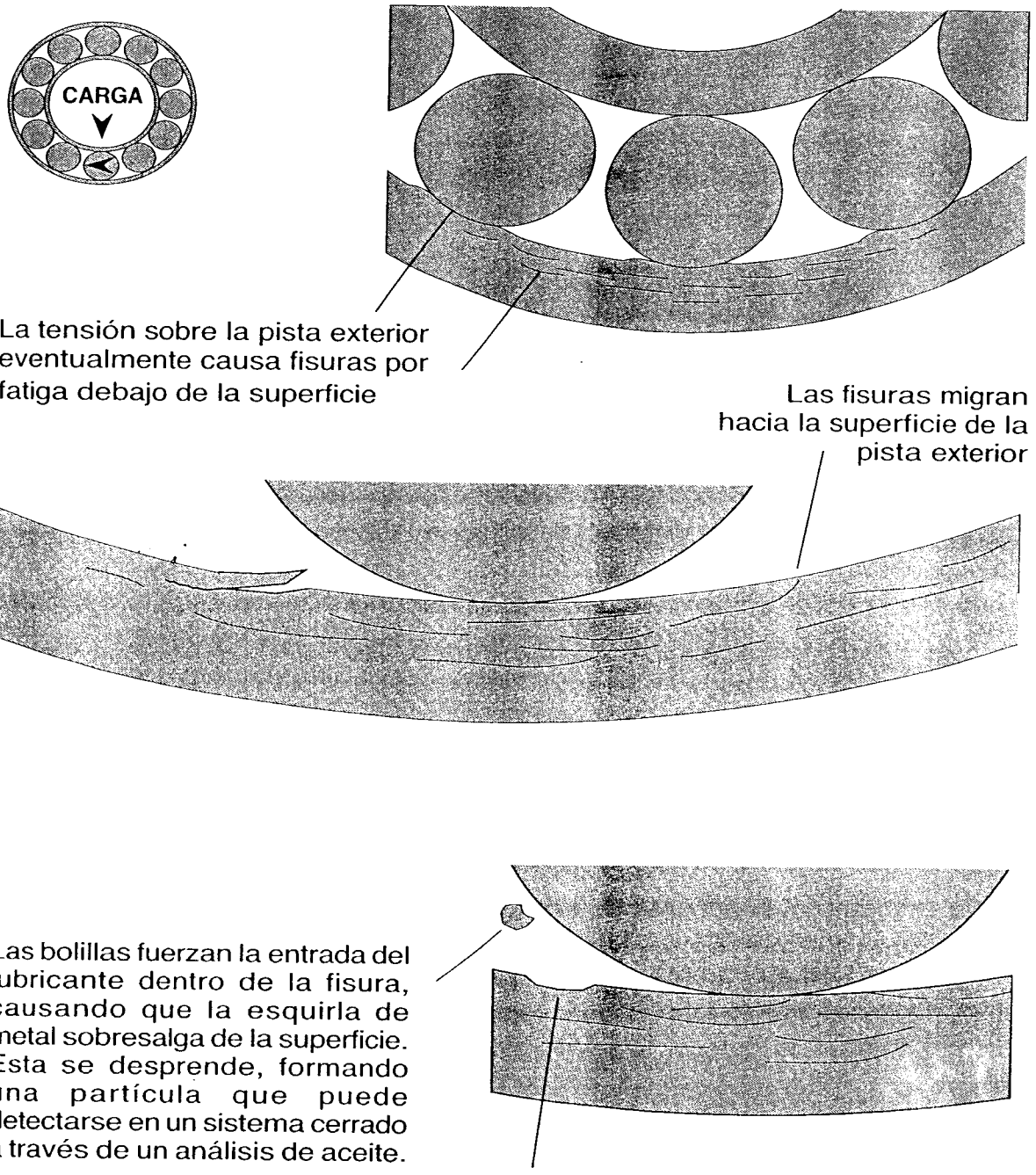
En la página siguiente, la Figura 7.10 muestra un típico rodamiento a bolillas cargado verticalmente que gira en el sentido de las agujas del reloj. La parte más solicitada del rodamiento en cuanto a carga y frecuencia será la parte inferior de la pista externa. Cuando el rodamiento rota, la superficie interna de la pista externa se mueve hacia arriba y hacia abajo a medida que pasan cada una de las bolillas. Este movimiento cíclico es muy pequeño, pero es suficiente como para causar fisuras por fatiga debajo de la superficie, las cuales se desarrollan como lo muestra la Figura 7.10.

La Figura 7.10 también explica cómo esas fisuras eventualmente dan lugar a síntomas detectables de deterioro. Estos síntomas evidentemente son fallas potenciales, y los intervalos P-F asociados se muestran en la Figura 7.8 en la página 158. De este ejemplo surgen varios puntos adicionales sobre fallas potenciales, como ser:

- En el ejemplo, el proceso de deterioro se acelera. Esto indica que si una técnica cuantitativa como ser un análisis de vibraciones se usa para detectar fallas potenciales, no podemos predecir cuándo ocurrirá la falla dibujando una línea recta basada sólo en dos observaciones.

  Esto a su vez lleva a pensar que después de observar una desviación inicial, las mediciones de vibración deben tomarse a intervalos progresivamente más cortos hasta alcanzar un punto en el cual se deba hacer algo. En la práctica, esto sólo se puede hacer si el intervalo P-F es lo suficientemente largo para permitir mediciones adicionales. Esto tampoco escapa al hecho que las lecturas iniciales necesitan tomarse a frecuencias que, como se sabe, sean menores que el intervalo P-F.

  (De hecho, si se conoce bien la forma de la curva P-F y el intervalo P-F es razonablemente consistente, no sería necesario tomar mediciones adicionales después de descubrir el primer signo de desviación. Esto sugiere que sólo debería hacerse un seguimiento del proceso de deterioro tomando mediciones adicionales si no se entiende del todo la curva P-F o si el intervalo P-F es muy inconsistente.)



El cráter que deja cambia las características de vibración del rodamiento, y puede detectarse a priori por un análisis de vibraciones. A medida que las bolillas pasan sobre el cráter, lo van haciendo cada vez más grande. En poco tiempo se dañan las bolillas porque no ruedan sobre una superficie lisa. Llega un momento en que el rodamiento comienza a hacer ruido y luego comienza a calentarse. El deterioro se acelera hasta que llega un momento en el que las bolillas se desintegran y el rodamiento se agarrota.

Figura 7.10:
Cómo falla un cojinete a bolillas debido al "uso y desgaste normal"

- Muchas veces diferentes modos de falla pueden mostrar síntomas similares.

  Por ejemplo, los síntomas descriptos en la Figura 7.10 se basan en la falla causada por el uso y desgaste normal. Pero los síntomas que se presentan en las últimas etapas de las fallas causadas por suciedad, falta de lubricante o brinelling pueden ser muy parecidas.

  En la práctica, sólo pueden determinarse las causas raíz de muchas fallas usando instrumentos sofisticados. Por ejemplo, podría determinarse la causa raíz de la falla de un rodamiento usando un ferrograma para separar las partículas del aceite lubricante y examinar las partículas con un microscopio electrónico.

  No obstante, si dos fallas diferentes tienen los mismos síntomas y si sus períodos P-F son muy similares para cada conjunto de síntomas –como es probable que sea para los ejemplos de los rodamientos- la distinción de las causas raíz es totalmente irrelevante desde el punto de vista de la *detección* de la falla. (por supuesto que la distinción es importante si lo que estamos buscando es *eliminar* la causa raíz de la falla.)

- La falla se vuelve detectable sólo cuando las fisuras por fatiga migran hacia la superficie y la superficie comienza a despedazarse. El punto en el que pasa esto en la vida de cualquier rodamiento depende de la velocidad de rotación del mismo, de la cantidad de carga que soporta, cuánto rota la pista exterior misma, si se daño la superficie del rodamiento antes o durante la instalación, cuánto se recalienta el rodamiento en servicio, la alineación del eje respecto del soporte del rodamiento, los materiales con los que se fabricó el rodamiento, su calidad de fabricación, etc. Esta combinación de variables hace que sea imposible predecir cuántos ciclos operativos se necesitan para que las fisuras alcancen la superficie, y por consiguiente es imposible determinar cuándo el rodamiento comenzará a exhibir los síntomas mencionados en la Figura 7.10. (Para aquellos que estén interesados en estudiar este punto con mayor profundidad, la teoría del caos –en particular el "efecto mariposa"– muestra como las pequeñas diferencias que existen entre las condiciones iniciales que se aplican a cualquier sistema dinámico conducen con el paso del tiempo a diferencias importantes. Esto podría explicar porqué pequeñas variaciones entre las condiciones iniciales de dos cojinetes de elementos rodantes pueden llevar a enormes diferencias entre las edades en las cuales cada uno de ellos falla. Ver Gleick[1987]).

En la mayoría de las fallas el deterioro se acelera en las etapas finales. Por ejemplo, el deterioro tiende a acelerarse cuando se comienzan a aflojar los pernos, cuando los elementos de los filtros se tapan, cuando las correas en V se aflojan y empiezan a patinar, cuando los contactores eléctricos se recalientan, cuando las juntas comienzan a fallar, cuando los rotores se desbalancean, etc. Pero no se aceleran en todos los casos.

Curvas P-F lineales

Si un elemento se deteriora de manera mas o menos lineal durante su vida, puede pensarse que en las etapas finales de su deterioro también lo hará de manera mas o menos lineal. Si observamos con mayor detenimiento las Figuras 6.2 y 6.3 veríamos que esto podría darse en las fallas relacionadas con la edad.

Por ejemplo, consideremos el desgaste de neumáticos. La superficie de un neumático tiende a desgastarse de manera mas o menos lineal hasta que la profundidad del dibujo alcance el mínimo permitido por ley. Si este mínimo es (por ejemplo) de 2mm, sería posible especificar una profundidad de dibujo mayor que 2mm, la cual de un aviso de que la falla funcional es inminente. Evidentemente éste será el nivel de falla potencial.

Si la falla potencial se determina a (por ejemplo) 3mm, el intervalo P-F será la distancia que se espera que recorra esta cubierta mientras la profundidad del dibujo no pase de 3mm a 2mm, como se muestra en la Figura 7.11.

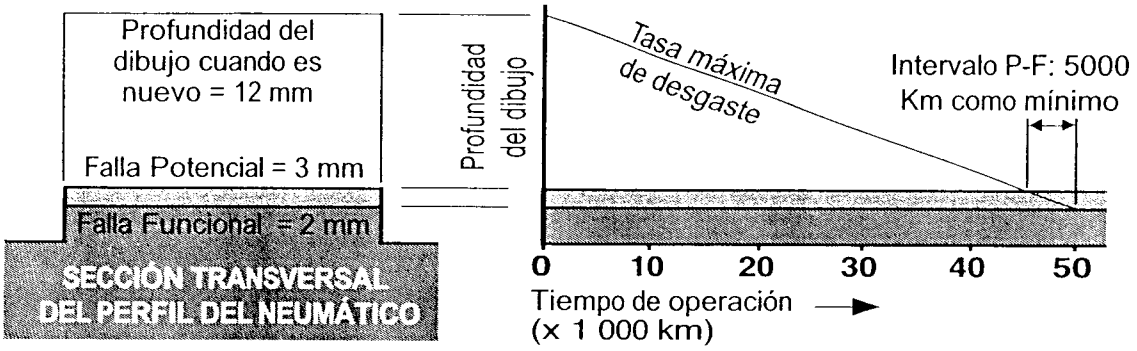


***Figura 7.11**: Una curva P-F lineal*

La Figura 7.11 también sugiere que si la cubierta es puesta en servicio con una profundidad de dibujo de (por ejemplo) 12mm, sería posible predecir el intervalo P-F basándose en la distancia total que por lo general se recorre antes de que la cubierta sea recapada. Por ejemplo, si las cubiertas duran como mínimo 50000 km antes de tener que ser recapadas, es razonable pensar que las cubiertas se desgastan a una tasa máxima de 1mm cada 5000 km. recorridos. Esto da un intervalo P-F de 5000 km. La tarea a condición asociada para el conductor podría ser:

> "chequear la profundidad del dibujo cada 2500 km. e informar sobre aquellas cubiertas que tienen un dibujo menor a 3mm."

Con esta tarea no solo aseguramos que el desgaste se detecte antes de que exceda el límite legal, sino que también dé suficiente tiempo - 2500 km. en este caso- a los operadores del vehículo para planear cuando se cambiará la cubierta antes de que alcance el límite.

En general, el deterioro lineal entre los puntos "P" y "F" sólo podría encontrarse donde los mecanismos que fallan estén relacionados de alguna manera con la edad (excepto en el caso de fatiga, que es un caso más complejo. Este proceso de falla se discute con mayor detalle mas adelante.)

Nótese que el intervalo P-F y la frecuencia asociada a la tarea sólo puede ser deducida de esta manera si el deterioro es lineal. Como vimos, el intervalo P-F no se puede determinar de esta manera si el deterioro se acelera entre "P" y "F".

Un tema a tener en cuenta en las fallas lineales es el punto en el cual deben empezar a buscarse fallas potenciales.

Por ejemplo, la Figura 7.11, sugiere que podría ser una pérdida de tiempo medir la profundidad total del dibujo de la cubierta a los 10000 o 20000 km., porque sabemos que sólo nos acercamos al punto de la falla potencial a los 50000 km. con lo que quizás sólo deberíamos empezar a medir la profundidad del dibujo de la cubierta después de que halla pasado el punto en el cual sabemos que el dibujo será aproximadamente de 3mm – dicho de otra manera, cuando la cubierta halla estado en servicio más de (por ejemplo) 40000 km. Pero, si queremos aseguramos que este régimen de chequeo se adopte en la práctica, consideremos como deben ser planeados los chequeos de un camión de 4 ruedas si el historial de un juego de ruedas es el siguiente:

Item	**Distancia recorrida por el camión y por cada rueda**			
Camión	140.000	142.500	145.000	147.500
Rueda delantera izquierda	47.500	50.000	52.500	1.000 *
Rueda delantera derecha	22.000	24.500	27.000	29.500
Rueda trasera izquierda	12.500	2.000†	4.500	7.000
Rueda trasera derecha	38.500	40.500	43.000	45.500

* La profundidad del dibujo de la rueda delantera izquierda es menor a 3mm y la rueda se reemplazó en depósito

+ A los 13.000 km. se reventó la rueda a causa de un clavo – reemplazada por una nueva

Si realmente estamos tratando que el conductor chequee las cubiertas después de que hallan estado en servicio durante 40.000 km., tenemos que implementar un sistema que le diga que:

- Comience a controlar la rueda delantera izquierda sólo cuando el camión haya alcanzado los 132.500 Km.
- Controle las ruedas delantera izquierda y trasera derecha cuando el camión haya hecho 142.500Km
- Hacerlo nuevamente a los 145.000Km
- Sólo controlar la cubierta trasera derecha a los 147.500Km.

Evidentemente esto no tiene mucho sentido, ya que el costo de administrar un sistema de planeamiento como este va a ser mucho mayor que pedirle simplemente al chofer que controle la profundidad del dibujo de cada cubierta cada 2500Km. Dicho de otra manera, en este ejemplo el costo de refinar el sistema de planeamiento será mucho mayor que el costo de hacer las tareas. Con lo que pediremos directamente al conductor que controle la profundidad del dibujo de cada una de las ruedas cada 2500 km., y no que preste atención a ruedas específicas.

Pero, si el proceso de deterioro es lineal y la tarea es muy costosa, entonces podría ser útil asegurarse que se comience a controlar la aparición de fallas potenciales solo cuando es realmente necesario.

Por ejemplo, si una tarea a condición implica apagar y desarmar una gran turbina para chequear si los discos de la turbina tienen fisuras, y nosotros tenemos certeza de que el deterioro sólo se vuelve detectable después de que la turbina estuvo en servicio durante una determinada cantidad de tiempo (en otras palabras, la falla está relacionada con la edad), entonces deberíamos sólo empezar a sacar la turbina de servicio para

controlar la aparición de fisuras después de que halla pasado la edad en la cual hay una posibilidad razonable de poder detectar la aparición de fisuras. No obstante, la frecuencia de los chequeos se basa en la tasa a la cual una fisura detectable es probable que se convierta en una falla.

La edad a la cual una fisura es posible que comience a ser detectable se llama vida hasta el inicio de fisura, mientras que el tiempo (o el número de ciclos de carga) que pasa desde el momento en que la fisura se vuelve detectable hasta que se vuelve tan grande que el elemento falla se conoce como la vida de propagación de falla.

En casos como este, el costo de hacer la tarea debe ser mucho mayor que el costo del sistema de planificación asociado, con lo que es útil asegurarse que sólo empezaremos a hacer las tareas cuando son realmente necesarias. Pero, si se cae en que este refinamiento es útil, debe recordarse que el proceso de planeamiento conlleva dos intervalos diferentes:

- El primer intervalo se usa para decidir *cuándo se debe comenzar* a realizar la tarea a condición. Ésta es la edad de operación en la cual la falla potencial comienza a hacerse detectable.
- El segundo intervalo determina qué tan seguido debemos hacer las tareas después de que se alcanzó dicha edad. Este intervalo es por supuesto el *intervalo P-F*.

Por ejemplo, podría ser que el disco de la turbina no desarrolle ninguna fisura detectable hasta que halla estado en servicio al menos 5000 horas, pero que le tome a una fisura detectable como mínimo 10000 horas el deteriorarse hasta convertirse en una falla del disco. Esto sugiere que no necesitamos empezar a controlar las fisuras hasta que el elemento halla estado en servicio 5000 horas, pero luego debe ser chequeado a intervalos de menos de diez mil horas.

El plancar con este grado de sofisticación requiere un entendimiento muy profundo del modo de falla considerado, junto con un sistema de planeamiento sofisticado. En la práctica, sólo algunos modos de falla se comprenden tan profundamente. Aún una vez conocidos, muy pocas organizaciones poseen sistemas de planeamiento que puedan cambiar de un intervalo de tiempo a otro como se describió anteriormente, con lo que este tema necesita ser afrontado con cuidado.

Para cerrar esta discusión debe remarcarse que todas las curvas - P-F y dependientes de la edad – que han sido explicadas en esta parte del presente capítulo han sido desarrolladas *para un modo de falla a la vez.*

Por ejemplo, en el ejemplo de las cubiertas el proceso de falla fue desgaste "normal". Diferentes modos de falla (como ser el desgaste excesivo de una zona de la cubierta por una frenada de emergencia o el daño de una llanta por un golpe fuerte) podría hacer que se llegara a diferentes conclusiones ya que tanto las características técnicas como las consecuencias de estos modos de falla son diferentes.

Este es un punto importante para especular sobre la naturaleza de las curvas P-F en general, pero es completamente otro tema el determinar la magnitud del intervalo P-F en la práctica. Este tema se considera en la próxima sección de este capítulo.

7.7 Cómo determinar el Intervalo P-F

Generalmente es fácil determinar el intervalo P-F para modos de falla relacionados con la edad cuyas etapas finales de deterioro son lineales. Se hace aplicando un lógica similar a la que se utilizó anteriormente en el ejemplo de las cubiertas. Por otro lado, puede ser sorprendentemente difícil determinar el intervalo P-F en el caso de fallas al azar en las cuales el deterioro se acelera. El principal problema con las fallas al azar es que no sabemos cuando va a ocurrir la próxima falla, con lo que tampoco sabemos cuando el próximo modo de falla va a comenzar su camino descendente en la curva P-F. Con lo que si ni siquiera sabemos cuándo comenzará la curva P-F, ¿cómo vamos a saber qué tan larga es? Los párrafos siguientes revén las cinco posibilidades, sólo la cuarta y quinta tienen algún mérito.

Observación continua

Teóricamente, es posible determinar el intervalo P-F observando continuamente el elemento que esta en servicio hasta que ocurre una falla potencial, notando cuándo pasa esto y luego observando el elemento hasta que falle por completo. (nótese que no podemos diagramar una curva P-F completa observando el elemento intermitentemente, porque cuando tarde o temprano descubramos que ha fallado todavía no sabremos con precisión cuándo comenzó el proceso de falla. Es más, si intervalo P-F es menor que la intermitencia del período de observación podríamos perder toda la curva P-F, en dicho caso tendríamos que empezar todo de nuevo pero con un nuevo elemento.)

Evidentemente esto es poco práctico, primero porque la observación continua es muy cara - especialmente si estamos tratando de establecer de esta manera cada uno de los puntos del intervalo P-F. Segundo, esperar hasta que ocurra la falla funcional significa que el elemento realmente tiene que fallar. Esto puede acabar con nosotros diciéndole a nuestro jefe después que (por ejemplo) el compresor halla explotado: "Oh, sabíamos que iba a fallar, pero queríamos ver cuanto tiempo iba a pasar hasta que explotara para poder determinar el intervalo P-F"

Comenzar con un intervalo corto y extenderlo gradualmente

Lo poco práctico que resulta el enfoque anterior lleva a algunas personas a sugerir que el intervalo P-F se puede establecer comenzando los controles a un intervalo muy corto y arbitrario (10 días), y después esperar hasta que "encontremos cual debe ser el intervalo", tal vez extendiendo gradualmente el intervalo. Desafortunadamente este vuelve a ser el punto en el cual ocurre la falla funcional, con lo que nuevamente terminaremos haciendo explotar el compresor.

Por supuesto este enfoque es potencialmente muy peligroso, porque tampoco hay garantía que el intervalo inicial determinado arbitrariamente, sin importar cuán corto sea, vaya a ser menor que el intervalo P-F con el que debiera empezarse (a menos que se analice seriamente el proceso de falla).

Intervalos arbitrarios

Las dificultades asociadas con los dos enfoques descriptos anteriormente hacen que algunas personas sugieran -con bastante seriedad- que podría seleccionarse algún intervalo arbitrario "razonablemente corto" para *todas* las tareas a condición. Este enfoque arbitrario es la manera menos satisfactoria (y la más peligrosa) de determinar las frecuencias de las tareas a condición, ya que nuevamente no existe ninguna garantía de que el intervalo arbitrario "razonablemente corto" vaya a ser mas corto que el intervalo P-F. Por otro lado, el intervalo P-F verdadero puede ser mucho mas largo que el intervalo arbitrario, en dicho caso se termina haciendo la tarea mucho mas seguido de lo necesario.

Por ejemplo, si una tarea diaria realmente necesita ser hecha sólo una vez por mes, la tarea nos está costando treinta veces más de lo que debiera.

Investigación

La mejor manera de establecer un intervalo P-F preciso es simulando la falla de tal manera que no haya consecuencias serias cuando eventualmente ocurra. Por ejemplo, se hace esto cuando se ensayan a la rotura componentes de aviones en la tierra y no en el aire. Esto no solamente provee información acerca de la vida del componente, como se vio en el Capítulo 6, sino que también permite que los observadores estudien con comodidad cómo se desarrolla la falla y qué tan rápido sucede. No obstante, el ensayo de laboratorio es costoso y toma tiempo obtener resultados aún cuando es acelerado. Con lo cual sólo vale la pena en los casos donde un gran número de componentes están en riesgo – como ser una flota aérea – y las fallas tienen consecuencias muy serias.

Un enfoque racional

Los párrafos anteriores indican que en la mayoría de los casos, es imposible, poco práctico o muy caro tratar de determinar los intervalos P-F sobre una base empírica. Por otro lado, es mucho mas desacertado simplemente tomar un intervalo corto sin tener ninguna información. A pesar de estos problemas, los intervalos P-F pueden estimarse con una precisión sorprendente basados en el criterio y la experiencia.

El primer secreto es hacer la pregunta correcta. Es esencial que cualquiera que trate de determinar un intervalo P-F comprenda que estamos preguntando *cuán rápido el elemento falla*. Dicho de otra manera estamos preguntando cuánto tiempo (o cuántos ciclos de carga) pasan desde el momento en el que

la falla potencial se vuelve detectable hasta el momento en el que alcanzan el estado de falla funcional. *No* estamos preguntando qué tan seguido falla o cuánto dura.

El segundo secreto es preguntarle a la gente correcta – gente que tiene un conocimiento profundo del activo, la forma en la que falla y los síntomas de cada falla. Para la mayoría de los equipos, esto significa preguntarle a la gente que opera el equipo, a la persona de mantenimiento que se encarga de mantenerlo y a sus supervisores inmediatos superiores. Si el proceso de detección requiere de instrumentos especializados como ser equipo de monitoreo de condición, el especialista apropiado también debe formar parte del equipo de análisis.

En la práctica, el autor ha encontrado que una forma efectiva de cristalizar el pensamiento sobre el intervalo P-F es dando un número de "referencia" sobre el cual cada uno pueda empezar a discutir. Por ejemplo uno podría preguntar: "¿piensan que el intervalo P-F es del orden de días, semanas o meses?". Si la respuesta es (por ejemplo) semanas, el próximo paso es preguntar: "¿una, dos, cuatro u ocho?".

Si el grupo consigue el consenso, se establece el intervalo P-F y el analista pasa a considerar otro criterio de selección de tareas como ser la consistencia del intervalo P-F y si el intervalo neto es lo suficientemente largo para evitar las consecuencias de la falla.

Si no hay consenso, no es posible dar una respuesta positiva a la pregunta "¿cuál es el intervalo P-F?". Cuando sucede esto, la tarea a condición asociada debería abandonarse como una forma de detectar el modo de falla en consideración, y la falla debe ser tratada de alguna otra manera.

El tercer secreto es concentrarse en un modo de falla a la vez. Dicho de otra manera, si el modo de falla es desgaste, el analista se debe concentrar en las características del desgaste, y no debería discutir (por ejemplo) corrosión o fatiga (a menos que los síntomas del otro modo de falla sean casi idénticos y la tasa de deterioro sea también muy similar).

Para finalizar, debe entenderse de manera clara por cada una de las personas que forman parte de este tipo de análisis que el objetivo es el obtener un intervalo de tarea a condición que sea mas corto que el intervalo P-F, pero no tanto como para estar derrochando recursos.

La efectividad de este tipo de grupos se duplica si la gerencia manifiesta su aprecio por el hecho de que está realizado por seres humanos, y los humanos no son infalibles. Pero, el analista debe prestar atención en que si la falla tiene consecuencias sobre la seguridad, el precio de hacer las cosas mal será (literalmente) fatal para ellos mismos o para sus colegas, por lo que necesitan tener un cuidado especial en esta área.

7.8 Cuándo Vale la Pena Realizar Tareas a Condición

Las tareas a condición deben satisfacer los siguientes criterios para que merezcan la pena realizarlas:

- si una falla es *oculta*, no tiene consecuencias directas. Entonces la tarea a condición a realizar para prevenir una falla oculta, debe reducir el riesgo de una falla múltiple a un nivel tolerablemente bajo. En la práctica, debido a que la función es oculta, muchas de las fallas potenciales que normalmente afectan a las funciones evidentes también serán ocultas. Más aún: muchos de estos tipos de equipos sufren fallas aleatorias cuyos intervalos P-F son muy cortos o no existen, con lo cual frecuentemente no puede encontrarse una tarea a condición que sea técnicamente factible y que merezca la pena ser realizada para una función oculta. Esto no quiere decir que no hay que buscarla.
- si la falla tiene consecuencias para la *seguridad* o el *medio ambiente*, sólo merece la pena realizar una tarea a condición si se puede confiar en que da suficiente advertencia de la falla como para que se pueda actuar a tiempo para evitar las consecuencias para la seguridad o el medio ambiente.
- si la falla no afecta a la seguridad, la tarea debe ser costo–eficaz. Entonces en un período de tiempo, el costo de realizar la tarea a condición debe ser menor al costo de no hacerla. La pregunta de la costo–eficacia se aplica a fallas con consecuencias operacionales y no operacionales, de la siguiente manera:
  - Las consecuencias *operacionales* son por lo general costosas. Entonces es probable que una tarea a condición que reduce la frecuencia con la que ocurren las consecuencias operacionales sea costo–eficaz. Eso se debe a que el costo de la inspección generalmente es bajo. Esto se ilustró en el ejemplo de las páginas 109 y 110.
  - El único costo de una falla funcional que tiene consecuencias *no operacionales* es el de reparación. A veces esto es casi lo mismo que el costo de rectificar la falla potencial que la precede. En tales casos, aún cuando sea factible realizar una tarea a condición, no sería costo-eficaz, porqué, a través de un período de tiempo, el costo de la inspección más el costo de corregir las fallas potenciales sería mayor que el costo de reparar la falla funcional (ver la páginas 112 y 113). Sin embargo, se puede justificar una tarea a condición si cuesta mucho más reparar la falla funcional que la falla potencial, especialmente si la primera causa daños secundarios.

7.9 Selección de Tareas Proactivas

Generalmente no es difícil decidir si una tarea proactiva es *técnicamente factible*. Esta decisión está determinada por las características de la falla, y generalmente son lo suficientemente claras como para que la decisión sea una simple cuestión de sí o no.

Decidir si *merecen la pena* ser realizadas suele requerir pensar un poco más. Por ejemplo, la Figura 7.8 indica que puede ser técnicamente factible que dos o más tareas de *la misma* categoría prevengan el mismo modo de falla. Hasta pueden ser tan similares en términos de costo–eficacia que la elección puede transformarse en una cuestión de preferencia personal.

La situación se complica más cuando tenemos tareas que son técnicamente factibles de dos categorías *diferentes* para el mismo modo de falla.

Por ejemplo, hoy en día la mayoría de los países especifican una profundidad mínima legal para el dibujo de las cubiertas (por lo general de 2mm). Las cubiertas que tienen un dibujo con una profundidad menor deben ser reemplazadas o recapadas. En la práctica, las ruedas de los camiones –especialmente las cubiertas similares de flotas de camiones que trabajan recorriendo la misma ruta- denotan una marcada relación entre la edad y la falla. El recapado restaura casi completamente la resistencia original a la falla, con lo que podría programarse el recapado de las cubiertas una vez que estas hayan recorrido una distancia determinada. Esto quiere decir que por más que no sea necesario, todas las cubiertas de la flota de camiones serán recapadas después de que hayan recorrido una cantidad específica de kilómetros.

La Figura 6.4 del Capítulo 6, que abajo mostramos de nuevo como la Figura 7.12, podría graficarse para una flota de camiones de este tipo. Esta figura muestra que en términos de desgaste normal, todas las ruedas duran entre 50 000 y 80 000 km. Si sobre esta base se adopta una política de reacondicionamiento programado, existe un rápido incremento de la probabilidad condicional de este modo de falla a los 50 000 km. y ninguna de estas fallas ocurren antes de esta edad, con lo que todas las cubiertas deberían recaparse a los 50 000 km. Pero, si adoptáramos esta política recaparíamos muchas cubiertas mucho antes de que sea realmente necesario. En algunos casos, las cubiertas que podrían haber durado 80 000 km. serían recapadas a los 50 000 km., con lo que se podría perder hasta 30 000 km. de vida útil.

Por otro lado, como se discutió en la parte 6 de este capítulo, para las cubiertas es posible definir una condición de falla potencial relacionada con la profundidad del dibujo. Controlar la profundidad del dibujo es rápido y fácil, con lo que es cuestión de chequear las cubiertas cada 2500 km. y sólo si fuera necesario, hacer los

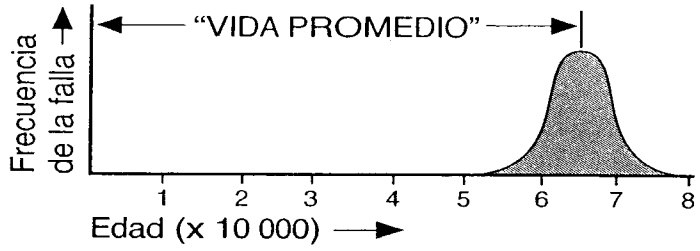


Figura 7.12: Falla de cubiertas debido a desgaste normal en una flota de camiones hipotética

arreglos para cambiarlas. Esto permitiría que el operador de la flota de camiones obtuviera de sus cubiertas un promedio de 65 000 km. (en términos de desgaste normal) sin poner en riesgo a sus choferes, en vez de los 50 000 km. que obtendrían si hicieran el reacondicionamiento programado descripto anteriormente –un incremento de la vida útil de un 30%. Con lo que en este caso la tarea a condición es mucho más costo-eficaz que el reacondicionamiento programado.

Este ejemplo sugiere que el orden básico de preferencia para seleccionar tareas proactivas es el siguiente:

Tareas a condición

Las tareas a condición son consideradas *primero* en el proceso de selección de tareas, por las siguientes razones:

- casi siempre pueden ser realizadas sin desplazar el activo físico de su ubicación y generalmente mientras continúa en servicio, con lo que es raro que interfieran con el proceso de producción. También son fáciles de organizar.
- identifican condiciones *específicas* de falla potencial, de modo que se puede definir claramente la acción correctiva antes de que comience el trabajo. Esto reduce la cantidad de trabajos de reparación, y hace posible realizarlos más rápidamente.
- identificar el punto de falla potencial en los equipos, les permite cumplir con casi toda su vida útil (como se ilustra en el ejemplo de las cubiertas).

Tareas de reacondicionamiento y de sustitución cíclica

Si no puede encontrarse una tarea a condición apropiada para un modo de falla en particular, la opción siguiente es una tarea de reacondicionamiento o de sustitución cíclica. Si esta tarea cumple con los criterios de factibilidad técnica y de conveniencia de realización descriptos en el Capítulo 6, debería reducir de manera significativa las consecuencias de las fallas a las que está dirigida. Pero, estas dos categorías de tareas también tienen desventajas significativas:

- solamente puede realizarse con la máquina detenida y (generalmente) requieren envío al taller, por lo que estas tareas casi siempre afectan de alguna manera a la producción
- el límite de edad se aplica a todos los elementos, entonces muchos elementos o componentes que podrían haber sobrevivido más tiempo serán removidos.
- Las tareas de reacondicionamiento involucran trabajos de taller, por lo que generan una carga de trabajo mucho mayor que las tareas a condición.

Estas desventajas indican que cuando ambas categorías son técnicamente factibles, las tareas a condición son casi siempre más costo-eficaz que el reacondicionamiento programado o la sustitución cíclica, con lo cual se consideran primero las tareas a condición.

Como se explicó en el Capítulo 6, el reacondicionamiento y la sustitución cíclica por lo general se consideran juntos porque tienen mucho en común. Cuando se encuentran en la práctica, por lo general es obvio si debe tratarse el modo de falla en consideración con reacondicionamiento o con sustitución cíclica. Pero, en el caso de ciertos modos de falla, ambas categorías de tareas satisfacen el criterio de factibilidad técnica. En estos casos, se debe seleccionar la más costo-eficaz.

En general, el reacondicionamiento cíclico se considera antes de la sustitución cíclica ya que es inherentemente más conservador restaurar las cosas que tirarlas.

Combinación de tareas

Para algunos pocos modos de falla con consecuencias para la seguridad o el medio ambiente, no se puede encontrar una tarea que *por sí sola* reduzca el riesgo de falla a un nivel tolerablemente bajo, ni tampoco se vislumbra un rediseño adecuado.

En estos casos a veces es posible encontrar una combinación de tareas (generalmente de dos categorías de tarea diferentes, tales como una tarea a condición y una tarea de sustitución cíclica), que reduzcan el riesgo de falla a un nivel tolerable. Cada tarea es llevada a cabo con la frecuencia apropiada para cada una. Sin embargo, debe puntualizarse que las situaciones en las que esto es necesario son muy poco frecuentes y debe tenerse cuidado de no aplicar dichas tareas como "seguro del seguro" o "por las dudas".

El proceso de selección de tareas

En la Figura 7.13 se resume el proceso de selección de tareas. Este orden de preferencia básico es válido para la gran mayoría de los modos de falla, pero no es aplicable para todos los casos. Si una tarea de orden inferior resulta claramente más costo-eficaz para manejar la falla que una tarea de orden superior, entonces debe ser seleccionada la tarea de orden inferior.

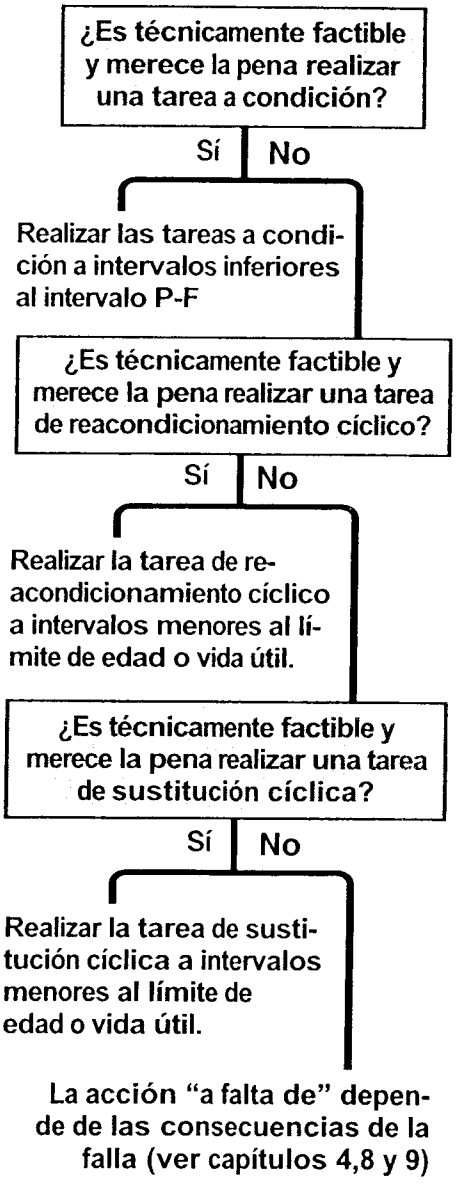


Figura 7.13: El proceso de selección de tareas

8 Acciones "a Falta de" 1: Tareas de búsqueda de fallas

8.1 Acciones "a Falta de"

En los capítulos anteriores hemos mencionado que si no puede hallarse para un modo de falla determinado una tarea proactiva que sea técnicamente factible y que merezca la pena ser realizada, la acción "a falta de" que debe llevarse a cabo está regida por las consecuencias de la falla, de la siguiente manera:

- Si no puede encontrarse una tarea proactiva que reduzca el riesgo de la falla múltiple asociada con la *función oculta* a un nivel tolerablemente bajo, entonces debe realizarse periódicamente una ***tarea de búsqueda de falla***. Si no puede encontrarse una tarea de búsqueda de falla apropiada, la decisión "a falta de" puede resultar en la posibilidad de rediseño.
- Si no puede encontrarse una tarea proactiva que reduzca el riesgo de una falla que podría afectar a *la seguridad* o al *medio ambiente* a un nivel tolerablemente bajo, ***obligatoriamente se debe rediseñar el componente o cambiar el proceso.***
- Si no puede encontrarse una tarea proactiva que cueste menos, en un período de tiempo, que una falla que tiene consecuencias *operacionales*, la decisión "a falta de" inicial es ***no realizar mantenimiento programado.*** (Si esto ocurre y las consecuencias operacionales siguen siendo inaceptables, entonces la decisión "a falta de" secundaria nuevamente es el rediseño).
- Si no puede encontrarse una tarea proactiva que cueste menos, en un período de tiempo, que una falla que tiene consecuencias *no operacionales*, la decisión "a falta de" inicial es ***no realizar mantenimiento programado,*** y si los costos de reparación son demasiado altos, la decisión "a falta de" secundaria es nuevamente el rediseño.

La ubicación de las acciones "a falta de" en el marco de decisión RCM se muestra en la Figura 8.1 de la página siguiente. En este punto, estamos respondiendo a la séptima de las preguntas que conforman el proceso de decisión de RCM:

- **¿Qué debería hacerse si no puede encontrarse una tarea proactiva adecuada?**

Este capítulo considera las tareas de búsqueda de falla. El Capítulo 9 considera el rediseño, y tareas correctivas y de rutina que *quedan fuera del marco de decisión de RCM*, tales como recorridas de inspección.

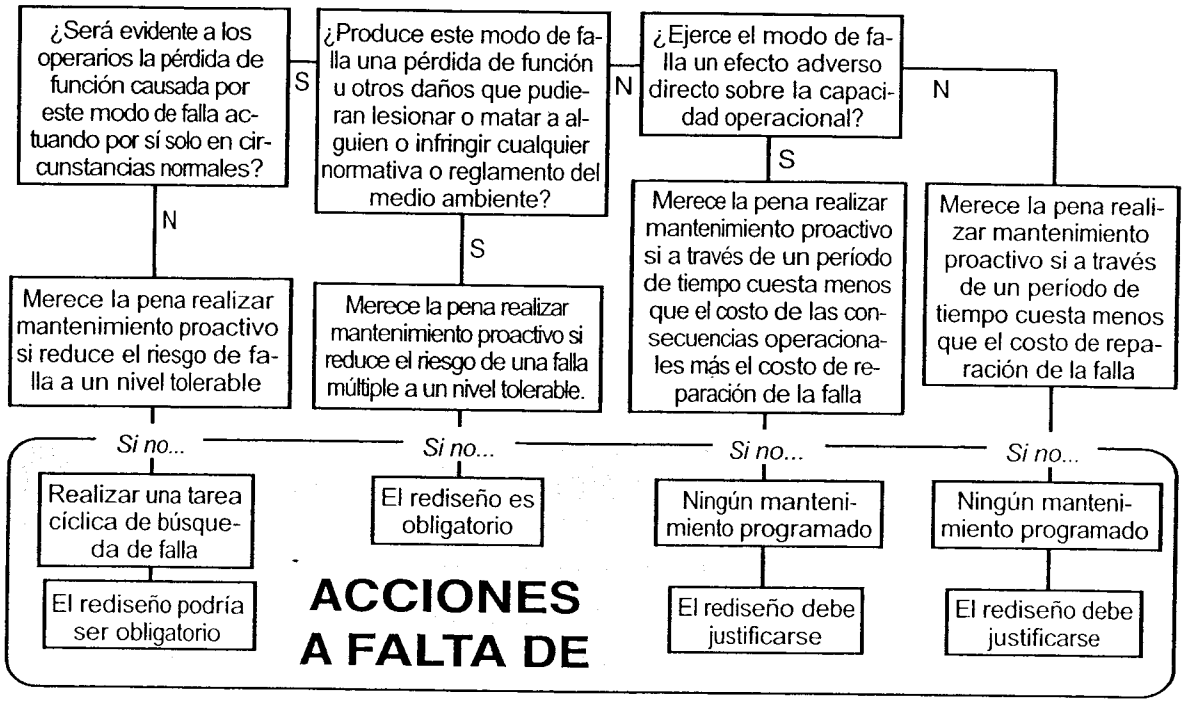


Figura 8.1: Acciones a falta de

8.2 Búsqueda de falla

¿Por qué molestarse?

Mucho de lo que se ha escrito hasta el día de hoy sobre estrategias de mantenimiento se refiere a tres –y solamente tres- tipos de mantenimiento: predictivo, preventivo y correctivo. Las tareas predictivas implican chequear si algo está fallando. El mantenimiento preventivo consiste en reacondicionar o reemplazar elementos a intervalos fijos. El mantenimiento correctivo significa reparar las cosas cuando están fallando o cuando fallaron.

Pero existe toda una familia de tareas de mantenimiento que no forman parte de ninguna de estas categorías. Por ejemplo, cuando activamos la alarma de incendio periódicamente, no estamos revisando si está fallando. No la estamos reacondicionando o reemplazando, ni tampoco la estamos reparando.

Simplemente estamos chequeando si todavía funciona.

Las tareas diseñadas para chequear si algo todavía funciona se conocen como *tareas de búsqueda de fallas* o *chequeos funcionales*. (Para que tenga un nombre que rime con las otras tres familias de tareas, el autor y sus colegas también las llaman tareas *detectivas* ya que se usan para *detectar* si algo ha fallado).

La búsqueda de fallas se aplica sólo a las fallas ocultas o no reveladas. A su vez, las fallas ocultas sólo afectan a los dispositivos de protección.

Si se aplica correctamente el RCM en casi todos los sistemas industriales modernos y de alta complejidad, no es raro encontrar que hasta el 40% de los modos de falla caigan dentro de esta categoría. Es más, hasta el 80% de esos modos de falla requieren búsqueda de fallas, *con lo que hasta la tercera parte de las tareas generadas por un programa comprensivo de desarrollo de estrategias de mantenimiento aplicado correctamente, son tareas de búsqueda de fallas.*

Un hallazgo aún más preocupante es que, al momento, muchos de los programas de mantenimiento existentes sólo prestan cierta atención a menos de la tercera parte de los dispositivos de protección (y por lo general a intervalos inapropiados). Las personas que operan y mantienen la planta cubierta por estos programas saben que hay otra tercera parte de estos dispositivos que no se les presta atención, mientras que no es raro descubrir que nadie sabe que existe el tercio restante. Esta falta de toma de conciencia y atención nos dice que la mayoría de los dispositivos de protección en la industria – nuestra última línea de protección cuando las cosas salen mal - son poco mantenidas, o lo que es aún peor, no reciben mantenimiento alguno.

Esta situación es completamente insostenible.

Si la industria toma en serio la seguridad y la integridad del medio ambiente, necesita dársele la máxima prioridad a toda la cuestión de búsqueda de fallas como tema urgente. A medida que más y más profesionales de mantenimiento tomen conciencia de la importancia de esta tarea de mantenimiento tan descuidada, este tema será aún más importante para las estrategias de mantenimiento de la próxima década de lo que lo fue el mantenimiento predictivo en los últimos diez años. El resto de este capítulo explora este tema en forma más detallada.

Fallas múltiples y búsqueda de falla

Ocurre una falla múltiple cuando falla una función protegida mientras un dispositivo de protección se encuentra en estado de falla. Este fenómeno fue ilustrado en la Figura 5.10 de la página 118. La Figura 5.11 de la página 121 mostró como la probabilidad de una falla múltiple puede calcularse de la siguiente manera:

Probabilidad de una falla múltiple = Probabilidad de una falla de la función protegida X Promedio en que el dispositivo de seguridad no este disponible ... 1

Esto llevó a la conclusión de que la probabilidad de una falla múltiple puede ser reducida disminuyendo la indisponibilidad del dispositivo de seguridad (en otras palabras, aumentando su disponibilidad). El capítulo 5 explicó que la mejor manera de hacerlo es prevenir que el dispositivo de seguridad llegue al estado de falla aplicando algún tipo de mantenimiento proactivo.

Los Capítulos 6 y 7 describieron cómo decidir si cualquier tipo de mantenimiento proactivo es técnicamente factible y si merece la pena realizarse. Sin embargo, cuando los criterios descriptos en estos capítulos son aplicados a funciones ocultas, se observa que menos de un 10% de estas funciones son susceptibles a alguna forma de mantenimiento predictivo o preventivo.

Sin embargo, aunque el mantenimiento proactivo sea generalmente inapropiado, sigue siendo esencial hacer algo para reducir la probabilidad de la falla múltiple al nivel requerido. Esto puede hacerse revisando periódicamente si la función oculta sigue funcionando.

Por ejemplo, no podemos prevenir la falla de la lámpara de una luz de freno. Entonces, si no se dispone de un circuito de aviso que indique que la lámpara ha fallado, la única manera de reducir la posibilidad de que una luz de freno falle en avisar a otros conductores de nuestra intención de frenar, es revisar si todavía está funcionando y reemplazarla si ha fallado.

Tales chequeos se conocen como tareas de búsqueda de falla.

Las tareas cíclicas de búsqueda de falla consisten en chequear una función oculta a intervalos regulares para ver si ha fallado

Este capítulo explica los aspectos técnicos de la búsqueda de falla, describe cómo determinar los intervalos de búsqueda de falla, define los criterios formales de factibilidad técnica para la búsqueda de falla y considera lo que debe hacerse si no puede encontrarse una tarea de búsqueda de falla apropiada.

Aspectos técnicos de la búsqueda de falla

El objetivo de la búsqueda de fallas es darnos la tranquilidad que un dispositivo de seguridad proveerá la protección requerida si fuese necesario. En otras palabras, no estamos verificando si el dispositivo se ve bien. Estamos chequeando si *todavía funciona* como debe. (Por esto las tareas de búsqueda de falla son conocidas como *chequeos funcionales*). Los párrafos siguientes consideran algunos de los puntos principales que hacen a este tema.

Chequear el sistema de protección completo

Una tarea de búsqueda de falla se debe asegurar de detectar todos los modos de falla que tengan posibilidad de causar la falla del dispositivo de seguridad. Esto es especialmente cierto en dispositivos complejos tales como circuitos eléctricos. En estos casos, la función del sistema completo debe ser revisada *desde el sensor hasta el actuador*. Lo ideal sería hacerlo simulando las condiciones a las que el circuito debería responder, y chequear si el elemento que actúa da la respuesta correcta.

Por ejemplo, un interruptor por presión puede diseñarse para apagar una máquina si la presión del aceite lubricante cae por debajo de cierto nivel. Si fuera posible, los interruptores de este tipo deberían chequearse disminuyendo la presión de aceite al nivel requerido y verificando que la máquina se detenga.

De manera similar, un circuito de detección de incendios debe chequearse desde el detector de humo hasta la alarma, acercando humo al detector y verificando si suena la alarma.

No perturbarlo

Desarmar cualquier cosa siempre conlleva la posibilidad de que se vuelva a armar de manera incorrecta. Si esto ocurre con una función oculta, el hecho de que es oculta significa que nadie sabrá que se dejó en estado de falla hasta el próximo chequeo (o hasta que se necesite). Por esta razón, siempre debemos buscar formas de chequear las funciones de dispositivos de seguridad sin desconectarlos o perturbarlos de ninguna manera.

A pesar de lo que hemos dicho, algunos dispositivos deben ser desarmados o desmontados completamente para chequear si están funcionando correctamente. En estos casos debe tenerse mucho cuidado de realizar la tarea de manera tal que los dispositivos continúen funcionando cuando sean vueltos a poner en servicio. (Las implicancias matemáticas del hecho de que una tarea de búsqueda de falla pueda inducir una falla se consideran más adelante en este capítulo.)

Debe ser físicamente posible chequear la función

En un pequeño pero significativo número de casos, es imposible llevar a cabo una tarea de búsqueda de falla de cualquier tipo. Éstas son:

- cuando es imposible tener acceso al dispositivo de seguridad para revisarlo (esto es casi siempre resultado de un diseño mal concebido).
- cuando la función del dispositivo no puede ser revisada sin destruirlo (como en el caso de los fusibles y los discos de ruptura). En la mayoría de estos casos, disponemos de otras tecnologías (tales como interruptores automáticos en vez de fusibles). Sin embargo, en algunos casos nuestras únicas opciones son: o bien encontrar alguna otra manera de manejar los riesgos asociados con la protección que no puede ser chequeada hasta que aparezca algo mejor, o abandonar los procesos en cuestión.

Minimizar el riesgo mientras la tarea está siendo realizada

Debe ser posible llevar a cabo una tarea de búsqueda de falla sin incrementar significativamente el riesgo de la falla múltiple.

Un ejemplo de tarea límite sería acelerar algo para chequear si funciona el dispositivo de protección de sobrevelocidad.

Si debe desconectarse un dispositivo de seguridad para llevar a cabo una tarea de búsqueda de falla, o si tal dispositivo es revisado y se encuentra en estado de falla, entonces debe proveerse una protección alternativa o debe desactivarse la función protegida hasta que sea restituida la protección original.

A pesar que se requiera, la búsqueda de fallas no debe llevarse a cabo en sistemas donde hacerlas fuese muy peligroso, (si la sociedad tomase seriamente el tema de la seguridad, sería cuestionable la existencia de este tipo de sistemas).

La frecuencia debe ser práctica

Debe resultar práctico realizar la tarea de búsqueda de falla a los intervalos requeridos. Sin embargo, antes de que podamos decidir si el intervalo requerido resulta práctico, necesitamos determinar qué intervalo se requiere. Este tema se trata a continuación.

8.3 Intervalos de Tareas de Búsqueda de Falla

La presente sección de este capítulo explica cómo determinar la frecuencia de las tareas de búsqueda de fallas. Comenzará explicando que dicha frecuencia depende de dos variables –la disponibilidad deseada y la frecuencia de falla del dispositivo de protección. Continúa viendo la manera de cómo establecer la disponibilidad "deseada", y luego examina los diferentes métodos que pueden usarse para definir los intervalos de búsqueda de falla en distintas circunstancias.

Intervalos de búsqueda de falla, disponibilidad y confiabilidad

Hemos visto que los intervalos de las tareas de mantenimiento predictivo y preventivo están basados en una sola variable (el intervalo P-F y la vida útil respectivamente). Los párrafos siguientes mostrarán que para establecer los intervalos de búsqueda de falla, deben tomarse en cuenta no una sino *dos* variables; disponibilidad y confiabilidad.

La Figura 8.2 muestra una situación en la que diez motocicletas han estado en servicio durante cuatro años. Esto significa que el total de la vida en servicio de la flota de motocicletas en este período es:

10 motocicletas x 4 años = 40 años

La luz de freno en cada motocicleta ha sido chequeada una vez al año durante cuatro años. (Este ejemplo supone que no se chequean las luces entre los controles anuales). A través del período de cuatro años, se ha encontrado que las luces estaban en estado de falla en cuatro ocasiones, como lo muestra la Figura 8.2. Entonces el tiempo medio entre fallas (TMEF) [ó MTBF en inglés] de las luces de freno es:

40 años en servicio / 4 fallas = 10 años

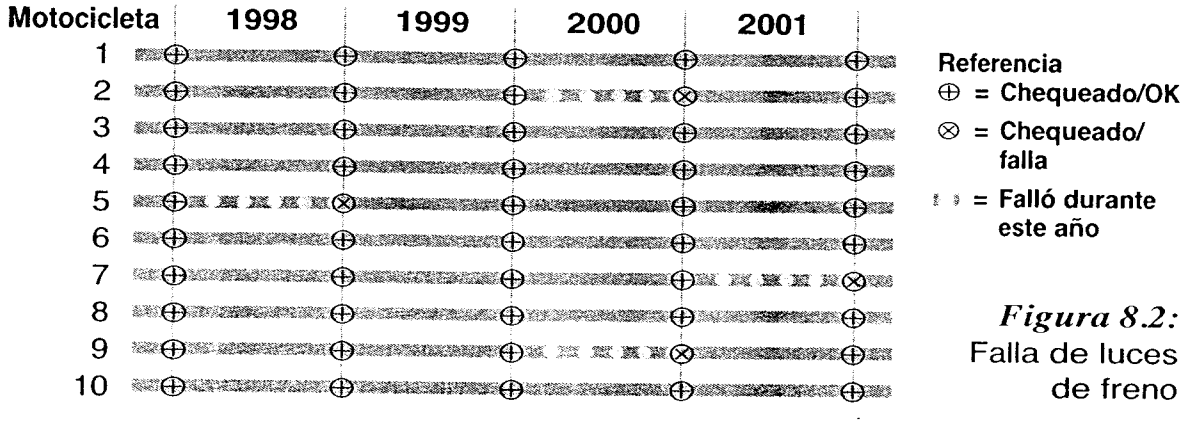


Figura 8.2: Falla de luces de freno

En este caso, como el intervalo de búsqueda de falla es de un año, resulta ser el 10% del TMEF de 10 años. Sin embargo, no sabemos exactamente cuándo cada luz fallada dejó de funcionar. Una puede haber fallado el día después del último chequeo, otra el día antes del chequeo anual, y el resto en algún momento intermedio. Todo lo que sabemos a ciencia cierta es que cada una de las cuatro luces falló en algún momento durante el año anterior al chequeo. Entonces, ante la falta de cualquier información mejor, asumimos que, en promedio, cada luz fallada falló a mitad de camino a lo largo del año. En otras palabras, en promedio, cada una de las luces falladas estuvo fuera de funcionamiento durante medio año. Esto significa que a lo largo del período de cuatro años, nuestras luces falladas estuvieron en estado de falla un total de:

4 luces falladas x 0,5 año cada una en estado de falla = 2 años.

Entonces, basándonos en la información anterior, podemos esperar un promedio de no-disponibilidad de nuestras luces de freno de:

2 años en estado de falla / 40 años en servicio = 5%.

Esto corresponde a una disponibilidad del 95%.

El ejemplo anterior sugiere que hay una correlación lineal entre la no-disponibilidad (5%), el intervalo de búsqueda de falla (1 año) y la confiabilidad del dispositivo de seguridad como lo da su TMEF (10 años), como sigue:

No-disponibilidad = 0,5 x intervalo de búsqueda de falla / TMEF del dispositivo protector

Puede demostrarse que esta relación lineal es válida para faltas de disponibilidad de menos de 5%, siempre que el dispositivo de seguridad responda a una distribución exponencial de supervivencia (patrón de falla E o aleatorio). (Ver Cox y Tait[1991], págs. 283 – 284 o Andrews y Moss[1993], págs. 110-112).

Excluyendo el tiempo de tarea y el de reparación

La "no-disponibilidad" del dispositivo de seguridad en la fórmula anterior no incluye el tiempo de no-disponibilidad en el que se incurre durante la tarea de búsqueda de falla y tampoco incluye la falta de disponibilidad causada por el tiempo necesario para reparar el dispositivo si se lo encontró fallado. Esto es así por las siguientes dos razones:

- La indisponibilidad causada al llevar a cabo la tarea de búsqueda de falla y al efectuar la reparación que corresponda, tiende a ser muy pequeña en comparación con la falta de disponibilidad no manifiesta entre tareas, al punto que generalmente será despreciable si se aplican criterios puramente matemáticos.
- Tanto la tarea de búsqueda de falla como cualquier reparación que pueda ser necesaria debe llevarse a cabo bajo condiciones estrictamente controladas. Estas condiciones deben reducir notablemente la posibilidad de una falla múltiple -o eliminarla por completo- mientras se está realizando la intervención. Esto significa que, o bien se hará desactivar el sistema protegido durante la intervención, o se le dará una protección alternativa hasta que el funcionamiento normal esté completamente restituido. Si esto se hace correctamente, la indisponibilidad resultante de la propia intervención (controlada) puede ser ignorada para las evaluaciones de probabilidad de una falla múltiple.

En el proceso de decisión de RCM, este último punto se cubre con el criterio de evaluación para determinar si merece la pena realizar una tarea de búsqueda de falla. Si aparece un aumento significativo de probabilidad de falla múltiple *mientras la tarea está siendo realizada*, la respuesta a la pregunta "¿consigue esta tarea la disponibilidad requerida para reducir a un nivel tolerable el riesgo de falla múltiple?" será "no", y en este caso el proceso de decisión de RCM llevará a las acciones "a falta de" secundarias que discutiremos más adelante.

Cálculo de FFI utilizando solamente disponibilidad y confiabilidad

Si utilizamos la abreviatura "FFI" (Failure Finding Interval) para describir el intervalo de búsqueda de falla y "M_{TOR}" para describir el TMEF del dispositivo de seguridad protector, la ecuación anterior de no-disponibilidad puede reordenarse para dar la siguiente fórmula:

$$FFI = 2 \times \text{indisponibilidad} \times M_{TOR} \quad \ldots\ldots 2$$

Esto nos dice que para determinar el intervalo de búsqueda de falla para un sólo dispositivo de seguridad, necesitamos saber su *tiempo medio entre fallas* y la *disponibilidad deseada* del dispositivo (de la que podemos determinar la indisponibilidad para ser utilizada en la fórmula).

Por ejemplo, asumamos que los que manejan nuestras motocicletas deciden que no están satisfechos con una disponibilidad de 95%, y preferirían verla incrementada al 99%. La falta de disponibilidad asociada es de 1%. Si el TMEF de las luces de freno permanece inalterado a los cuatro años, chequeando las necesidades de los intervalos para ser cambiados de una vez por año a:

$$FFI = 2 \times 1\% \times 4 \text{ años} = 2\% \text{ de } 48 \text{ meses} \approx 1 \text{ mes}$$

En otras palabras, basados en las expectativas de disponibilidad y la información existente acerca de las fallas, los motociclistas necesitan chequear si sus luces de freno están funcionando una vez al mes. Si quieren una disponibilidad del 99.99%, necesitan chequear alrededor de dos veces por semana.

(Para ser exactos, los cálculos anteriores sólo son válidos si las luces de freno en todas las motocicletas son utilizadas aproximadamente el mismo número de veces en cada semana. Si hay una variación amplia, tanto el TMEF como el intervalo de búsqueda de falla deberían ser calculados en términos de distancia recorrida, o para ser más exactos, en términos del número de veces que son utilizados los frenos, y por ende las luces de freno. De cualquier manera lo que queremos destacar con este ejemplo es la vinculación entre el intervalo de chequeo, la disponibilidad deseada, y el TMEF).

Para las personas que no se sienten muy a gusto con los formuleos matemáticos, usando la fórmula (2) presentada anteriormente podemos confeccionar una tabla muy simple, como la siguiente

Disponibilidad que requerimos para la función oculta	99.99%	99.95%	99.9%	99.5%	99%	98%	95%
Intervalo de búsqueda de falla (como un % del TMEF)	0.02%	0.1%	0.2%	1%	2%	4%	10%

Figura 8.3: Intervalos de búsqueda de falla, disponibilidad y confiabilidad

Disponibilidad requerida

Habiendo establecido la relación entre la disponibilidad, la confiabilidad y los intervalos de búsqueda de fallas, el próximo punto a considerar es cómo decidir qué disponibilidad requerimos. La parte 6 del Capítulo 5 explica que esto puede hacerse en tres etapas:

1: primero preguntar qué probabilidad de falla *múltiple*, que podría ocurrir si la función oculta está en estado de falla cuando se requiere que cumpla su función, está preparada para tolerar la organización.

2: luego determinar la probabilidad que existe de que falle la función *protegida* en el período de tiempo considerado.

3: por último determinar qué disponibilidad debe alcanzar la función *protectora* para reducir la probabilidad de falla múltiple al nivel deseado.

Además de llevar a cabo estos tres pasos, necesitamos averiguar el tiempo medio entre fallas de la función oculta. Una vez que hicimos esto, estamos preparados para observar la Figura 8.3 y seleccionar las frecuencias de las tareas que corresponden al nivel de disponibilidad establecido en el paso 3. Este proceso se ilustra en el ejemplo siguiente:

La Figura 8.4 resume el ejemplo dado en el Capítulo 5 de las bombas de servicio y de reserva, donde:

- En el paso 1, los usuarios decidieron que querían una probabilidad de falla múltiple menor a 1 en 1000 en cualquier año.
- En el paso 2 establecieron que la tasa de fallas no anticipadas de la bomba de servicio podría reducirse a un promedio de 1 en 10 años.

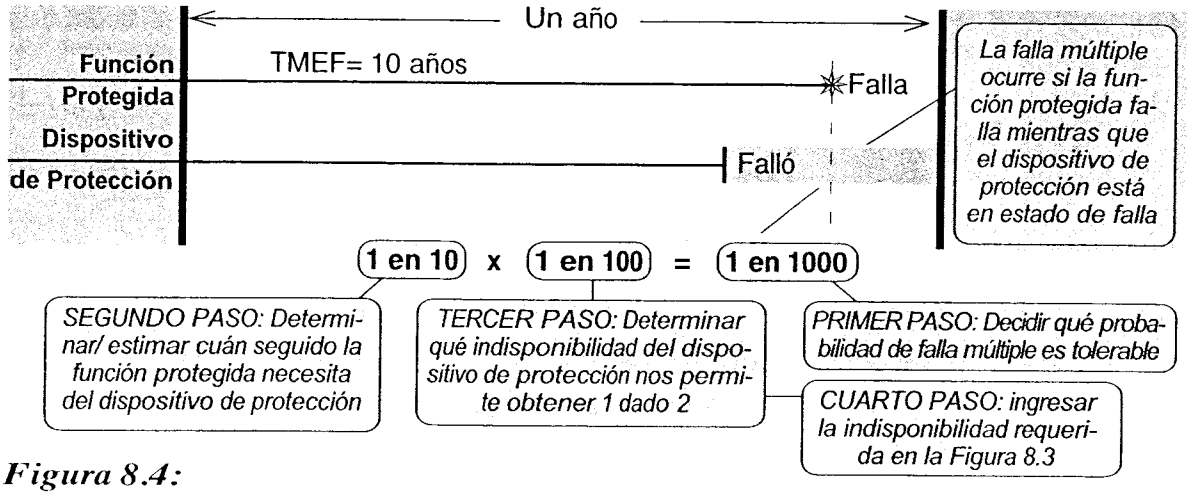


Figura 8.4:
Disponibilidad deseada de un dispositivo de protección

- Esto significa que la indisponibilidad de la bomba de reserva no debe exceder el 1%, con lo que la disponibilidad de esta bomba tiene que ser del 99% o más (paso 3).

La Figura 8.3 sugiere que para alcanzar una disponibilidad del 99% para la bomba de reserva, alguien debiera llevar a cabo una tarea de búsqueda de fallas (en otras palabras, controlar que está totalmente funcional) a intervalos del 2% de su tiempo medio entre fallas. Los registros podrían mostrar que la bomba de reserva tiene un tiempo medio entre fallas de 8 años (aproximadamente 400 semanas), con lo que la frecuencia de la tarea de búsqueda de fallas debería ser:

2% de 400 semanas = 8 semanas = 2 meses.

Métodos Rigurosos para Calcular FFI

El ejemplo dado sugiere que puede desarrollarse una fórmula única para determinar intervalos de búsqueda de falla que incorpore todas las variables consideradas hasta el momento, combinando las ecuaciones (1) y (2) anteriores, como se explica en los párrafos siguientes. Empecemos por definir algunos términos importantes:

- una probabilidad de una falla múltiple de 1 en 1.000.000 en un año cualquiera implica un *tiempo medio entre fallas múltiples* de 1.000.000 de años. Llamemos a esto MFM. Si esto es así, entonces la probabilidad de que ocurra una falla múltiple en un año cualquiera es de 1/MFM. (Ver nuevamente la nota de la pág. 100).
- hemos visto que si el índice de demanda de la función protegida es (por ejemplo) una vez en 200 años, esto corresponde a una probabilidad de falla para la función protegida de 1 en 200 en un año cualquiera, o un *tiempo medio entre fallas de la función protegida (o sistema protegido)* de 200 años. Llamemos a ésta M_{GIDO}. Entonces la probabilidad de falla para la función protegida en un año cualquiera será $1/M_{GIDO}$. Esto también se conoce como la *tasa de demanda*.

- como anteriormente, M_{TOR} es el *tiempo medio entre fallas del dispositivo de protección,* y FFI el *intervalo de tareas de búsqueda de falla.*
- U_{TOR} es la *indisponibilidad (unavailability) permitida del dispositivo de seguridad protector.*

Si sustituimos las expresiones anteriores, la ecuación (1) se vuelve:

$$1/M_{FM} = (1/M_{GIDO}) \times U_{TOR} \quad \text{....3}$$

Esto puede ser reordenado de la siguiente manera:

$$U_{TOR} = M_{GIDO} / M_{FM} \quad \text{....4}$$

La ecuación (2) anterior indica que:

$$FFI = 2 \times U_{TOR} \times M_{TOR} \quad \text{....2}$$

Entonces, sustituyendo U_{TOR} de la ecuación 4 a la ecuación 2 nos da:

$$FFI = \frac{2 \times M_{TOR} \times M_{GIDO}}{M_{FM}} \quad \text{....5}$$

Esta fórmula permite determinar un intervalo de búsqueda de falla en un solo paso, de la siguiente manera:

Si aplicamos esta fórmula a las figuras que usamos para el sistema que mencionamos antes de bombas de servicio/reserva, M_{FM} es de 1000 años, M_{TOR} es de 8 años y M_{GIDO} es de 10 años, entonces:

$$FFI = \frac{2 \times 8 \times 10}{1000} \approx 2 \text{ meses}$$

Modos de falla múltiple de un único dispositivo de seguridad

En este capítulo, todas las posibilidades de falla que podrían causar la falla de cada dispositivo de protección han sido agrupadas, todas juntas, como un único modo de falla ("falla la bomba de reserva"). La gran mayoría de los dispositivos de seguridad pueden ser tratados de este modo, porque todos los modos de falla que podrían causar el cese de función de un dispositivo de seguridad son chequeados cuando se revisa el funcionamiento del dispositivo como un todo.

Sin embargo, a veces es apropiado realizar un AMFE detallado para el dispositivo, para identificar modos de falla individuales que podrían *por sí solos* causar que el dispositivo sea incapaz de proveer la protección requerida. Esto se hace generalmente bajo dos circunstancias:

- Cuando se sabe que algunos de los modos de falla admitirán mantenimiento proactivo, pero otros no son predecibles ni prevenibles. En estos casos debe ser aplicada una tarea a condición, de reacondicionamiento o de sustitución cíclica apropiada a los modos de falla que corresponda y las tareas de búsqueda de falla a los modos de falla *restantes*.
- Cuando el dispositivo de protección es nuevo y la única información de falla disponible (de bancos de datos, proveedores de componentes, etc.) solamente cubre partes del dispositivo pero no al dispositivo como un todo.

En estos casos, la ecuación (5) anterior puede ser modificada para incluir el TMEF de cada componente del dispositivo.

Cuando la propia tarea de búsqueda de falla puede causar la falla

Un gran problema práctico que afecta toda la cuestión de la búsqueda de falla es que la tarea en sí misma puede causar la falla que supuestamente debe detectar. Esto generalmente sucede en una de dos maneras:

- La tarea fuerza al sistema de tal manera que eventualmente lo induce a fallar (como puede ser el caso cuando se prueba un interruptor, donde precisamente el acto de prender y apagar impone esfuerzos en el mecanismo del interruptor).
- Si es necesario perturbar el sistema para realizar la tarea, siempre existe la posibilidad de que la persona que lo realiza pueda dejar el sistema en un estado de falla.

En ambos casos, el dispositivo estará en estado de falla desde el momento en que se haya completado la prueba. Si *p* es la probabilidad de que sea dejado en estado de falla después de una prueba, entonces p (como decimal) será su no-disponibilidad causada por el proceso de prueba. Si M_{otro} es la media del tiempo entre *fallas causadas por otros fenómenos aparte de la prueba*, puede decirse, (para un sistema solo) que:

$$FFI = \frac{2 \times M_{OTRO}}{(1 - p)} \times \left(\frac{M_{GIDO}}{M_{FM}} - p \right) \quad \ldots.6$$

En ésta fórmula la expresión (1 – p) puede ser ignorada si p es menor a 0,05.

Si prender y apagar el interruptor es la ***única*** causa de falla (dicho de otra manera, no existe M_{otro}) *y* si la falla tiene un patrón supervivencia exponencial, la probabilidad de falla múltiple es igual a la tasa de demanda (en años) multiplicada por el número de ciclos entre fallas del dispositivo de protección. Por ejemplo, si la tasa de demanda es de 40 años y el interruptor dura en promedio 600.000 ciclos, la probabilidad de falla múltiple es:

1 en (40 x 600.000) = 1 en 24.000.000 años

Esto se da así si la falla ocurre solamente por prender y apagar el interruptor, y por lo tanto, el acto de operar el interruptor al chequearlo para revisar si ha fallado:

- permitirá descubrir si la última operación del interruptor causó que fallase.
- forzará el interruptor y por ende creará la posibilidad de que falle como resultado de la revisión.

Por lo tanto, sólo bajo este conjunto de circunstancias (fallas aleatorias causadas solamente por operar el elemento), la tarea de búsqueda de fallas que implica operar el elemento para determinar si falló no tendrá ningún efecto sobre la probabilidad de una falla múltiple, sin importar con qué

frecuencia se haga la tarea. En otras palabras, la respuesta a la pregunta "¿es práctico hacer la tarea a los intervalos requeridos?" es "no", ya que no existe un intervalo apropiado. Con lo que en este caso, si la organización quiere que la probabilidad de falla múltiple del interruptor descripto anteriormente sea menor a 1 en 100.000.000 de años, la única forma de obtenerla es reduciendo la tasa de demanda del interruptor, y/o instalando más interruptores o uno más confiable.

Todo esto indica que las tasas de falla que se expresan en función de una determinada cantidad de operaciones, deben tratarse con cuidado por las siguientes razones:

- En muy pocas ocasiones indican si la falla que se considera es oculta o evidente.
- No indican si el patrón de fallas está relacionado con la edad, caso en el que podría ser indicado algún tipo de reacondicionamiento o de sustitución cíclica, o si es un patrón aleatorio.
- A pesar de los comentarios que hemos realizado, *es probable* que un modo de falla causado *únicamente* al operar un interruptor esté relacionado con la edad. Si esto es así, es probable que pueda identificarse una tarea preventiva que reduzca la probabilidad de una falla múltiple al nivel requerido.

Esto sugiere que como regla, los interruptores importantes –especialmente los disruptores de grandes circuitos- no deberían tratarse como modos de falla simples. Preferiblemente, deberían estar sujetos a un AMFE detallado para desarrollar luego la política de mantenimiento más adecuada para cada modo de falla.

Fuentes de datos para los Cálculos de FFI

La mayoría de los proyectos industriales modernos poseen varios cientos de sistemas protegidos, la mayoría de los cuales incorporan funciones ocultas. Las fallas múltiples asociadas con muchos de estos sistemas serán lo suficientemente serias como para requerir el uso de uno de los métodos rigurosos de búsqueda de fallas.

Si se dispone de información precisa acerca de la probabilidad de falla de la función protegida y del tiempo medio entre fallas de la función oculta, los cálculos pueden ser realizados con bastante rapidez. Si esta información no está disponible –y por lo general no lo está– es necesario estimar qué valores probables tendrán estas variables *en el contexto bajo consideración*. En cierto casos, puede obtenerse información de alguna de las siguientes fuentes:

- Los fabricantes del equipo
- Bancos de datos comerciales
- Otros usuarios de equipos similares.

Pero, a menudo, las estimaciones deben basarse en el conocimiento y la experiencia de las personas que más saben acerca de los equipos. En muchos casos estos son los operadores de producción y de mantenimiento. (Al utilizar datos de fuentes externas, se debe observar muy especialmente cómo se compara el contexto operacional de los componentes para los que se recolectaron los datos con respecto al contexto en el que su equipo está operando).

Una vez establecida la frecuencia de la tarea de búsqueda de falla y que las tareas son realizadas regularmente, se hace posible verificar con bastante rapidez las presunciones utilizadas para determinar la frecuencia. Sin embargo, esto requiere llevar un registro absolutamente meticuloso, no solo de cuándo se realiza cada tarea de búsqueda de falla, sino también sobre:

- Si cada vez que se realiza la tarea la función oculta está funcionando o no.
- La frecuencia de falla de la función protegida (esto generalmente puede deducirse del número de veces que la función protegida hace uso del dispositivo de seguridad, por ejemplo a partir del número de veces que una válvula de alivio realmente tiene que aliviar la presión en el sistema).

Basándose en esta información puede calcularse el tiempo medio real entre fallas y, si es necesario, revisarse la frecuencia de la tarea de acuerdo con esa nueva información.

Cuando el TMEF y/o los patrones de falla asociados son completamente desconocidos –y no puede hacerse una estimación satisfactoria– los modos de falla deben colocarse cuanto antes en un programa de "investigación de edad" para establecer el panorama real. Si la situación es tal que no puede tolerarse la incertidumbre mientras se están recolectando los datos –en otras palabras, si las consecuencias de una estimación incorrecta simplemente son demasiado serias para que la organización (o en algunos casos la sociedad en general) las acepte- entonces deben hacerse todos los esfuerzos posibles para cambiar las consecuencias. Esto a su vez casi siempre requerirá algún tipo de rediseño.

Un Enfoque Informal para Ajustar Intervalos de Búsqueda de Falla

No toda función oculta es lo suficientemente importante como para justificar el tiempo y el esfuerzo necesarios para hacer un análisis riguroso completo. Esto se aplica principalmente a fallas múltiples que no afectan la seguridad o el medio ambiente. También podría aplicarse a fallas múltiples que podrían afectar la seguridad pero donde la función protegida es inherentemente muy confiable y la amenaza para la seguridad es marginal.

En estos casos, puede ser suficiente tomar una visión general del sistema protegido completo en su contexto operacional, e ir directamente a una decisión acerca del nivel de disponibilidad deseado para la función oculta. Esta decisión luego se utiliza en conjunción con el TMEF de la falla oculta para ajustar un intervalo de tareas, utilizando la Figura 8.3. (Algunas organizaciones hasta utilizan una disponibilidad de 95% para todas las funciones ocultas en las que la falla múltiple asociada no puede afectar la seguridad ni el medio ambiente. Sin embargo, las políticas generales de esta naturaleza pueden ser peligrosas por lo que sólo deben ser utilizadas por personas con gran experiencia en este tipo de análisis).

Una vez más, si no se dispone de datos adecuados acerca de fallas ocultas -y por lo general no estarán disponibles- será necesario estimar los TMEF para comenzar. Pero nuevamente, estos datos deben ser compilados lo más rápidamente posible para validar las estimaciones iniciales.

Otros Métodos para Calcular Intervalos de Búsqueda de Falla

Las técnicas para determinar intervalos de búsqueda de falla descriptas hasta el momento en este capítulo no son en absoluto exhaustivas. La Red Mundial de Licenciatarios de Aladon para RCM ha desarrollado muchas variantes adicionales. Estas incluyen fórmulas para:

- Sistemas de votación.
- Sistemas múltiples, independientes y redundantes.
- Cálculo de intervalos basados en optimización de costos para sistemas en los que las fallas múltiples no afectan la seguridad ni el medio ambiente.

Como este libro sólo pretende proveer una introducción al tema, estas fórmulas no se incluyen en este capítulo.

La Practicidad de los Intervalos de Tareas

Los métodos descriptos hasta ahora para calcular intervalos de búsqueda de falla a veces producen intervalos muy cortos o muy largos. En algunos casos estos intervalos resultan demasiado largos o demasiado cortos, como se describe a continuación:

- Un intervalo de tarea de búsqueda de falla muy corto tiene dos implicancias principales:
  - A veces el intervalo es simplemente demasiado corto para ser práctico. Un ejemplo podría ser que las tareas de búsqueda de falla obliguen a que grandes componentes de la planta deban detenerse cada pocos días.
  - La tarea podría causar acostumbramiento (ejemplo: si una alarma de incendio se prueba demasiado seguido).

En estos casos, la tarea propuesta es rechazada y avanzamos a la siguiente etapa del proceso de toma de decisión RCM, como se ve más adelante.

- Otras veces nos encontramos con intervalos muy largos, a veces del orden de cien años o más. Aquí el proceso claramente sugiere que directamente no necesitamos preocuparnos de realizar la tarea. En estos casos la "tarea" propuesta debe enunciarse de la siguiente manera: "el perfil de riesgo/confiabilidad es tal que se considera innecesaria la búsqueda de falla".
- En casos poco comunes, aparecen intervalos de tarea que son significativamente mayores al índice de demanda (M_{GIDO}). Esto hace que tenga poco sentido levar a cabo una tarea de búsqueda de fallas a intervalos (FFI) mayores a los que el sistema se chequea a si mismo (M_{GIDO}), con lo cual en estos casos la respuesta a la pregunta "¿es práctico realizar la tarea a los intervalos requeridos?" es "no". De cualquier manera, téngase presente que si la tarea de búsqueda de falla no se hace en un sistema protegido, (y si M_{TOR} es 4 o 5 veces mayor que M_{GIDO}, como lo es generalmente), puede demostrarse que:

$$M_{FM} = M_{TOR} + M_{GIDO}$$

Si este valor de M_{FM} es demasiado bajo como para ser tolerable, la protección es inadecuada y casi con seguridad se deberá rediseñar el sistema, como se discute en el próximo capítulo.

8.4 La Factibilidad Técnica de la Búsqueda de Falla

Los temas tratados en las Partes 2 y 3 de este capítulo dan a entender que, para que una tarea de búsqueda de falla sea técnicamente factible, debe ser totalmente posible realizarla, debe ser posible realizarla sin aumentar el riesgo de la falla múltiple, y debe ser práctico realizar la tarea en el intervalo requerido.

La búsqueda de fallas es técnicamente factible si:

- ***es posible realizar la tarea***
- ***la tarea no incrementa el riesgo de una falla múltiple***
- ***es práctico realizar la tarea al intervalo requerido.***

El objetivo de una tarea de búsqueda de falla es reducir la probabilidad de la falla múltiple asociada con la función oculta a un nivel tolerable. Sólo merece la pena realizarla si logra este objetivo.

Merece la pena realizar la búsqueda de falla si reduce la probabilidad de la falla múltiple asociada a un nivel tolerable.

¡La Búsqueda de Falla es una Acción "a Falta de"!

Tengamos en cuenta que un mantenimiento proactivo exitoso previene que los elementos fallen, mientras que la búsqueda de falla acepta que estarán algún tiempo –preferiblemente no mucho- en estado de falla. Esto significa que el mantenimiento proactivo es en esencia más conservador (en otras palabras, más seguro) que la búsqueda de falla, por lo que esta última sólo debe ser recomendada en caso de no poder encontrar una tarea proactiva más efectiva. Por esto es atinado evitar diagramas de decisión de RCM que ubiquen la búsqueda de fallas antes del mantenimiento proactivo en el proceso de selección de tareas.

¿Y si la tarea de Búsqueda de Fallas no es aplicable?

Si se ve que una tarea de búsqueda de falla no es técnicamente factible o no merece la pena realizarse, hemos agotado todas las posibilidades que pueden permitirnos obtener la prestación deseada del activo físico existente. Esto nos deja nuevamente librados a las consecuencias de la falla múltiple de la siguiente manera:

- Si no puede encontrarse una tarea de búsqueda de falla apropiada y la falla múltiple podría afectar la seguridad o el medio ambiente, debe cambiarse algo para que la situación sea segura. En otras palabras, el rediseño es obligatorio.
- Si no puede encontrarse una tarea de búsqueda de falla y la falla múltiple no afecta la seguridad ni el medio ambiente, entonces es aceptable no tomar ninguna acción, pero puede justificarse el rediseño si la falla múltiple tiene consecuencias muy costosas.

Este proceso de decisión se resume en la Figura 8.5. (Este diagrama es una descripción más completa de este aspecto del proceso que los dos recuadros al pié de la columna izquierda en la Figura 8.1):



Figura 8.5: Búsqueda de falla: el proceso de decisión

9 Otras Acciones "a Falta de"

Al pie de la Figura 8.1 se muestran tres tipos de acciones "a falta de". La primera –búsqueda de fallas- se vio en el Capítulo 8. En este capítulo analizaremos los conceptos de *ningún mantenimiento programado* y de *rediseño*. También se hace una reseña del rol que cumplen las *recorridas de inspección*.

9.1 Ningún mantenimiento programado

Hemos visto que la búsqueda de fallas es la primer acción "a falta de" en caso de no encontrarse una tarea proactiva apropiada para una *falla oculta*. Pero si no podemos encontrar una tarea de búsqueda de fallas apropiada, entonces el rediseño es obligatoriamente la acción secundaria "a falta de" si la falla múltiple tiene consecuencias sobre la seguridad o el medio ambiente. También hemos visto que si una falla evidente tiene *consecuencias para la seguridad o el medio ambiente* y no puede encontrarse una tarea proactiva apropiada, también debe cambiarse algo para hacer que la situación sea segura.

Sin embargo, si la falla es evidente, y no afecta la seguridad ni el medio ambiente, o si es oculta y la falla múltiple no afecta la seguridad ni el medio ambiente, entonces la acción inicial "a falta de" es *no realizar ningún mantenimiento programado*. En estos casos, los elementos son dejados en servicio hasta que ocurra una falla funcional, momento en el cual son reparados o reemplazados. En otras palabras, "ningún mantenimiento programado" sólo es válido si:

- no puede encontrarse una tarea cíclica apropiada para una función oculta, y la falla múltiple asociada no tiene consecuencias para la seguridad o el medio ambiente
- no puede encontrarse una tarea proactiva que sea costo-eficaz para fallas que tienen consecuencias operacionales o no operacionales.

Notemos que si no puede encontrarse una tarea proactiva apropiada para una falla bajo alguna de estas circunstancias, simplemente significa que no llevamos a cabo *mantenimiento programado* para ese componente en su forma actual. No significa que simplemente nos olvidemos de él. Como podemos ver en la próxima sección de este capítulo, puede que haya circunstancias bajo las cuales merece la pena cambiar el diseño del componente para reducir los costos globales.

9.2 Rediseño

La cuestión del diseño de los equipos ha surgido repetidas veces a medida que hemos seguido los pasos que se deben tomar para desarrollar un programa de mantenimiento exitoso. En este punto del presente capítulo, consideramos dos temas generales que afectan la relación entre el diseño y el mantenimiento, y luego consideramos el papel que juega el diseño en el proceso de selección de tareas.

El término "rediseño" es utilizado en su sentido más amplio en este capítulo. En primer lugar, se refiere a cualquier cambio en la especificación de cualquier componente de un equipo. Esto significa cualquier acción que implique un cambio en un plano o una lista de piezas. Incluye *una modificación en la especificación de un componente, el agregado de un elemento nuevo, la sustitución de una máquina entera* por una de marca o tipo diferente, *o cambiar una máquina de lugar*. También significa cualquier otro cambio de una sola vez a un *proceso o procedimiento* que afecte la operación de la planta. A su vez incluye el *entrenamiento* como un método para lidiar con un modo de falla específico (que puede ser visto como un "rediseño" de la capacidad de la persona que está siendo entrenada).

Diseño y Mantenimiento

Cualquier cambio es costoso. Involucra el costo de desarrollar la nueva idea (diseñar una nueva máquina, crear un nuevo procedimiento operacional), el costo de convertir la idea en realidad (hacer una pieza nueva, comprar una máquina nueva, compilar un nuevo programa de entrenamiento) y el costo de implementar el cambio (instalar la pieza, conducir el programa de entrenamiento). Si los equipos o las personas deben ser sacados de servicio mientras se está implementando el cambio, se incurre en costos indirectos adicionales. También existe el riesgo de que el cambio no logre eliminar ni alivianar el problema que pretende solucionar. En algunos casos, hasta puede crear más problemas.

Como resultado, toda la cuestión de las modificaciones debe ser abordada con gran precaución. Debe prestarse especial atención a dos temas:

- ¿qué consideramos primero - el diseño o el mantenimiento?
- la relación entre la confiabilidad inherente y el funcionamiento deseado.

¿Qué consideramos primero - el diseño o el mantenimiento?

La confiabilidad, el diseño y el mantenimiento están intrínsecamente relacionados. Esto puede llevar a la tentación de empezar a rever el diseño de los equipos existentes antes de considerar los requerimientos de su mantenimiento. De hecho, el proceso RCM considera primero al mantenimiento por dos razones.

La mayoría de las modificaciones llevan de seis meses a tres años desde su concepción hasta que se encargan, dependiendo del costo y la complejidad del nuevo diseño. Por otra parte, la persona de mantenimiento que está de turno *hoy* debe mantener los equipos que existen *hoy,* no los que deberían existir o los que pudieran existir en un futuro. Entonces la realidad de hoy debe tratarse antes que los cambios en el diseño de mañana.

En segundo lugar, la mayoría de las organizaciones se encuentran ante muchas más oportunidades aparentemente deseables para mejorar el diseño que las que son físicamente o económicamente factibles. Al enfocarse sobre las consecuencias de las fallas, el RCM ayuda mucho a desarrollar prioridades racionales para estos proyectos, especialmente porque separa aquellos que son esenciales de aquellos otros que son meramente deseables. Obviamente, tales prioridades sólo pueden ser establecidas después de realizado el análisis RCM.

Confiabilidad inherente versus funcionamiento deseado

Entre otras cosas, en la Parte 2 del Capítulo 2 enfatizamos que la capacidad inicial de cualquier activo físico se establece por su diseño y por cómo está hecho, y que el mantenimiento no puede dar confiabilidad más allá de la que es inherente en su diseño. Esto llevó a dos conclusiones.

En primer lugar, si la capacidad inicial de un activo físico es mayor al funcionamiento deseado, el mantenimiento puede ayudar a lograr el funcionamiento deseado. La mayoría de los equipos *está* especificado, diseñado y construido adecuadamente, por lo que normalmente es posible desarrollar un programa de mantenimiento satisfactorio, tal como se describió anteriormente. En otras palabras, en la mayoría de los casos, el RCM nos ayuda a lograr el funcionamiento deseado de un activo físico en su configuración actual.

Por otro lado, si el funcionamiento deseado excede la confiabilidad inherente, entonces ningún tipo de *mantenimiento* podrá brindar el funcionamiento deseado. En estos casos un mantenimiento "mejorado" no puede resolver el problema: esto hace necesario mirar más allá del mantenimiento para encontrar soluciones. Las opciones incluyen:

- modificar el equipo
- cambiar los procedimientos operacionales
- bajar nuestras expectativas y decidir convivir con el problema.

Esto nos recuerda que el mantenimiento no es *siempre* la respuesta para problemas de confiabilidad crónicos. También nos recuerda que debemos establecer lo que *queremos que cada parte del equipo haga* en su contexto operacional tan pronto y tan precisamente como sea posible, antes de que podamos comenzar a hablar con sensatez acerca de lo adecuado de su diseño o sus requerimientos de mantenimiento.

El Rediseño como Acción "a Falta de"

La Figura 8.1 muestra que el rediseño aparece al pié de cada una de las cuatro columnas del diagrama de decisión. En el caso de las fallas que tienen consecuencias para la seguridad o el medio ambiente, es la "acción a falta de" *obligatoria*, y en los otros tres casos, "puede ser deseable". En este punto del capítulo, consideramos cada caso en mayor detalle, comenzando con el de la seguridad.

Consecuencias ambientales o para la seguridad

Si una falla pudiera afectar la seguridad o el medio ambiente y no puede encontrarse ninguna tarea proactiva ni combinación de tareas que reduzca el riesgo de la falla a un nivel tolerable, algo debe ser cambiado, simplemente porque estamos lidiando con una amenaza para la seguridad o el medio ambiente que no puede ser adecuadamente prevenida. En estos casos, el rediseño es generalmente encarado con uno de estos dos objetivos:

- reducir la probabilidad de que ocurra el modo de falla a un nivel que sea tolerable. Esto generalmente se logra reemplazando al componente afectado por otro que sea más resistente y más confiable.
- cambiar el componente o el proceso de tal manera que la falla deje de tener consecuencias para la seguridad o el medio ambiente. Esto se logra comúnmente al instalar uno o más dispositivos de seguridad de los categorizados en el Capítulo 2:
  - Para alertar al operario en caso de condiciones de funcionamiento anormales
  - Para apagar el equipo cuando se produce la falla
  - Para eliminar o minimizar las condiciones anormales que siguen a la falla y que de otra manera causarían un daño mucho más serio
  - Para reemplazar a la función que ha fallado
  - Para prevenir la aparición de situaciones peligrosas

Recordemos que si se agrega tal dispositivo, los nuevos requerimientos de su mantenimiento también deben ser analizados.

Las consecuencias ambientales y para la seguridad también pueden ser reducidas eliminando materiales de procesos que puedan presentar una amenaza, o hasta abandonando del todo un proceso peligroso.

Como se mencionó en el Capítulo 5, cuando se está frente a consecuencias sobre la seguridad o el medio ambiente, el RCM no considera siquiera la cuestión de lo económico. Si el nivel de riesgo asociado con alguna falla es considerado intolerable, estamos obligados a prevenir la falla, o bien hacer

que el proceso sea seguro. La alternativa es aceptar condiciones que se sabe que son inseguras o que presentan un riesgo para el medio ambiente. En la mayoría de las industrias esto ya no es admisible.

Fallas Ocultas

En el caso de las fallas ocultas, el riesgo de una falla múltiple puede ser reducido modificando el equipo en una de cuatro maneras:

- ***hacer que la función oculta se haga evidente agregando otro dispositivo:*** Ciertas funciones ocultas pueden hacerse evidentes agregando otro dispositivo que llama la atención al operador acerca de la falla de la función oculta.

  Por ejemplo, una batería utilizada para dar energía a un detector de humo es una función oculta clásica si no se provee ninguna protección adicional. Sin embargo, se coloca una luz de aviso en la mayoría de estos detectores, de tal manera que la luz se apague si falla la batería. De esta manera la protección adicional hace que la función de la batería sea evidente. (Notemos que la luz sólo nos indica la condición de la batería, no la capacidad del detector para detectar humo).

  Se necesita un cuidado especial en este tema, porque las funciones adicionales instaladas con este propósito también tienden a ser ocultas. Si se agregan demasiadas capas de protección, se vuelve cada vez más difícil – si no imposible – definir tareas de búsqueda de falla sensatas. Un acercamiento mucho más efectivo es sustituir una función oculta por una función evidente, como lo explica el párrafo siguiente.

- **sustituir la función oculta por una función evidente:** En la mayoría de los casos esto significa sustituir un dispositivo de seguridad no dotado de seguridad inherente por uno que tenga seguridad inherente. Esto es sorprendentemente difícil de hacer en la práctica, pero si se hace, la necesidad de una tarea de búsqueda de falla desaparece inmediatamente.

  Por ejemplo, una forma muy común de avisarle al conductor que la luz de freno de su vehículo ha fallado es instalando una luz de advertencia que se enciende en caso que la luz de freno falle. (En muchos casos, esta luz se enciende durante unos segundos cuando se enciende el motor. Pero en ese mismo momento también se encienden todo el resto de las luces del tablero. En estas circunstancias puede ser que se pase por alto una de estas luces, con lo que su función es oculta.)

  El sistema también podría estar configurado de manera que sólo se pueda testear su correcto funcionamiento desactivando una luz de freno y viendo si se enciende la luz de advertencia. Esta es una tarea difícil de manejar e invasiva que es probable que cause más problemas que soluciones, con lo que es muy probable que sea descartada por ser poco práctica. Las fallas múltiples asociadas con este sistema pueden tener consecuencias graves sobre la seguridad, con lo que es necesario reconsiderar el diseño.

  Una forma de eliminar este problema es haciendo evidente la función de la luz de freno y del sistema de advertencia. Esto puede hacerse sustituyendo la luz de advertencia por cables de fibra óptica y montando estos cables de manera tal que

el automovilista pueda ver la luz de freno cada vez que los use. (en realidad, ve una pequeña luz en la punta de cada cable.) En esta situación, para el automovilista será evidente si falla una luz de freno o un cable. En otras palabras, la función de este dispositivo de protección ahora es evidente, con lo que ya no se necesita la búsqueda de fallas.

- **Sustituir la función oculta existente por un dispositivo más confiable (aunque también oculto):** La Figura 8.3 sugiere que una función oculta más confiable (en otras palabras una que tenga un tiempo medio entre fallas mayor) permitirá que la organización alcance uno de tres objetivos:
  - reducir la probabilidad de la falla múltiple sin cambiar los intervalos de tareas de búsqueda de falla. Esto incrementa el nivel de protección.
  - incrementar el intervalo entre tareas sin cambiar la probabilidad de la falla múltiple. Esto reduce los requerimientos de recursos.
  - reducir la probabilidad de la falla múltiple e incrementar los intervalos de tareas, dando más protección con menos esfuerzo.

- **duplicar la función oculta:** Si no es posible encontrar un solo dispositivo de seguridad que tenga un TMEF lo suficientemente alto como para dar el nivel deseado de protección, todavía es posible lograr cualquiera de los tres objetivos anteriores duplicando (o hasta triplicando) la función oculta.

Volvamos al ejemplo de la bomba que trabaja teniendo otra de reserva. Se explicó en la página 183 que si los usuarios quieren que la probabilidad de falla múltiple sea de menos de 1 en 1000, y la tasa de falla no anticipadas de la bomba de servicio se reduce a 1 cada 10 años, la disponibilidad de la bomba de reserva tiene que ser del 99% o más. Esto nos lleva a la conclusión que la tarea de búsqueda de fallas debe hacerse cada dos meses para poder alcanzar una disponibilidad del 99%. (sobre la base que el TMEF para esta bomba es de 8 años).

Pero, ahora asumamos que alguien decidió que la probabilidad de falla múltiple de este sistema no debe superar 1 en 100 000 (o 10^{-5}), en vez de 1 en 1 000. Si el tiempo medio entre fallas no anticipadas de la bomba de servicio (M_{GIDO}) no cambia de 10 años, aplicando la fórmula 4 del Capítulo 8 se obtiene que la indisponibilidad (U_{TOR}) de la bomba de reserva no debe exceder:

$$U_{TOR} = M_{GIDO}/M_{FM} = 10/100\ 000 = 10^{-4}$$

Con lo que la indisponibilidad de la bomba de reserva no puede ser mayor a 10^{-4} (0,01%). Si el TMEF no cambió de 8 años, aplicando la fórmula 2 del Capítulo 8:

$$FFI = 2 \times 10^{-4} \times 8 \text{ años} = 14 \text{ horas}$$

Activar una bomba de reserva con esta frecuencia es simplemente nada práctico, con lo que se debe pensar en rediseñar este sistema.

De hecho, la Figura 9.1 de la página siguiente muestra que si fuéramos a agregar una segunda bomba de reserva y aseguráramos que la disponibilidad de cada una de ellas por sí mismas es de mas del 99% (correspondiendo una indisponibilidad del 1% o 10^{-2}), la probabilidad de falla múltiple sería:

$$10^{-1} \times 10^{-2} \times 10^{-2} = 10^{-5}$$

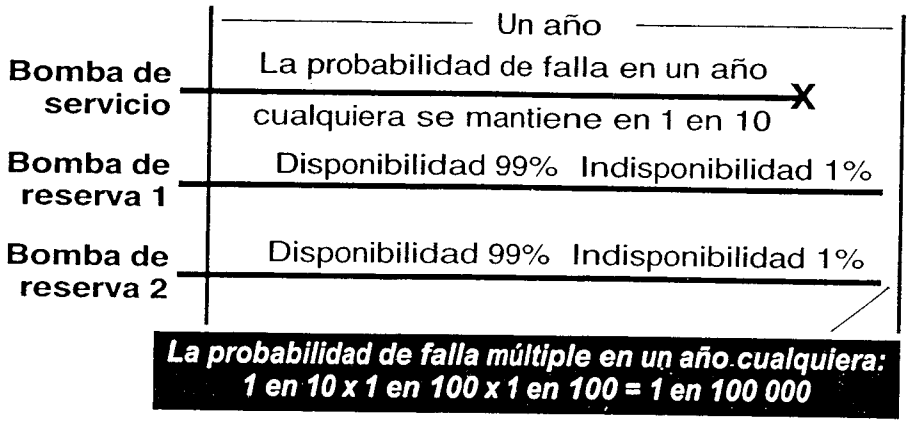


Figura 9.1: el efecto de duplicar una función oculta

o de 1 en 100 000. La Figura 8.3 sugiere se puede alcanzar esto haciendo una tarea de búsqueda de fallas sobre cada una de las bombas de reserva con la frecuencia original de una vez cada 8 semanas. Dicho de otra manera, se logra un nivel de protección mucho mayor sin cambiar el intervalo de la tarea.

Consecuencias operacionales y no operacionales

Si no puede encontrarse una tarea preventiva que sea técnicamente factible y que merezca la pena ser realizada para fallas con consecuencias operacionales o no operacionales, la decisión "a falta de" inmediata es no realizar mantenimiento programado. Sin embargo, puede que todavía sea conveniente modificar el equipo para reducir los costos totales. Para lograrlo, la planta podría ser modificada para:

- reducir el número de veces que ocurre una falla, o posiblemente eliminarla totalmente, haciendo más resistente o más confiable al componente.
- reducir o eliminar las consecuencias de la falla (por ejemplo, al instalar un equipo de reserva).
- hacer que la tarea preventiva sea costo–eficaz (por ejemplo, haciendo más accesible un componente).

Notemos que en este caso las consecuencias de la falla son puramente económicas y por lo tanto las modificaciones deben estar *justificadas económicamente*, mientras que eran la acción *obligatoria* "a falta de" si la falla tenía consecuencias para la seguridad o el medio ambiente.

No hay manera cierta de determinar si una modificación será costo–eficaz. Cada caso está gobernado por un grupo diferente de variables, que incluyen una evaluación previa y posterior de los costos operacionales y de mantenimiento, lo que queda de la vida tecnológicamente útil del activo físico, la probabilidad de que funcione la modificación, el número de otros proyectos que compitan por los recursos de capital de la compañía, etc.

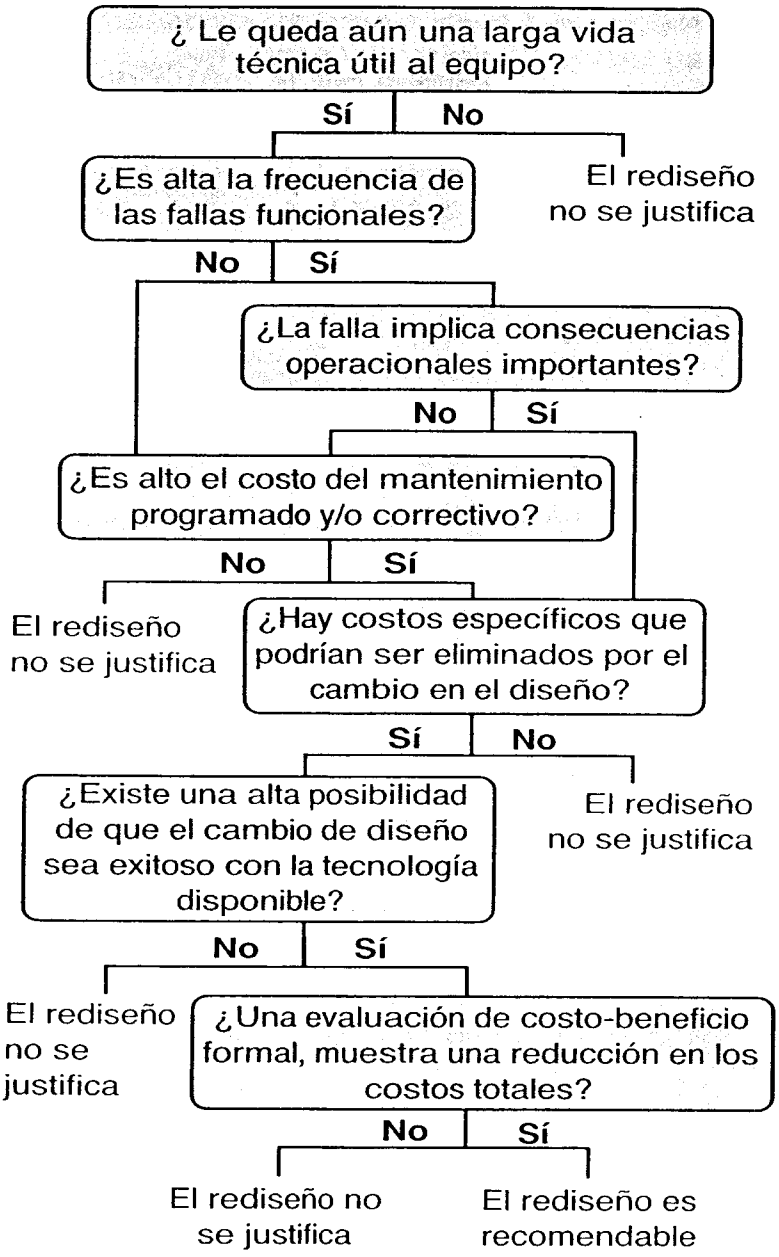


Figura 9.2:
Diagrama de decisión para una evaluación preliminar de una modificación propuesta

Un estudio detallado de costo–beneficio que tome en cuenta todos estos factores puede llevar mucho tiempo, por esto ayuda saber de antemano si es posible que el esfuerzo se vea compensado. Para ayudar en una evaluación preliminar, Nowlan & Heap[1978] desarrollaron el diagrama de decisión que muestra la Figura 9.2. Sin importar que tan confiable sea, todos los activos son eventualmente superados por nuevas tecnologías. Entonces, la primer pregunta a hacerse es si el activo considerado quedará obsoleto en un futuro cercano. Si este es el caso, entonces es claro que no se justifica modificarlo. Por otra parte, si permanecerá en servicio por un período más prolongado, la modificación puede ser que sea justificada. Es por esto que la primer pregunta de la figura 9.2 es:

¿ Le queda aún una larga vida útil técnica al equipo?

Algunas organizaciones piden que las modificaciones se repaguen en un período de (por ejemplo) 2 años. Esto lleva a que el horizonte operacional del equipo sea de dos años. Este tipo de política reduce el número de proyectos iniciados sobre la base de una estimación de costo-beneficio y asegura que sólo los proyectos que se repagan rápidamente sean sometidos a aprobación. Con lo que si la respuesta a la primer pregunta de la Figura 9.2 es "no",

probablemente no se justifique el rediseño.

Por ejemplo, la figura 9.3 muestra una tolva de acero inoxidable que es periódicamente bloqueada por material grueso. Hasta ahora, el proceso RCM ha revelado que este modo de falla cuesta u$s 400 en producción perdida cada vez que ocurre, y que no puede ser prevenido por mantenimiento. Ha sido sugerido que una forma de eliminar el modo de falla podría ser instalar una reja de acero inoxidable arriba de la salida de la tolva a un costo de u$s 6.000.

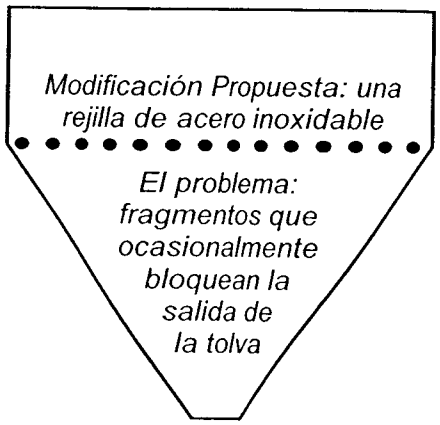


Figura 9.3:
Tolva de acero inoxidable

Si la tolva fuera a ser suplantada dentro de los dos años, es altamente improbable que esta modificación valga la pena hacerse, especialmente teniendo en cuenta que pasarán varios meses antes de poder ser puesta en marcha. Por otra parte, si la tolva fuera a permanecer en servicio por varios años más, la modificación merecería mayor consideración.

Si la respuesta a la primer pregunta es "sí", la segunda cuestión a considerar es si la falla ocurre con una frecuencia como para ser un problema:

¿Es alta la frecuencia de las fallas funcionales?

Esta pregunta elimina elementos que fallan tan rara vez que el costo de rediseño probablemente sería mayor que los beneficios que se obtendrían (a menos por supuesto que la razón para una tasa de falla baja sea una tarea preventiva. Es por esto que una respuesta negativa a esta pregunta no descarta la modificación inmediatamente – la misma tarea de mantenimiento podría ser tan costosa que aún justifique la modificación.)

Por ejemplo, si el bloqueo de la tolva ocurre una vez cada dos o tres años, nadie le va a prestar atención. Si ocurre una vez por mes, sería conveniente realizar un estudio con mayor profundidad.

Si la tasa de fallas es alta, comenzamos a considerar las implicancias económicas de la falla:

¿La falla implica consecuencias operacionales importantes?

Si la respuesta es "sí", entonces debe impulsarse la cuestión del rediseño. Si la respuesta es "no" implica que la falla tiene sólo un efecto menor sobre los costos operativos, pero aún debemos considerar los costos de mantenimiento asociados con la falla preguntándonos:

¿Es alto el costo del mantenimiento programado y/o correctivo?

Nótese que llegamos a esta pregunta por dos caminos. Como vimos, podríamos tener una respuesta negativa a la pregunta de la tasa de falla sólo porque una

tarea preventiva muy costosa está previniendo las fallas funcionales.

Una respuesta negativa a la pregunta de consecuencias operacionales significa que las fallas no deberían afectar la capacidad operativa, pero podrían resultar en altos costos de reparación. Con lo que un "sí" a cualquiera de estas dos preguntas nos lleva al cambio de diseño:

¿Hay costos específicos que podrían ser eliminados por el cambio en el diseño?

Esta pregunta se refiere a las consecuencias operacionales y a los costos directos del mantenimiento proactivo y/o correctivo. De cualquier manera, si esos costos no están relacionados a una característica específica del diseño, sería raro que el problema se resolviera con un cambio de diseño. Con lo que un "no" como respuesta a esta pregunta significa que podría ser necesario resignarse a vivir con las consecuencias económicas de esta falla. Por otro lado, si el problema podría ser relacionado directamente a un elemento de costo, entonces el potencial económico de rediseñar es alto.

En el caso de la tolva, se espera que la rejilla pueda prevenir que los fragmentos caigan en la salida de la tolva y así poder eliminar el costo de U$S400 por bloqueo.

Pero, ¿va a funcionar el nuevo diseño?, dicho de otra manera:

¿Existe una alta posibilidad de que el cambio de diseño sea exitoso con la tecnología disponible?

A pesar que un cambio particular de diseño podría ser muy deseable desde el punto de vista económico, existe la posibilidad que no tenga el efecto deseado. Un cambio dirigido a un modo de falla podría revelar otros modos de falla, requiriendo de varios intentos para resolver el problema. Cualquier cambio de diseño que implique la incorporación de nuevos accesorios también suma posibilidades de falla –tal vez demasiados.

Con lo que si haciendo una evaluación fría del cambio propuesto encontramos que tiene una probabilidad de éxito baja, sería extraño que fuera económicamente viable.

Por ejemplo, en el caso de la tolva necesitamos estar seguros que los fragmentos no se acumulen sobre la rejilla simplemente y terminen provocando un problema mucho mayor en el largo plazo.

Cualquier cambio de diseño propuesto que haga que esta posibilidad se reduzca, merece un estudio detallado de costo-beneficio:

¿Una evaluación de costo-beneficio formal, muestra una reducción en los costos totales?

Este tipo de estudios compara la reducción de costos que se espera obtener durante la vida remanente del equipo, con los costos de llevar a cabo la modificación. Para estar del lado de la seguridad, los beneficios esperados

deben considerarse como los beneficios a obtenerse si fuera exitoso el primer intento de mejora, multiplicado por la probabilidad de éxito de dicho intento. En otros casos, podría considerarse que el cambio de diseño siempre va a ser exitoso, pero solamente se conseguirán algunos de los ahorros estimados.

Si estamos seguros que las modificaciones de la tolva van a funcionar, un análisis de descuento de flujos de caja (VAN) de los números previstos para la misma (con una tasa de descuento del 10%) muestra que la modificación se pagará por sí misma en un lapso

- de cinco años si el bloqueo ocurre cuatro veces al año,
- de siete años si ocurre tres veces al año y
- de mas de diez años si ocurre dos veces al año.

Este tipo de justificación no es necesaria, por supuesto, si las características de confiabilidad de un elemento son el sujeto de garantías contractuales, o si los cambios se necesitan por otras razones que no sean costo (como seguridad).

9.3 Recorridas de Inspección

Las recorridas de inspección sirven para dos propósitos. El primero es detectar daños accidentales. Estos chequeos pueden incluir por razones de conveniencia, ciertas tareas a condición específicas, pero en general los daños pueden ocurrir en cualquier momento y no se relacionan con ningún nivel definible de resistencia a la falla.

Como resultado, no existe una base para definir un estado de falla potencial explícito o un intervalo P-F previsible. Asimismo, los chequeos no están basados en las características de la falla de ningún componente en particular, sino que su propósito es detectar excepciones imprevistas en el comportamiento de las fallas.

Las recorridas de inspección también pretenden detectar problemas debidos a la ignorancia o negligencia, tales como materiales peligrosos u objetos extraños abandonados, derrames, y otros conceptos relacionados con la limpieza y conservación del lugar de trabajo. También proporcionan a los gerentes una oportunidad de asegurar que los parámetros generales de mantenimiento sean satisfactorios, y puede ayudar a controlar que las rutinas de mantenimiento se estén haciendo correctamente. También en este caso, es difícil que haya condiciones explícitas de falla potencial, y no existen intervalos P-F previsibles.

Algunas organizaciones distinguen entre tareas programadas formales y recorridas de inspección con el pretexto de que una es mayormente técnica y la otra predominantemente administrativa, con lo que a veces las realizan diferentes personas. De hecho no tiene importancia quién las realiza, mientras que ambas se hagan con la frecuencia y profundidad necesarias para asegurar un grado de protección razonable contra las consecuencias de las fallas correspondientes.

10 El Diagrama de Decisión de RCM

10.1 Integración de Consecuencias y Tareas

En los Capítulos 5 al 9 se ha explicado detalladamente el criterio utilizado para responder a las últimas tres de las siete preguntas que conforman el proceso de RCM. Estas preguntas son:

- ***¿Qué importa si falla?***
- ***¿Qué puede hacerse para predecir o prevenir cada falla?***
- ***¿Qué debe hacerse si no puede encontrarse una tarea proactiva apropiada?***

Este Capítulo resume los criterios más importantes sobre el tema. También describe el Diagrama de Decisión de RCM, que integra todos los procesos de decisión en una estructura estratégica única. Esta estructura se muestra en la Figura 10.1, y se aplica a cada uno de los modos de falla listados en la Hoja de Información RCM.

Finalmente, este Capítulo describe la Hoja de Decisión, que es el segundo de los dos documentos centrales utilizados en la aplicación de RCM (el primero es la Hoja de Información que se muestra en la Figura 4.13).

10.2 El Proceso de Decisión de RCM

La Hoja de Decisión de RCM se observa en la Figura 10.2. El resto de este Capítulo demuestra cómo la Hoja de Decisión permite asentar las respuestas a las preguntas formuladas en el Diagrama de Decisión, y, en función de dichas respuestas, registrar:

- qué mantenimiento de rutina (si lo hay) será realizado, con qué frecuencia será realizado y quién lo hará
- qué fallas son lo suficientemente serias como para justificar el rediseño
- casos en los que se toma la decisión deliberada de dejar que las fallas ocurran.

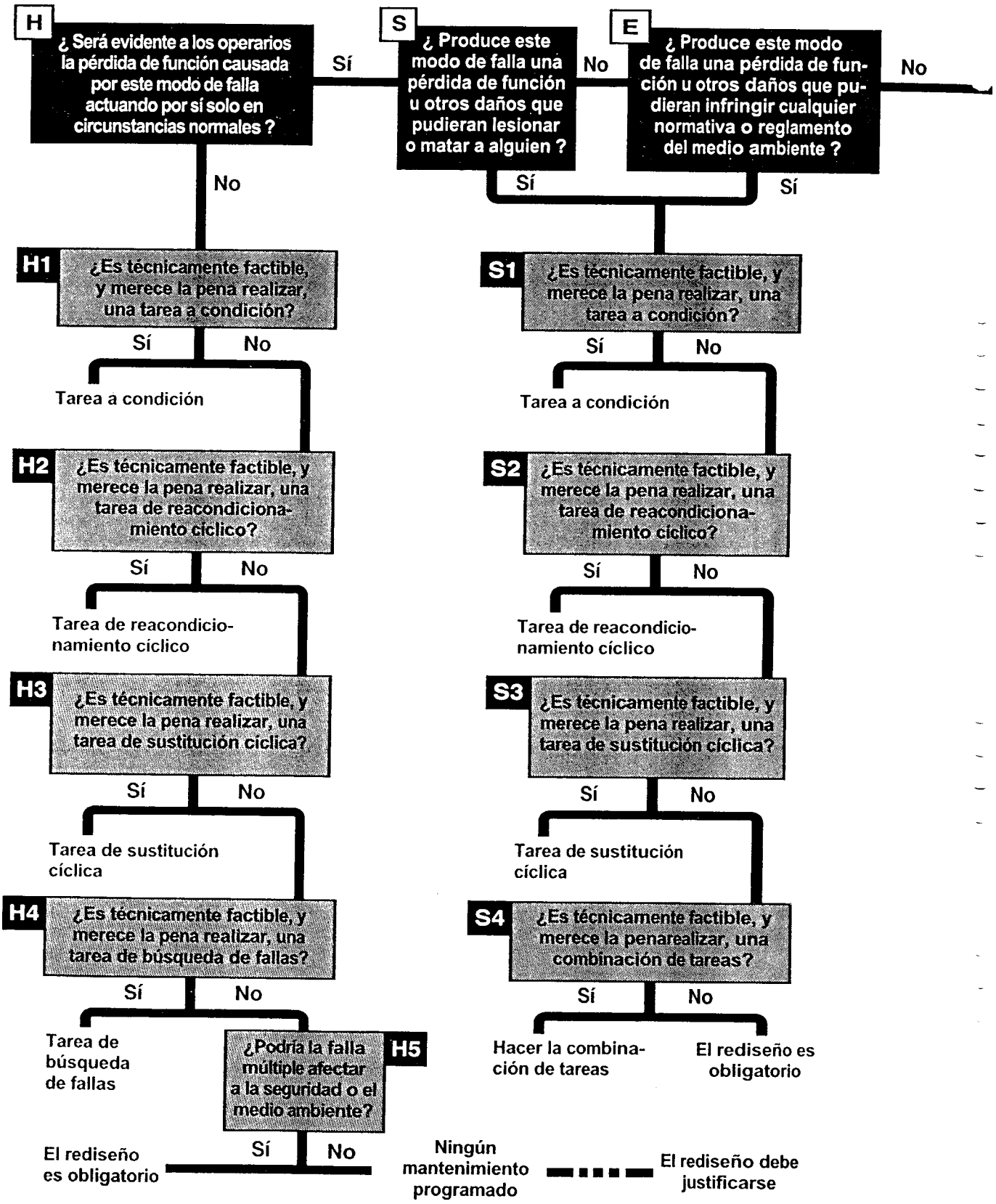
HOJA DE DECISIÓN RCMII

© 1990 ALADON LTD

SISTEMA		Sistema N°	Facilitador:	Fecha	Hoja N°
SUBSISTEMA		Subsistema N°	Auditor:	Fecha	de

Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				Acción a falta de				Tarea Propuesta	Intervalo inicial	A realizarse por
F	FF	FM	H	S	E	O	H1 S1 O1 N1	H2 S2 O1 N2	H3 S3 O3 N3	H4	H5	S4			

Figura 10.2: Hoja de Decisión RCM


H
¿ Será evidente a los operarios la pérdida de función causada por este modo de falla actuando por sí solo en circunstancias normales ?
Sí
S
¿ Produce este modo de falla una pérdida de función u otros daños que pudieran lesionar o matar a alguien ?
No
E
¿ Produce este modo de falla una pérdida de función u otros daños que pudieran infringir cualquier normativa o reglamento del medio ambiente ?
No
No
Sí
Sí
H1
¿Es técnicamente factible, y merece la pena realizar, una tarea a condición?
Sí
No
Tarea a condición
S1
¿Es técnicamente factible, y merece la pena realizar, una tarea a condición?
Sí
No
Tarea a condición
H2
¿Es técnicamente factible, y merece la pena realizar, una tarea de reacondiciona-miento cíclico?
Sí
No
Tarea de reacondicio-namiento cíclico
S2
¿Es técnicamente factible, y merece la pena realizar, una tarea de reacondiciona-miento cíclico?
Sí
No
Tarea de reacondicio-namiento cíclico
H3
¿Es técnicamente factible, y merece la pena realizar, una tarea de sustitución cíclica?
Sí
No
Tarea de sustitución cíclica
S3
¿Es técnicamente factible, y merece la pena realizar, una tarea de sustitución cíclica?
Sí
No
Tarea de sustitución cíclica
H4
¿Es técnicamente factible, y merece la pena realizar, una tarea de búsqueda de fallas?
Sí
No
Tarea de búsqueda de fallas
H5
¿Podría la falla múltiple afectar a la seguridad o el medio ambiente?
Sí
No
El rediseño es obligatorio
S4
¿Es técnicamente factible, y merece la penarealizar, una combinación de tareas?
Sí
No
Hacer la combina-ción de tareas
El rediseño es obligatorio
Ningún mantenimiento programado
El rediseño debe justificarse

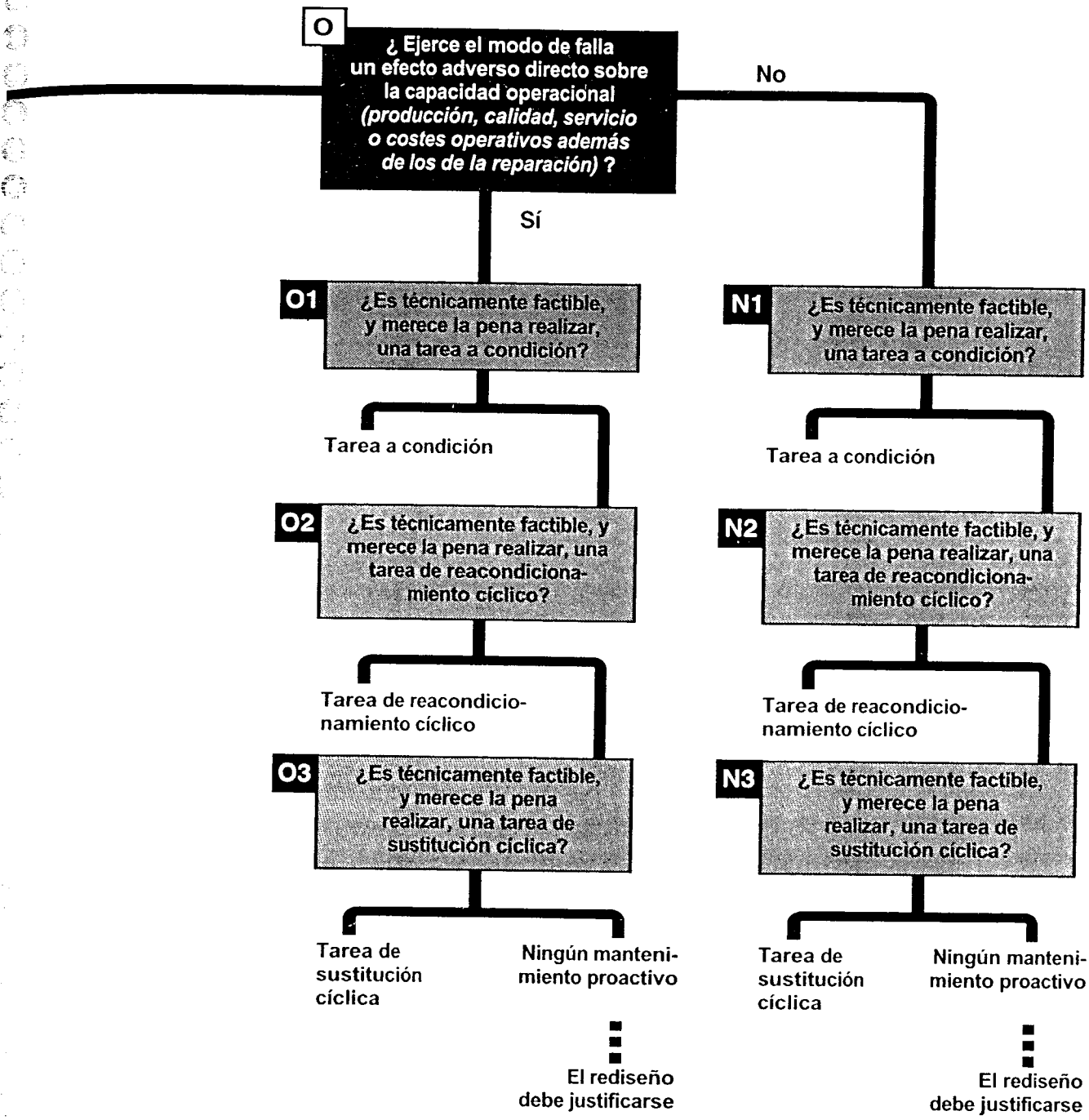


Figura 10.1:

EL DIAGRAMA DE DECISIÓN RCM II

© 1997 Aladon Ltd

La hoja de decisión está dividida en dieciséis columnas. Las columnas F, FF y FM identifican el modo de falla que se analiza en esa línea. Se utilizan para correlacionar las referencias de las Hojas de Información y las Hojas de Decisión, como lo muestra la Figura 10.3:

HOJA DE INFORMACIÓN RCMII
© 1990 ALADON LTD

SISTEMA: *Sistema de bombeo de agua de refrigeración*
SUBSISTEMA:

FUNCIÓN		FALLA FUNCIONAL (Pérdida de Función)		MODO DE FALLA (Causa da la Falla)	
1	Transferir agua del tanque X al tanque Y a no menos de 800 litros por minuto	A	Incapaz de transferir agua en absoluto	1	Se agarrota el cojinete por el uso y desgaste normal

HOJA DE DECISIÓN RCMII
© 1990 ALADON LTD

SISTEMA: *Sistema de bombeo*
SUBSISTEMA:

Referencia de Información			Evaluación de las consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Acción a falta de		
F	FF	FM	H	S	E	O				H4	H5	S4
1	A	1										

Figura 10.3: Correlación de referencias entre las Hojas de Información y las Hojas de Decisión

Los encabezamientos de las próximas diez columnas se refieren a las preguntas del Diagrama de Decisión de RCM de la Figura 10.1, de manera que:

- las columnas tituladas H, S, E, O, y N son utilizadas para registrar las respuestas a las preguntas concernientes a las consecuencias de cada modo de falla
- las tres columnas siguientes (tituladas H1, H2, H3, etc.) registran si ha sido seleccionada una tarea proactiva, y si es así, qué tipo de tarea
- si se hace necesario responder cualquiera de las preguntas "a falta de", las columnas encabezadas con H4 y H5, o la S4 son las que permiten registrar esas respuestas.

Las últimas tres columnas registran la tarea que ha sido seleccionada (si la hay), la frecuencia con la que debe hacerse, y quién ha sido seleccionado para realizarla. La columna de "Tarea Propuesta" también se utiliza para registrar los casos en los que se requiere rediseño, o si se ha decidido que el modo de falla no necesita mantenimiento programado.

En los párrafos siguientes, se explica cada una de estas cuatro secciones de la hoja de decisión en función de las preguntas que se hacen en el Diagrama de Decisión.

Consecuencias de falla

Los significados precisos de las preguntas H, S, E, y O en la Figura 10.1 se discutieron con profundidad en el Capítulo 5. Estas preguntas se hacen para cada modo de falla, y las respuestas son registradas en la Hoja de Decisión basándose en lo que a continuación muestra la Figura 10.4.

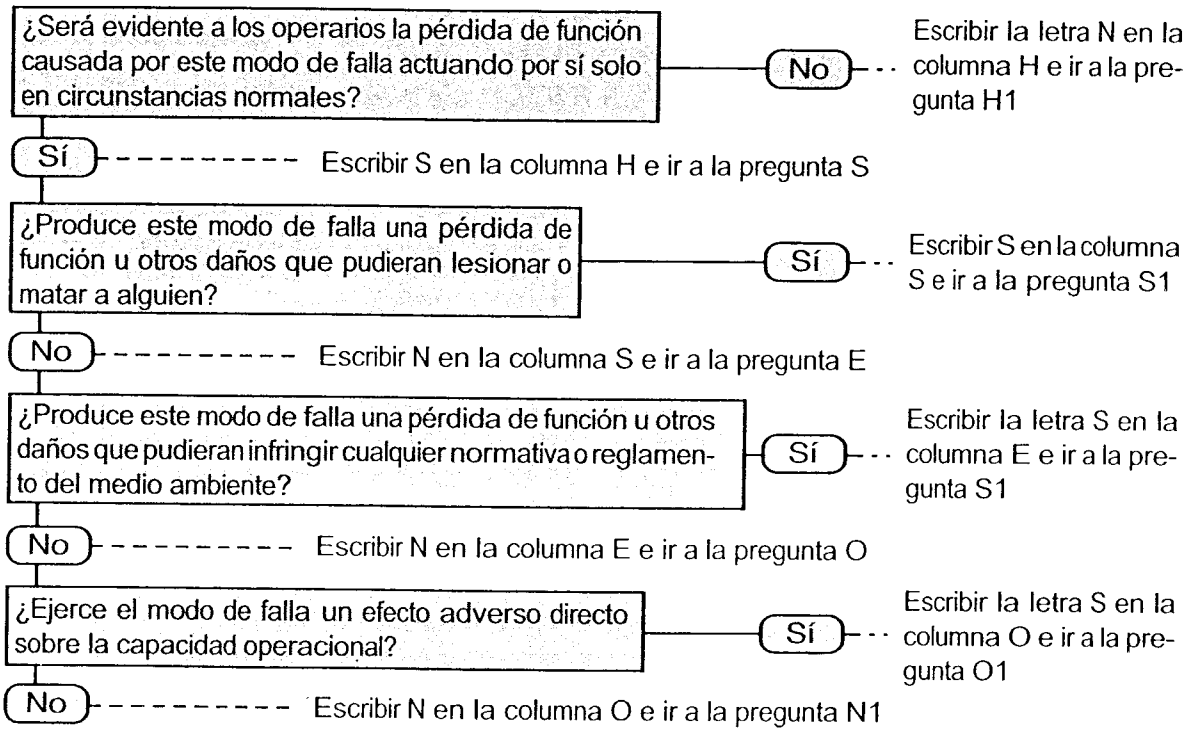


Figura 10.4: Cómo se registran las consecuencias de falla en la Hoja de Decisión

La Figura 10.5 muestra cómo las respuestas a estas preguntas se registran en la Hoja de Decisión. Notemos que:

- cada modo de falla es ubicado en solo una categoría de consecuencias. Entonces, si es clasificado como que tiene consecuencias ambientales, no evaluamos también sus consecuencias operacionales (al menos cuando realizamos el primer análisis de un activo físico cualquiera). Esto significa que, por ejemplo, si se registra una "S" en la columna E, no se registra nada en la columna O.
- una vez que las consecuencias del modo de falla han sido categorizadas, el próximo paso es buscar una tarea proactiva adecuada. La Figura 10.5 también resume el criterio utilizado para decidir *si merece la pena* realizar tales tareas.

Referencia de información			Evaluación de consecuencias			
F	FF	FM	H	S	E	O
3	A	1	N			
5	B	2	S	S		
2	C	4	S	N	S	
1	A	5	S	N	N	S
1	B	3	S	N	N	N

Una falla oculta:
Para que merezca la pena realizarla, cualquier tarea preventiva debe reducir el riesgo de esta falla a un nivel tolerable

Consecuencias para la seguridad:
Para que merezca la pena realizarla, cualquier tarea preventiva debe reducir por sí sola el riesgo de esta falla a un nivel tolerable

Consecuencias para el medio ambiente:
Para que merezca la pena realizarla, cualquier tarea preventiva debe reducir por sí sola el riesgo de esta falla a un nivel tolerable

Consecuencias operacionales:
Para que merezca la pena realizarla, cualquier tarea preventiva a través de un período de tiempo debe costar menos que el costo total de las consecuencias operacionales más el costo de la reparación de la falla que pretende prevenir

Consecuencias No-operacionales:
Para que merezca la pena realizarla, cualquier tarea preventiva a través de un período de tiempo debe costar menos que el costo de la reparación de las fallas que pretende prevenir

Figura 10.5: Consecuencias de falla - un resumen

Tareas Proactivas

Las columnas de la octava a la décima son utilizadas para registrar si se ha seleccionado una tarea proactiva, de la siguiente manera:

- la columna titulada H1/ S1/ O1/ N1 es utilizada para registrar si se pudo encontrar una tarea a condición apropiada para anticipar el modo de falla a tiempo como para evitar las consecuencias
- la columna titulada H2/ S2/ O2/ N2 es utilizada para registrar si se pudo encontrar una tarea de reacondicionamiento programado apropiada para prevenir las fallas
- la columna titulada H3/ S3/ O3/ N3 es utilizada para registrar si se pudo encontrar una tarea de sustitución cíclica para prevenir las fallas.

En cada caso, una tarea sólo es apropiada si merece la pena realizarla *y* si es técnicamente factible. En los Capítulos 6 y 7 se explicó en detalle cómo establecer si una tarea es técnicamente factible. Estos criterios se resumen en la Figura 10.6.

En esencia, para que una tarea sea técnicamente factible y que merezca la pena realizarla, debe ser posible dar una respuesta positiva a *todas* las preguntas que muestra la Figura 10.6 que se aplican a esa categoría de tareas, y la tarea debe responder al criterio de "merece la pena ser realizada" de la Figura 10.5. Si la respuesta a cualquiera de estas preguntas es "no" o se desconoce, entonces se rechaza la tarea totalmente. Si todas las preguntas pueden ser contestadas afirmativamente, entonces se registra una "S" en la columna apropiada.

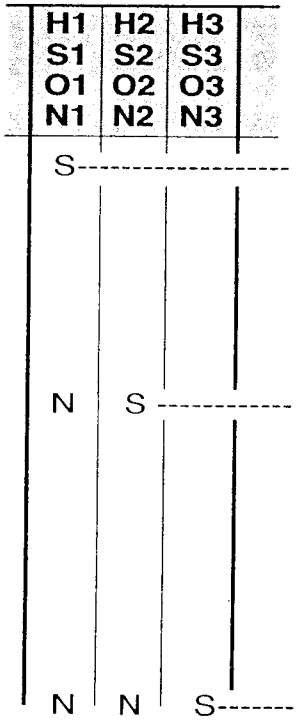


Figura 10.6:
Criterios de factibilidad técnica

¿Es técnicamente factible realizar una tarea para detectar si está ocurriendo una falla o está a punto de ocurrir? :
¿Hay alguna clara condición de falla potencial? ¿Cuál es? ¿Cuál es el intervalo P-F? ¿Es suficientemente largo como para ser de utilidad? ¿Es razonablemente consistente? ¿Es posible hacer la tarea a intervalos menores al intervalo P-F?

¿Es técnicamente factible realizar una tarea de reacondicionamiento programado para reducir la frecuencia de la falla (evitar todas las fallas en el caso en que afecte la seguridad)?
¿Hay una edad en la que aumenta rápidamente la probabilidad condicional de falla? ¿Cuál es? ¿Ocurren la mayoría de las fallas después de esta edad (todos en el caso de consecuencias para la seguridad o el medio ambiente)? ¿Restituirá la tarea la resistencia original a la falla?

¿Es técnicamente factible realizar una tarea de sustitución cíclica para reducir la frecuencia de la falla (evitar todas las fallas en el caso de que afecte a la seguridad)?
¿Hay una edad en la que aumenta rápidamente la probabilidad condicional de falla? ¿Cuál es? ¿Ocurren la mayoría de las fallas después de esta edad (todos en el caso de consecuencias para la seguridad o el medio ambiente)?

Si se selecciona una tarea, se registra una descripción de la tarea y la frecuencia con la que debe ser realizada, como se explica más adelante en este capítulo, y los analistas avanzan al próximo modo de falla. Sin embargo, como mencionamos en el Capítulo 7, debemos tener en cuenta que si parece que una tarea de orden más bajo pudiera ser más costo-eficaz que una tarea de orden más alto, entonces la tarea de orden más bajo también debe ser considerada, y elegirse la más efectiva de las dos.

Las Preguntas "a Falta de"

Las columnas H4, H5 y S4 en la Hoja de Decisión son utilizadas para registrar las respuestas a las tres preguntas "a falta de". En la Figura 10.7 se resume cómo se responde a estas preguntas. (Notemos que las preguntas "a falta de" sólo se preguntan si las respuestas a las tres preguntas previas fueron todas "no".)

Referencia de Información			Evaluación de las consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Acción a falta de		
F	FF	FM	H	S	E	O				H4	H5	S4
3	A	1	N				N	N	N	S	----------	

Figura 10.7: Las preguntas "a falta de"

¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de búsqueda de falla?

Registrar "sí", si es posible realizar la tarea y resulta práctico hacerlo con la frecuencia requerida y reduce el riesgo de la falla múltiple a un nivel tolerable.

4	B	4	N				N	N	N	N	S	-----
4	C	2	N				N	N	N	N	N	-----

¿Podría la falla múltiple afectar la seguridad o el medio ambiente?

(Sólo se hace esta pregunta si la respuesta a la pregunta H4 es no.) Si la respuesta a esta pregunta es sí, el rediseño es obligatorio. Si la respuesta es no, la acción "a falta de" es **no realizar mantenimiento programado**, pero el rediseño puede ser deseable.

5	B	2	S	S			N	N	N			S
2	A	5	S	S			N	N	N			N

¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una combinación de tareas?

"Sí", si una combinación de **dos o más** tareas proactivas cualquiera reducen el riesgo de falla a un nivel tolerable (esto rara vez sucede). Si la respuesta es no, el **rediseño** es obligatorio.

1	A	5	S	N	N	Y	N	N	N	----------			
1	B	3	S	N	N	N	N	N	N	----------			

En estos dos casos, las consecuencias de la falla son puramente económicas y no se pudo encontrar una tarea proactiva apropiada. Como resultado, la decisión "a falta de" inicial es no realizar mantenimiento programado, **pero el rediseño puede ser deseable.**

Tarea Propuesta

Si durante el proceso de toma de decisiones se ha seleccionado una tarea proactiva o una tarea de búsqueda de falla, debe registrarse la descripción de la tarea en la columna titulada "tarea propuesta". Lo ideal es que la tarea fuese descripta con el mismo detalle y precisión en la hoja de decisión como en el documento que se le entregará a la persona que deba realizar la tarea. Si esto no es posible, entonces la tarea debe ser al menos descripta con el detalle suficiente como para que quede absolutamente clara para quien escriba la descripción detallada.

Por ejemplo, consideremos una situación en la que se ha especificado una tarea a condición para un cojinete de elementos rodantes. Se explicó en el Capítulo 7 que este tipo de cojinetes pueden sufrir de una variedad de condiciones de falla potencial, incluyendo ruido, vibración, calor, desgaste, etc. Las máquinas por lo general tienen más de un cojinete de este tipo. Por esto, como mínimo la "tarea propuesta" debe especificar qué cojinete y a qué condición debe chequearse. Dicho de otra manera, si a un cojinete determinado se le debe chequear su nivel de ruido, la tarea propuesta debe redactarse como "chequear el nivel de ruido del cojinete X", y no "chequear el cojinete".

Este tema se discute en mayor detalle en el próximo Capítulo.

Si el proceso de decisión lleva a un cambio de diseño, entonces la tarea propuesta debe proveer una descripción breve del cambio de diseño. La forma real del nuevo diseño debe dejarse en manos de los diseñadores.

Por ejemplo si el proceso RCM revela (por ejemplo) que el mecanismo de fijación de una baranda tiene que ser rediseñado por un tema de seguridad, la "tarea propuesta" debe decir algo como "se requiere un mecanismo de sujeción de la baranda más seguro". No debe escribirse simplemente "se requiere rediseño". Por otro lado, debe dejarse a los diseñadores decidir sobre qué clase de mecanismo de fijación específico se utilizará.

Este tema también es discutido más extensamente en el próximo Capítulo.

Finalmente, si debe tomarse una decisión de permitir que ocurra una falla, en la mayoría de los casos debe registrarse en la columna de "tarea propuesta" la frase "ningún mantenimiento programado". La única excepción es la falla oculta en la que "el perfil de riesgo/confiabilidad es tal que no se requiere de la búsqueda de falla", como se explicó en la página 190.

Intervalo inicial

Los intervalos de tareas son registrados en la hoja de decisión en la columna de "Intervalo Inicial". Vimos que se basan en lo siguiente:

- Los intervalos de las tareas a condición están determinados por el *intervalo P-F*
- Los intervalos de las tareas de reacondicionamiento programado y de sustitución cíclica dependen de la vida útil del elemento que consideramos
- Los intervalos de las tareas de búsqueda de fallas están determinados por las *consecuencias de la falla múltiple*, que determina la disponibilidad necesaria, y el *tiempo medio entre ocurrencias de la falla oculta*

Al completar la Hoja de Decisión, debemos registrar cada intervalo de tarea de acuerdo con sus propios méritos - en otras palabras, sin referencia a otras tareas. Esto es porque la razón para realizar una tarea a una frecuencia en particular puede cambiar con el tiempo - y en realidad la razón para realizarla hasta podría desaparecer. Entonces, si la frecuencia de la tarea X está basada en la frecuencia de la tarea Y y la tarea Y luego es eliminada, la frecuencia de la tarea X pierde sentido.

Como se explica en el próximo Capítulo, si nos encontramos con un número de tareas que necesitan ser realizadas con frecuencias muy diferentes, el momento en el que deben ser consolidadas en un número menor de "paquetes de trabajo" es al compilar los programas de mantenimiento. Sin embargo, las frecuencias iniciales originalmente determinadas para las tareas, deben mantenerse siempre en la hoja de decisión para permitir deducir de dónde se derivaron las frecuencias de mantenimiento (en otras palabras, para preservar la "traza de auditoría".)

Notemos también que los intervalos de tareas pueden basarse en cualquier medida apropiada de exposición al esfuerzo. Esto incluye tiempo calendario, tiempo de funcionamiento, distancia recorrida, ciclos de puesta en marcha-detención, producción o flujo de producción, o cualquier otra variable medible que tenga una relación directa con el mecanismo de la falla. Sin embargo, el tiempo calendario se usa siempre que es posible porque es el más simple y el más económico de administrar.

"Puede ser realizado por"

La última columna en la hoja de decisión se utiliza para anotar quién debe hacer cada tarea. Notemos que el proceso de RCM considera este tema para un modo de falla a la vez. En otras palabras, no aborda el tema con ninguna idea preconcebida acerca de quién debe (o no debe) hacer el trabajo de mantenimiento. Simplemente pregunta quién es competente y confiable como para realizar correctamente *esta* tarea.

La respuesta puede ser absolutamente cualquiera. Las tareas pueden ser adjudicadas a mantenimiento, operadores, inspectores de seguros, personal de calidad, técnicos especializados, proveedores, inspectores de estructuras o técnicos de laboratorio.

Un tema controversial que ciertas veces puede aparecer en esta etapa es el de las tareas simples a condición y de búsqueda de fallas de alta frecuencia. A veces tiene sentido que estas tareas las realice el personal de mantenimiento, pero en muchos casos, usar al personal de mantenimiento para realizar estas tareas tiene las siguientes desventajas (especialmente si son especializados en varios oficios):

- Si el intervalo de la tarea es corto, la frecuencia de la inspección será muy alta –a veces más de una vez por turno. Esto puede llevar a que muchas tareas de alta frecuencia hagan que la persona de mantenimiento no haga mucho más que ir de una tarea a otra. Este tiempo de ir de un lugar a otro más el costo de planear y controlar las tareas hace que sea muy costoso que el personal de mantenimiento haga estas tareas, generalmente llegando al extremo donde simplemente no vale la pena destinarlos a estas actividades.
- Mucha gente capacitada descubre que las tareas de alta frecuencia le resultan aburridas y por lo general están poco dispuestos a realizarlas.

- En muchas partes del mundo el personal especializado es muy escaso, con lo que por lo general es difícil contar con ellos para este tipo de trabajos.

La segunda opción es dejar las tareas de alta frecuencia en manos de los operadores. Esta opción puede ser atractiva porque por lo general es más económica, y es más fácil de organizar el uso de las personas que están la mayoría del tiempo cerca de los equipos para hacer tareas de alta frecuencia. Los operadores generalmente están más motivados para cuidar de "sus" máquinas. De cualquier manera, se deben cumplir tres cosas antes que se les pueda delegar con confianza estas tareas a los operadores:

- deben estar entrenados adecuadamente para poder reconocer apropiadamente las condiciones de falla potencial en el caso de tareas a condición, y tienen que estar entrenados adecuadamente para realizar de manera segura las tareas de búsqueda de fallas de alta frecuencia
- deben tener acceso a procedimientos simples y confiables para reportar cualquier defecto que encuentren. (el diseño de estos procedimientos se discute en detalle en el Capítulo 11)
- deben tener la seguridad que se tomará una acción sobre la base de sus reportes, o que recibirán una contestación constructiva en caso de errores en el diagnóstico.

El usar operadores para este propósito también tiene implicancias profundas en términos de relaciones industriales y de relaciones jerárquicas, con lo que es un tema que debe manejarse con cuidado.

Por lo general, al igual que la mayoría de las otras decisiones del proceso RCM, quien mejor puede decidir sobre la persona que está en mejor posición para realizar cada tarea es la persona que más conoce el equipo. Este punto se discutirá con mayor profundidad en el Capítulo 13.

10.3 Llenado de la Hoja de Decisión

Para ilustrar como debe ser llenada la hoja de decisión, consideraremos tres modos de falla que ya han sido presentados con detalle en capítulos anteriores. Ellos son:

- El rodamiento que se agarrota, en la bomba que no tiene bomba de reserva, como se discutió en las págs. 109 y 110
- El rodamiento que se agarrota, en una bomba idéntica que tiene una bomba de reserva, como se discutió en las págs. 112 y 113
- La falla de la bomba de reserva contemplada como un todo, como se discutió en las págs. 122 y 123.

HOJA DE DECISIÓN RCMII
© 1990 ALADON LTD

SISTEMA	Sistema N°	Facilitador:	Fecha	Hoja N°
SUBSISTEMA	Subsistema N°	Auditor:	Fecha	de

Referencia de Información			Evaluación de las consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Acción a falta de			Tarea Propuesta	Intervalo inicial	A realizarse por
F	FF	FM	H	S	E	O				H4	H5	S4			
BOMBA UNICA															
1	A	1	S	N	N	S	S						Verificar si el cojinete principal de la bomba hace ruido	Semanal	Mecánico
1	A	2	....etc												
BOMBA DE SERVICIO CON RESERVA															
1	A	1	S	N	N	N	N	N	N				Ningún Mantenimiento Programado		
1	A	2	.....etc												
BOMBA DE RESERVA															
2	A	1	N				N	N	N	S			Arrancar la bomba de reserva en vez de la bomba de servicio y asegurar que la bomba de reserva sea capaz de llenar el tanque. Completada la prueba, volver a la bomba de servicio.	Cada 4 semanas	Operador

Figura 10.8: Hoja de Decisión RCM con entradas de muestra

Las decisiones correspondientes, se registran en la hoja de decisión mostrada en la Fig. 10.8. Obsérvense los tres puntos importantes en este ejemplo:

- las primeras dos bombas pueden sufrir de muchos más modos de falla que el modo de falla considerado. Cada uno de estos otros modos de falla también serían listados y cada uno analizado por sus características propias.
- pudieron haberse elegido otras tareas preventivas para anticipar la falla del cojinete -las decisiones del ejemplo lo son solamente a título ilustrativo.
- la bomba de reserva es tratada como "caja negra". En la práctica, si se sabe que tal bomba sufre de uno o más modos de falla dominantes, cada uno de esos modos de falla se analizarían individualmente.

En definitiva, la hoja de decisión RCM muestra no solo *qué* acción se ha seleccionado para tratar cada modo de falla, sino que también muestra *por qué* se ha seleccionado. Esta información es valiosa si en algún momento se presenta la necesidad de cambiar cualquier tarea de mantenimiento.

La posibilidad de *rastrear* cada tarea correlacionándola con la función y parámetros deseados del activo, también facilita la tarea de mantener actualizado el programa de mantenimiento. Esto es porque los usuarios pueden identificar fácilmente las tareas que son afectadas por un cambio en el contexto operacional del activo (como sería un cambio en los turnos de trabajo o una modificación al reglamento de seguridad) y se evita perder tiempo reanalizando tareas que difícilmente sean afectadas por el cambio.

10.4 La Computadora (el Ordenador) y RCM

La información contenida en las Hojas de Información y de Decisión se presta para ser fácilmente almacenada en una base de datos computarizada. De hecho, si se analiza una cantidad considerable de activos, es casi esencial utilizar una computadora. También puede utilizarse para generar listados de tareas por frecuencia y por especialidad así como para generar otros informes (modos de falla en cada categoría de consecuencias, categoría tarea por tarea, etc.). Finalmente, el almacenar el análisis en una Base de Datos hace que la revisión, perfeccionamiento, y actualización de los análisis ante la toma de conocimiento de nuevos datos y/o cambios de contexto sea infinitamente más fácil.

Sin embargo, debe notarse que la computadora (ordenador) solamente debe ser utilizada para almacenar y clasificar información de RCM, y tal vez para facilitar cálculos más complejos de Intervalos de Búsqueda de Falla. Por las razones que se verán en el Capítulo 14, nunca deben utilizarse las computadoras para manejar el proceso RCM.

11 Implementando las Recomendaciones de RCM

11.1 Implementación – Los pasos clave

Hemos visto como la aplicación correcta del proceso RCM concluye completándose las hojas de decisión. Estas detallan una cantidad determinada de *tareas rutinarias* que requieren ser hechas a intervalos regulares para asegurar que el activo continúe haciendo aquello que sus usuarios quieren que haga, junto con las *acciones "a falta de"* que deben adoptarse si no puede encontrase una tarea rutinaria adecuada.

La gente que participa de este proceso aprende y logra comprender en profundidad el funcionamiento del activo y de qué manera falla. Esto hace que frecuentemente, los participantes cambien su forma de hacer las cosas, con lo que por lo general, se obtienen mejoras sensibles en el rendimiento del activo. De cualquier forma, para obtener los máximos beneficios a largo plazo de RCM, deben seguirse ciertos pasos sobre una base formal para implementar las recomendaciones que surjan del análisis. Estos pasos deberían asegurar que:

- Todas las recomendaciones sean aprobadas formalmente por aquellos gerentes que sean los responsables finales del activo
- Todas las tareas de rutina estén descriptas de forma clara y consistente
- Todas las acciones de cambio a realizar por única vez (a los diseños, a la manera en que el activo es operado o a la capacidad de operadores y gente de mantenimiento) sean identificadas e implementadas correctamente
- Los cambios en las tareas de rutina y en procedimientos operativos sean incorporados en el grupo de tareas apropiado
- Los grupos de tareas y las acciones de cambio a realizar por única vez sean implementadas. Específicamente, esto implica:
  - La incorporación de los grupos de tareas en sistemas que aseguren que éstas serán hechas correctamente, por la gente adecuada y en el momento correcto.
  - El asegurar que toda falla que se detecte será tratada de manera expeditiva.

Estos pasos están resumidos en la Figura 11.1 que se muestra a continuación. Los más importantes son discutidos con mayor detalle en el resto del capítulo.

Tarea Propuesta	Intervalo Inicial	Puede ser hecho por
Ningún mantenimiento programado		
Controlar los pernos de unión	Mensual	Mecánico
Ningún mantenimiento programado		
Rediseñar la baranda		
Chequear el nivel de aceite del agitador de la caja reductora	Semanalmente	Operador
Chequear la tensión de la cadena principal	Mensual	Mecánico
Calibrar la distancia entre ejes	Anualmente	Técnico
Ningún mantenimiento programado		
Vaciar el tanque principal y verificar si la alarma de bajo nivel suena cuando quedan 50 litros	4 años	Operador

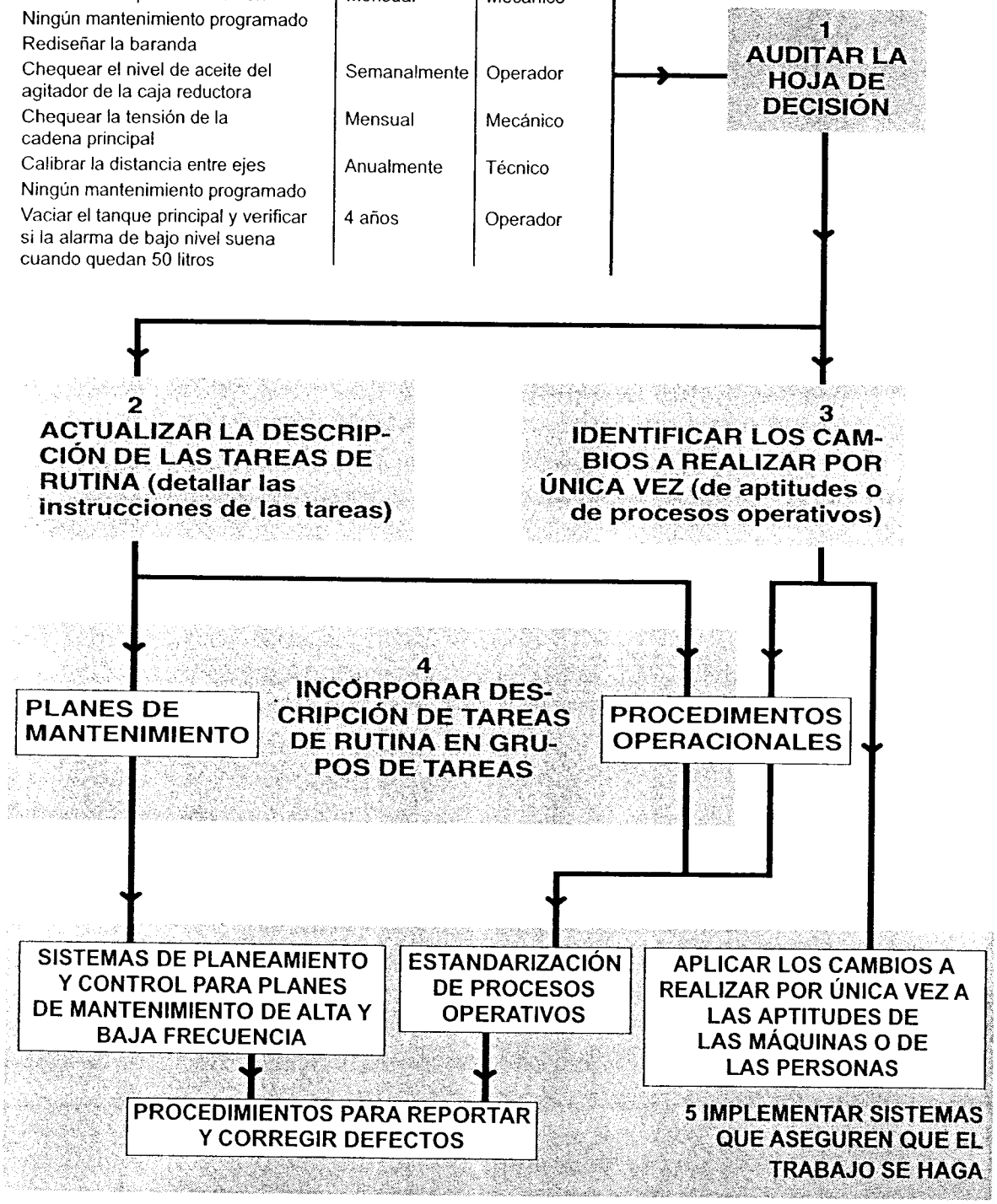


Figura 11.1: Después de RCM

11.2 La Auditoría de RCM

Si se aplica correctamente, el proceso RCM provee la estructura más robusta disponible actualmente para la formulación de estrategias de administración de activos. Estas estrategias inciden profundamente sobre la seguridad, la integridad ambiental y el bienestar económico de la organización que utiliza los activos. Sin embargo, si a pesar de los mejores esfuerzos de las personas que aplican el proceso, ocurre una falla catastrófica, todas las decisiones tomadas con RCM serán sometidas a una profunda y a veces muy controvertida, revisión por parte de instituciones regulatorias, compañías aseguradoras y representantes de las víctimas (o de los sobrevivientes). Como resultado de esto, cualquier organización que utiliza RCM debe tener mucho cuidado en asegurarse que la gente que lo aplica sepa bien lo que está haciendo, y en estar satisfechos que sus decisiones son sensatas y defendibles. El último paso es conocido como la Auditoría de RCM.

Las auditorías RCM implican una revisión formal de los contenidos de las hojas de información y de decisión de RCM. En esta sección se discutirá sobre quién debe hacer la auditoría, cuándo debe hacerse y qué implicaciones conlleva.

Quién debe hacer la auditoría

Si algo realmente malo llegara a ocurrir, los gerentes tienen la responsabilidad final sobre el activo, con lo que tienen interés personal en que sus empleados y ellos mismos sigan los pasos necesarios para evitar este tipo de sucesos. Como se mencionó en el Capítulo 1, los gerentes no tienen por qué hacer las auditorías ellos mismos, con lo que podrían delegarlas en una persona de su entera confianza. De todos modos, si se hace esto, debe entenderse siempre que las auditorías se realizan en representación del gerente, con lo que en última instancia la responsabilidad por las decisiones tomadas sigue recayendo sobre ellos. (todo aquel que lleve a cabo las auditorías debe estar altamente capacitado en RCM)

Si el auditor no está de acuerdo con cualquier resultado o conclusión, debe discutir el asunto con la gente que llevó a cabo el análisis. En este punto, los auditores deben estar preparados para aceptar que ellos también pueden estar equivocados. (En la mayoría de los casos, no más del 5% de las decisiones son cuestionadas.)

Cuándo debe realizarse la auditoría

Una vez que el análisis haya sido completado, deben llevarse a cabo las auditorías tan pronto como sea posible (preferiblemente dentro de las dos semanas), por tres razones:

- La gente que realizó el análisis está ansiosa por ver los resultados de sus esfuerzos puestos en práctica. (si se hace muy lentamente, comienzan a perder interés, y peor aún, comienzan a cuestionar el hecho que se los haya involucrado)
- La gente todavía recuerda claramente por qué tomaron cada decisión
- Cuanto antes se implementen las decisiones, antes la organización obtendrá los beneficios del ejercicio.

Cuando se llega a un acuerdo sobre todos los puntos del análisis, se implementan las decisiones como se describe en el resto de este capítulo.

Qué implica la auditoría

Un análisis RCM necesita ser auditado desde el punto de vista del método y del contenido. Cuando se revisa el método aplicado, el auditor verifica que el proceso RCM haya sido aplicado correctamente. Cuando se revisa el contenido, el auditor verifica que se haya reunido la información correcta y que se hayan sacado las conclusiones correctas, ambas cosas desde el punto de vista del activo y del proceso del que forma parte. Las cuestiones que por lo general necesitan ser atendidas son las siguientes:

Niveles de análisis

El análisis debe llevarse a cabo al nivel adecuado. El error más común es analizar los activos con un nivel muy bajo, y el síntoma usual es tener una gran cantidad de ítems con sólo una o dos funciones cada uno.

Funciones

Todas las funciones del activo deben ser descriptas de manera clara y correcta. Los puntos a tenerse en cuenta son los siguientes:

- Cada una de las funciones incluidas deben definir sólo una función, a pesar que pueda incorporar más de un estándar de funcionamiento. Como regla, cada una de las funciones incluidas debe contener sólo un verbo (a menos que sea un dispositivo de protección)
- Los estándares de funcionamiento deben estar cuantificados, y deben indicar qué es lo que debe ser capaz de hacer el activo en su contexto operacional actual, y no su capacidad de diseño (qué puede hacer)
- Deben ser listados todos los dispositivos de protección y sus funciones deben estar descriptas correctamente ("hacer X si ocurre Y")
- Se deben listar las funciones de todos los elementos de medición e indicadores, junto con los niveles de precisión deseados.

Fallas Funcionales

Deben ser listadas todas las fallas funcionales asociadas con cada función (usualmente la pérdida total de la función más la negativa de cada uno de los estándares de funcionamiento enunciados en la función).

Modos de Falla

Asegurarse que no se haya omitido ningún modo de falla que haya ocurrido en el pasado o que tengan posibilidad cierta de ocurrir. La descripción de los modos de falla debe ser específica. En particular,

- Deben incluir un verbo y no solamente especificar un componente
- El verbo debiera ser otro distinto a "falla" o "mal funcionamiento" a menos que estos sean apropiados para tratar la falla de un subsistema como un modo de falla simple (opción 3 de la página 91)
- Cuando se habla de la falla de una válvula o un interruptor, debe indicarse si falló en posición abierta o cerrada.

Los modos de falla deben estar relacionados directamente a la falla funcional que se está considerando, y no deben ser transpuestos los modos y los efectos de falla, por ejemplo:

Modo de falla	Efecto de la falla
Se detiene el motor	Impulsor de la bomba trabado por una piedra

Otro error muy común es combinar dos modos de falla sustancialmente diferentes en una descripción, como se muestra a continuación:

Incorrecto	Correcto
1.Filtro tapado o roto	1.Filtro tapado
	2.Filtro roto

Efectos de la Falla

La descripción de los efectos de la falla permite decidir:

- Si la falla será evidente para los operadores del equipo (y cómo será evidente)
- Si la falla afecta la seguridad (y cómo la afecta)
- Qué efectos tiene la falla (si existiera alguno) sobre la producción o las operaciones (volúmenes de producción, calidad de producto, servicio al cliente)

Los efectos de la falla no deberían describir de manera literal 'el efecto en sí' como "Esta falla afecta la seguridad" o "esta falla es evidente". Deben indicar el tiempo total de parada probable más que el tiempo de reparación, y debe indicar qué debiera ser hecho para rectificar la falla (remplazar, reparar, restaurar, etc.).

Finalmente, los auditores deben constatar que todo lo que se dijo que se "analizaría de manera separada" realmente está analizado en otro documento.

Evaluación de las consecuencias

Debe tenerse especial cuidado para asegurar que la pregunta de funciones ocultas se haya respondido correctamente (pregunta H de la página 204). En particular, si en esta pregunta se le ha dado el significado correcto a los términos "por sí mismo" y "en circunstancias normales", como se explicó en las páginas 128 y 131. También se le debe prestar atención especial a la evaluación de las consecuencias sobre la seguridad y el medio ambiente en aquellas fallas que son evidentes, y a la efectividad de las tareas que se seleccionaron para el manejo de este tipo de fallas.

Selección de tareas

Toda tarea que haya sido seleccionada no sólo debe satisfacer el criterio de ser técnicamente factible como se explicó en los capítulos 6, 7 y 8, sino que también debe eliminar o minimizar las consecuencias de la falla. Los puntos fundamentales a los que debe prestarse atención son:

- Si la respuesta a la pregunta H es 'No' y la respuesta a la pregunta H4 es 'No', entonces debe contestarse la pregunta H5. Si la respuesta a la pregunta H5 es 'Sí', la tarea propuesta no debe ser "Ningún mantenimiento programado"
- Si la respuesta a la pregunta S o E es 'Sí', la tarea propuesta no debe ser "Ningún mantenimiento programado"
- Si la falla tiene consecuencias operacionales o no operacionales, la tarea debe ser costo-eficaz.

Las tareas propuestas o las acciones "a falta de" deben ser descriptas con suficiente detalle como para que el auditor no tenga dudas en cuanto a lo que se pretende. En particular, la descripción de las tareas de rutina no debe simplemente listar el tipo de tarea ("tareas a condición programadas" o "búsqueda de fallas programada", etc.).

La descripción de la tarea debe estar también relacionada solamente y de manera directa con el modo de falla en cuestión. No debería incorporarse una combinación de tareas ya que por lo general esto significaría dos modos de falla diferentes (excepto que la respuesta a la pregunta S4 sea Sí). Por ejemplo:

Incorrecto	Correcto
Inspeccionar el desgaste de la correa y ajustar su tensión	Ajustar la tensión de la correa o Inspeccionar el nivel de desgaste de la corea

Intervalo inicial

Los intervalos de las tareas deben haber sido determinados de acuerdo con el criterio establecido en los Capítulos 6, 7 y 8. En particular, se debe estar atento a la tendencia que existe de confundir los intervalos P-F con la vida útil cuando se definen intervalos en tareas a condición.

11.3 Descripción de tareas

Antes que cualquiera de las tareas propuestas llegue a manos de quien debe realizarlas, deben ser descriptas con el detalle suficiente para que no quede ninguna duda acerca de lo que debe ser hecho. Sin duda alguna, el grado de detalle que se requiere estará influido por la experiencia y las habilidades generales de las personas involucradas en su realización. De cualquier manera, hay que tener en mente que cuanto menor detalle se tenga en la descripción de la tarea, mayor es el riesgo de que alguien olvide hacer un paso importante o que elija hacer una tarea errónea o ambas cosas a la vez. En este contexto, se debe tener un cuidado especial en la descripción de tareas de búsqueda de fallas cuando ésta involucra la simulación de una situación de peligro para testear el funcionamiento de un mecanismo de protección.

La descripción de las tareas también debe explicar la acción a seguir si se encuentra algún defecto. (por ejemplo, ¿debe reportarse el defecto a un supervisor o al departamento de mantenimiento – o debe ser corregido inmediatamente?). Deben usarse con precaución expresiones tales como 'chequear la condición B del componente A y reemplace de ser necesario', ya que la parte del 'chequear' lleva solamente unos segundos, mientras que la parte del 'remplazo' puede llevar varias horas. Esto puede hacer casi imposible la determinación adecuada del tiempo muerto para la tarea. Las instrucciones de este tipo deben ser escritas como 'chequear la condición B del componente A y reportar defectos al supervisor'. Solo utilice la expresión "de ser necesario" para tareas rutinarias cortas, como ser 'chequee el nivel de aceite de la caja reductora utilizando una varilla graduada y rellene con Wonderoil SAE 40 de ser necesario'. A continuación en la figura 11.2 se muestra la manera correcta e incorrecta de especificar las tareas:

Incorrecto	***Correcto***
Inspeccionar los acoples	Inspeccionar los pernos de los acoplamientos del tornillo sin fin y reemplazarlos de ser necesario *o* Inspeccionar visualmente si las bridas de acople del agitador tienen fisuras y en caso de defectos reportarlos al supervisor de mantenimiento... etc.
Calibrar manómetros	Montar el manómetro de pruebas de 0 a 20 bar para testear y chequear si las lecturas de presiones del manómetro PI1204 están dentro de los 0,5 bar de las lecturas del manómetro de pruebas cuando este indique una presión de 8 bar. Coordinar el reemplazo de los manómetros fuera de especificación cuando se realice la parada de la planta para limpieza *o* Remover el manómetro PI1204 y enviarlo al taller para calibración según el procedimiento indicado en el manual 27A

Figura 11.2: Descripción de tareas

En las páginas 210 y 211 se explicó que cada tarea debía definirse en las hojas de decisión tan claramente como sea posible. Esto ahorra la duplicación de esfuerzos que ocurre cuando alguien más debe escribir posteriormente los procedimientos en forma detallada. Además esto reduce la posibilidad de errores en la transcripción. De cualquier manera, si la falta de tiempo no permite especificar los procesos durante el análisis RCM, estos deben especificarse más tarde. Como dijimos anteriormente, por lo general esto puede hacerse como parte de una iniciativa del tipo de ISO 9000.

Nótese que si la descripción detallada de tareas se hará más adelante, lo ideal sería que fuera hecha por alguien que haya participado del análisis RCM original. Si esto no pudiera hacerse, hay que asegurarse que las terceras partes entiendan que su trabajo es el de redactar con más detalle las tareas definidas en la hoja de decisión, y no el de re-auditar el análisis.

Información básica

Además de una clara descripción de la tarea misma, el documento en el que se lista la tarea debe establecer claramente lo siguiente:

- Una descripción del activo al cual se le realiza la tarea junto con el número del mismo en caso de ser necesario.
- Quién debe hacer la tarea (operador, electricista, instrumentista, técnico, etc.)
- La frecuencia con la cual se debe hacer la tarea
- Si el equipo debe detenerse (y cómo) y/o aislarse mientras se hace la tarea, junto con cualquier otra clase de medida de seguridad que deba tomarse
- Herramientas especiales y repuestos prescritos. Listándose estos ítems se pueden ahorrar muchas idas y vueltas improductivas una vez comenzada la tarea.

ISO 9000 y RCM

El objetivo primordial de RCM es identificar qué tareas debe hacer la gente. (en otras palabras, asegurarse que "hagan las tareas correctas".). Por otro lado, el aporte principal dado por los sistemas de aseguramiento de calidad como ISO 9000 es definir tan claramente como se pueda aquellas tareas que la gente debe hacer para minimizar la posibilidad de error. (en otras palabras, asegurarse que "hagan correctamente las tareas".)

Esto sugiere que el proceso de transferir las tareas desde la hoja de decisión de RCM a documentos para los usuarios finales puede verse como el punto en el cual el output del análisis RCM se vuelve el input del procedimiento de documentación de ISO 9000. Esto también sugiere que si se planea aplicar ambas iniciativas, tiene más sentido aplicar primero RCM.

11.4 Implementando Cambios a realizar por Única Vez

Al finalizar un típico análisis RCM, no es raro encontrar que entre el 2 y el 10% de los modos de falla implican un rediseño. En la parte 2 del capítulo 9 se mencionó que en el contexto de RCM, rediseñar significa un cambio a realizar por única vez en alguna de las tres áreas siguientes:

- Un cambio en la configuración física de un activo o un sistema
- Un cambio de procesos o de procedimientos operativos
- Un cambio en las capacidades de una persona, generalmente por capacitación.

Una vez que sean aceptados por los auditores, estos cambios deben implementarse tan rápido y responsablemente como sea posible. Los puntos fundamentales en cada una de estas tres áreas se discuten a continuación

Cambios en la configuración física

Todas las modificaciones deben ser:

- *Justificadas adecuadamente*. En el capítulo 9 se explicó que las modificaciones deben justificarse en términos de sus consecuencias. Las modificaciones introducidas para atacar fallas simples o múltiples que tienen consecuencias sobre la seguridad o el medio ambiente deben reducir el riesgo (frecuencia y/o severidad) de las consecuencias a un nivel que sea tolerable. Hemos visto en la figura 9.2 un algoritmo que puede ser usado para justificar modificaciones introducidas para atacar fallas que sólo tengan consecuencias económicas.
- *Diseñadas correctamente* por ingenieros cualificados adecuadamente. Como regla, no debe intentarse realizar el rediseño del activo durante el proceso RCM, pero el diseñador deberá consultar con la gente que realizó el análisis para desarrollar una especificación correctamente enfocada
- *Implantadas adecuadamente*. Deben seguirse ciertos pasos que aseguren que las modificaciones se están llevando a cabo de la forma en que se proyectaron en términos de tiempo, costo y calidad, y que todos los diagramas, manuales y listados de componentes son correctamente actualizados.
- *Dirigidos adecuadamente*. Las modificaciones no deben interferir con las actividades esenciales del mantenimiento de rutina en otras partes de la planta, y deben evaluarse e implementarse de manera adecuada los requerimientos de mantenimiento de cada uno de los ítems del equipo que se modificó.

Cambios en la manera en que se opera la planta

Los cambios a realizarse por única vez en la manera en que se debe operar la planta se manejan de la misma manera que las tareas rutinarias que se incorporaron en los procesos operativos, como se explica en la siguiente parte de este capítulo.

Cambios en las capacidades de las personas
Como se explicó en el capítulo 4, el proceso RCM revela frecuentemente ciertos modo de falla causados por deslices u omisiones de parte de los operarios o gente de mantenimiento (errores humanos basados en las capacidades). Esto se vuelve visible inmediatamente a cualquier operario o persona de mantenimiento que participa directamente del proceso, haciendo que modifique apropiadamente su comportamiento tan pronto como aprende qué es lo que está haciendo mal.

De cualquier forma, también necesitamos asegurarnos que la gente que no participó directamente del proceso adquiera las capacidades pertinentes. En la mayoría de los casos, la forma más eficiente de hacer esto es revisando o extendiendo los programas de capacitación existentes, o directamente desarrollando programas nuevos. En la mayoría de las organizaciones, esto puede hacerse en conjunto con el departamento de capacitación.

11.5 Grupos de tareas

Una vez que los procedimientos de mantenimiento hayan sido completamente especificados, necesitan ser agrupados de manera que puedan ser programados y organizados sin demasiada dificultad, y de manera que puedan ser presentadas a la gente que ejecutará las tareas de manera prolija y compacta. Esto puede hacerse de dos maneras:

- Los procedimientos de mantenimiento de alta frecuencia que serán hechos por los operadores pueden incorporarse directamente a los procedimientos operativos del equipo
- El resto de las rutinas de mantenimiento son agrupadas en planes y listados por separado.

Procedimientos operativos estándar
Como se dijo anteriormente en este capítulo, cualquier cambio que sea necesario realizar en la forma en que se opera el activo debe documentarse dentro de los procedimientos operativos estándar, o POE. (en los casos en que todavía no existen dichos POEs, será necesario desarrollarlos para asegurarse que los cambios sean implementados). En muchos casos, la manera más simple y económica de manejar las tareas de alta frecuencia son los POE a realizar por los operadores, como se ilustra en la Figura 11.3 de la página siguiente.

Como regla, solamente deberían integrarse a los procedimientos operativos las tareas que deben hacerse a intervalos no mayores de una semana. Las tareas que debe realizar el operador a intervalos mayores se deben agrupar en planes aparte y programarse, organizarse y controlarse de la misma manera que los planes de mantenimiento, como lo describe el Punto 6 de este capítulo.

Tarea propuesta	Intervalo inicial	Puede ser hecho por
Ningún mantenimiento programado		
Controlar los pernos de unión	Mensual	Mecánico
Ningún mantenimiento programado		
Rediseñar la baranda		
Chequear el nivel de aceite del agitador de la caja reductora	Semanalmente	Operador
Chequear la tensión de la cadena principal	Mensual	Mecánico
Calibrar la distancia entre ejes	Anualmente	Técnico
Ningún mantenimiento programado		
Vaciar el tanque principal y verificar si la alarma de bajo nivel suena cuando quedan 50 litros	4 años	Operador

Procedimiento operativo estándar

Máquina Lavadora Widget

Al comienzo del turno:

- Llenar la tolva de alimentación
- Abrir la llave de paso y esperar hasta que la presión alcance los 50 psi
- (Sólo el lunes por la mañana) Chequear el nivel de aceita del agitador de la caja reductora utilizando una varilla indicadora y dar aviso si está por debajo del nivel 2
- Oprimir el botón de arranque
- Abrir a válvula de detergente
- Comenzar la alimentación

etc...

Figura 11.3:
Transfiriendo una tarea de una hoja de decisión a un POE

Planes de Mantenimiento

Un plan de mantenimiento es un documento que lista un grupo de tareas de mantenimiento que debe realizar una persona con un nivel de conocimientos específico en un activo especificado y con una frecuencia especificada. La Figura 11.4 muestra la relación entre estos planes y las hojas de decisión de RCM:

Tarea propuesta	Intervalo inicial	Puede ser hecho por
Ningún mantenimiento programado		
Controlar los pernos de unión	Mensual	Mecánico
Ningún mantenimiento programado		
Rediseñar la baranda		
Chequear el nivel de aceite del agitador de la caja reductora	Semanalmente	Operador
Chequear la tensión de la cadena principal	Mensual	Mecánico
Calibrar la distancia entre ejes		
Ningún mantenimiento programado	Anualmente	Técnico
Vaciar el tanque principal y verificar si la alarma de bajo nivel suena cuando quedan 50 litros	4 años	Operador

Procedimiento operativo estándar

Máquina Lavadora Widget

Intervalo	Realizado por
Mensual	Mecánico

Detener la máquina y seguir el procedimiento de enclavamiento X, luego

1. Controlar visualmente la unión de la correa principal buscando pernos flojos y ajustarlos de ser necesario
2. Controlar la tensión de la cadena principal y tensarla en caso que exista un juego que exceda los 10mm medidos en el medio de los piñones

Figura 11.4:
Transferencia de tareas desda la hoja de decisión a un plan de mantenimiento

Compilar los planes de mantenimiento desde las hojas de decisión de RCM es un proceso bastante directo. De cualquier manera, es necesario tener en cuenta algunos factores adicionales como los que se explican a continuación.

Consolidación de Frecuencias

En el Capítulo 7 se mencionó que si aparece el diagrama de decisión un rango muy amplio de intervalos de tareas, éstos deben consolidarse en un número menor de grupos de tareas cuando se compilan los planes de trabajo basados en las hojas de trabajo. La Figura 11.5 da un ejemplo extremo de la variedad de intervalos de tareas que pueden aparecer en una hoja de decisión, y cómo pueden consolidarse en un número menor de frecuencias en los planes de mantenimiento.

Las tareas más costosas, en términos del costo directo y de la cantidad de tiempo muerto necesario para hacerlas, tienden a determinar los intervalos básicos de los planes. De cualquier manera, el planeamiento se simplifica si los intervalos son múltiplos entre ellos, como se muestra en el ejemplo.

Intervalos de las tareas en las hojas de decisión	**Intervalos en los planes de mantenimiento**
Diario	Diario
Semanal	Semanal
2 semanas	
Mensual	Mensual
6 semanas	
2 meses	
3 meses	3 meses
4 meses	
6 meses	6 meses
9 meses	
12 meses	12 meses

Figura 11.5: Frecuencias de tareas consolidadas

Nótese también que si se cambia en este sentido la frecuencia de una tarea, debe siempre incorporarse al plan con una frecuencia mayor. Los intervalos de las tareas nunca deben incrementarse arbitrariamente ya que haciendo esto puede llegar a moverse la frecuencia de una tarea a condición fuera del intervalo P-F para esa falla o puede moverse una tarea de sustitución cíclica más allá del fin de la vida útil de ese componente.

Contradicciones

Cuando un plan de baja frecuencia incorpora un plan de alta frecuencia, ¿debe incorporarse este último como una instrucción global o debe reescribirse por completo? En otras palabras, ¿debería (por ej.) un plan anual incluir una instrucción como "realice el plan trimestral", o deben reescribirse todas las tareas del plan trimestral en el plan anual?

De hecho, es atinado reescribir los planes para evitar que surjan contradicciones. Por ejemplo, considere qué pasaría en una situación en la que el plan trimestral incluya la instrucción "Revise el nivel de aceite y rellene de ser necesario", y el plan anual de la misma máquina comienza diciendo "Realice el plan trimestral", y más adelante dice "drene, enjuague y recargue la caja reductora"

Demasiadas contradicciones y anomalías de este tipo erosionan rápidamente la credibilidad del sistema ante los ojos de la gente que hace el trabajo, con lo que es útil tomarse un tiempo de más y asegurarse que no ocurran.

Incorporando tareas

Cuando se compilan planes sobre la base antes descripta, por lo general existe la tentación de empezar a agregar tareas al plan una vez que está completo. Esto se hace por lo general pensando que "cuando hacemos A y B podemos aprovechar y también hacer X, Y y Z". Esto debe evitarse por las siguientes razones:

- Las tareas extra aumentan la carga de trabajo de rutina. Si se agregan demasiadas tareas, la carga de trabajo se incrementa al punto que o no hay suficiente mano de obra para hacer todas las tareas o que el equipo no puede ser cedido por el tiempo requerido para hacerlas o ambas cosas a la vez.
- La gente que hace las tareas incluidas en los planes se da cuenta rápidamente que X, Y y Z no son estrictamente necesarias, y por lo tanto todo el plan no es estrictamente necesario. Como resultado de ésto, comienzan a buscar razones para no hacer el plan. Una vez que las encuentran, las tareas A y B tampoco se hacen y todo el programa de mantenimiento comienza a quedar de lado.

Este es un problema común durante las paradas de planta. Se hacen muchas tareas no porque sean realmente necesarias, sino porque la planta está parada y es posible "acceder" al equipamiento. Esto aumenta el costo y muchas veces el tiempo de detención de la planta. El trabajo innecesario también traerá aparejado un incremento de la mortalidad infantil cuando la planta comience a trabajar nuevamente.

(Esto no quiere decir que el personal que hace mantenimiento de rutina se tenga que concentrar únicamente en su tarea específica e ignorar cualquier otra falla potencial o funcional que pudieran encontrar. Obviamente deben mantener abiertos los ojos y los oídos. El punto es que el plan sólo debe especificar lo que realmente necesita ser hecho a esa frecuencia).

11.6 Sistemas de Planeamiento y Control de Mantenimiento

Programas de Mantenimiento de Alta y Baja Frecuencia

Una vez que las tareas se clasifican en grupos de trabajo equilibrados, el próximo paso es establecer sistemas de planeamiento y control que aseguren que sean realizados por la persona que corresponda en el momento adecuado. Un factor importante que influye en el diseño de este tipo de sistemas es la frecuencia de los programas.

En particular, los programas de alta y baja frecuencia se manejan de manera diferente ya que los trabajos que contiene cada uno al igual que sus horizontes de planeamiento difieren.

Se definen como programas de alta frecuencia a aquellos que se realizan con intervalos de hasta una semana. Estos programas generalmente consisten en tareas a condición y de búsqueda de fallas simples. Tienen un bajo contenido de trabajo y por lo tanto pueden hacerse rápidamente. La mayoría pueden llevarse a cabo mientras la planta está funcionando, con lo que pueden hacerse casi en cualquier momento. Estos dos factores indican que el sistema de planeamiento asociado puede ser muy simple.

No obstante, los programas de alta frecuencia generalmente son muchos, con lo que si su administración no se planea cuidadosamente se nos pueden ir de las manos fácilmente. Por ejemplo, los programas diarios que deben llevarse a cabo 350 días al año en 1000 ítems de una planta, pueden generar 350 000 instrucciones anuales (tanto electrónicamente como en papel), si cada vez que tienen que hacerse, cada programa se emite por separado. Esto no tiene ningún sentido, y crea problemas que comúnmente son la razón por la cual los programas de alta frecuencia generalmente están mal administrados.

Pero las tareas de alta frecuencia son la columna vertebral de un mantenimiento de rutina exitoso, con lo que se debe encontrar la manera de asegurar que se lleven a cabo sin crear una carga administrativa excesiva.

Los programas de baja frecuencia son aquellos que se hacen con intervalos de un mes o más. Sus horizontes de planeamiento más largos los hacen menos manejables para los sistemas de planeamiento simples como los usados para los programas de alta frecuencia. Por lo general implican un trabajo mayor con lo que se necesita más tiempo para realizarlos y por lo general debe detenerse la planta mientras se están llevando a cabo. Como resultado de esto, necesitan sistemas de planeamiento y de control más complejos.

La próxima sección de este capítulo sugiere algunas de las opciones que podrían usarse para administrar ambos tipos de programas, a saber:

- programas realizados por los operarios
- "programas" realizados por la función calidad
- programas de alta frecuencia realizados por el personal de mantenimiento
- programas de baja frecuencia realizados por el personal de mantenimiento

Programas realizados por los Operarios

Desde el punto de vista del mantenimiento, el atributo más valioso de los operarios es que están cerca del equipo durante mucho tiempo. Como se vio en la página 212, esto los pone en una posición ideal para realizar muchas de las tareas a condición y de búsqueda de fallas. Éstas por lo general son tareas

de muy alta frecuencia –algunas serán diarias o hasta de una o dos veces por turno- con lo que se debe tener mucho cuidado para que el sistema administrativo asociado se mantenga lo más simple posible.

Los sistemas simples de aviso que pueden usarse para las tareas de los operarios en vez de checklist formales, incluyen:

- incorporar los controles de mantenimiento dentro de los procedimientos operativos estándar, como se discutió anteriormente
- Instalar el programa permanentemente en una pared o en la cabina de control en la que los operarios la puedan ver fácilmente
- Capacitar a los operarios de manera tal que las inspecciones se vuelvan algo natural (una forma muy riesgosa de abordar el tema que por lo general no se recomienda).

Los checklist formales sólo debieran ser usados para el chequeo de los operadores cuando las consecuencias de las fallas es probable que sean particularmente severas, y existan razones para dudar si las tareas van a ser realizadas sin un recordatorio formal. Los checklist pueden ser los mismos que los descriptos más adelante para tareas de alta frecuencia realizados por el personal de mantenimiento.

Programas y Controles de Calidad

Hemos visto como cada vez más estándares de funcionamiento incorporan estándares de calidad de producto. Esto significa que cada vez se pueden descubrir más fallas potenciales y funcionales a través del control de calidad de producto. Estos controles por lo general ya son utilizados (por ejemplo usando Control Estadístico de Procesos como se vio en las páginas 155 y 156). Los puntos a destacar son los siguientes:

- Las inspecciones de calidad deben ser consideradas como fuentes válidas y valiosas de información sobre el mantenimiento
- Deben tomarse las medidas necesarias para asegurar que las fallas potenciales relacionadas con la calidad son atendidas tan pronto como son descubiertas. Este punto se explica detalladamente más adelante.

Programas de alta frecuencia realizados por el personal de mantenimiento

A pesar de todos los comentarios anteriores respecto de las ventajas de usar operarios para hacer el trabajo de mantenimiento de alta frecuencia, muchas de dichas tareas todavía tienen que ser realizadas por el personal de mantenimiento. Por lo general necesitan ser planeadas más formalmente que los chequeos de los operarios, ya que el personal de mantenimiento cubre un número mayor de máquinas distribuidas en un área mucho mayor que la de los operarios, y por lo general hacen un número de tareas más variada.

CHECKLIST DE MANTENIMIENTO	SECCIÓN DE LA PLANTA: Sala de calderas	A REALIZARSE POR: Mecánico	DÍA DE SEMANA DE FINALIZACIÓN

Nro.	DESCRIPCIÓN	PROGRAMA	L	M	M	J	V	S	D	OBSERVACIONES
03030401	Sistema de manipuleo de carbón	M-265								
03030402	Caldera N° 1	M-388								
03030402	Caldera N° 1	M-389								
03030403	Caldera N° 2	M-388								
03030403	Caldera N° 2	M-389								
03030404	Sistema de manipuleo de cenizas	M-539								
03030405	Calentador de agua de alimentación	M-462								
03030406	Sistema de salida de gases	M-391								

ASIGNADO A	TIEMPO	COMPLETADO POR	SUPERVISOR

Figura 11.6: Un checklist para programas de mantenimiento de alta frecuencia

Una forma de encarar esto es dividiendo la planta en secciones, y preparar un checklist del tipo que se muestra en la Figura 11.6 para cada sección.

Nótense los siguientes puntos respecto de este tipo de checklist:

- el checklist sólo lista los programas a realizar, no las tareas individuales. Los programas se publican por separado, generalmente formando libros, y encuadernados con tapas plásticas para protegerlos. De esta manera, sólo se emite un checklist por sección por semana, más que docenas de programas por día.
- se debe planear aproximadamente la misma cantidad de trabajo para cada día, y debería tomar entre media hora y una hora por día, no más de esto.
- el checklist que se mostró puede usarse para planear a intervalos entre un día y una semana. Los trabajos pueden planearse en días alternados y dos veces por semana, con lo que el checklist abarca un rango amplio de intervalos P-F más cortos.
- el checklist puede empezar y finalizar en ciclos de cinco o siete días –no es obligatorio fijar ciclos de lunes a domingo como se muestra en el ejemplo.
- los checklist contienen los planes programados y son emitidos automáticamente cada semana, con lo que no hay necesidad de ningún sistema de planeamiento.
- los checklist no se usan para tareas que deben realizarse a intervalos mayores a una semana.
- Cada checklist involucra uno o dos documentos por semana por sección. Esto equivale a no más de cincuenta documentos por semana para una instalación que contiene 1000 ítems sujetos a estos chequeos.

Algunas de las tareas de alta frecuencia requieren que se tomen lecturas, tanto manualmente (usando un elemento de medición) como electrónicamente (análisis de vibraciones). Las mediciones de esta naturaleza son tareas, mientras el checklist descripto anteriormente está diseñado para programas completos. Esto puede traer problemas, especialmente si comenzamos a emitir documentos separados para cada uno de estos registros junto con los checklist. Esto debe evitarse, ya que hace que el número de documentos comience a aumentar nuevamente. Las posibles alternativas son las siguientes:

- desarrollar un documento especial para todas las lecturas en cada sección, y adjuntar este documento al checklist para esa sección cada semana.
- usar una persona para realizar este tipo de mediciones en toda la planta

- pedir a la gente que realiza las mediciones que sólo registren en la columna de observaciones aquellas medidas que están afuera de los límites aceptables (a menos que las mediciones se registren automáticamente, como en el caso de ciertos dispositivos de monitoreo de condición)
- automatizar el proceso de registro

Emitiendo programas de alta frecuencia

Una semana antes de su realización, se le emite al mantenedor el checklist correspondiente. Preferentemente, deben ser la primer actividad que haga la persona cada día. Un sistema de checklist exitoso tiene las siguientes características adicionales:

- si la persona de mantenimiento no puede completar un día las tareas planeadas, las mismas se hacen al día siguiente. Si la persona de mantenimiento continuamente no puede completar los controles prescriptos es porque algo está mal y se debe estudiar la situación
- La persona de mantenimiento registra cualquier falla potencial o funcional en la columna de observaciones del checklist y no en los programas mismos
- La persona de mantenimiento inicia la acción correctiva al final de cada ronda diaria. En algunas plantas, ésto puede ser responsabilidad de la persona de mantenimiento y en otras del supervisor. La acción variará desde coordinar para detener la planta a coordinar para que la falla se repare en la próxima detención de la planta. Esta decisión se basa en las posibles consecuencias de la falla y del intervalo P-F neto. (Nótese que esos temas deben haberse considerado como parte del proceso de RCM en el momento en que se especificó la tarea de rutina por primera vez)
- Como en el caso de los operarios, es importante que se realice una acción determinada o que se le explique al mantenedor por qué dicha acción no es necesaria o por qué se pospone, para que los mantenedores no pierdan interés en el sistema
- Al final de cada ciclo, se puede guardar el checklist completo como un registro de que se hicieron las tareas, con lo que no es necesario reingresarlos en un sistema de registros históricos. No obstante, como se explica en el Capítulo 14, se deben documentar los problemas que se encuentran y las acciones que se toman para solucionarlos.

Controlando los programas de alta frecuencia

Uno de los problemas asociados a la utilización de checklist es que la gente tiende a indicar que ha realizado una tarea cuando en realidad no la ha hecho. Para evitar este problema, los supervisores deberían llevar a cabo reinspecciones al azar. Esto implica hacer los programas de mantenimiento de

los checklist junto con la persona que los hace normalmente. Si el checklist no está hecho correctamente, las fallas no reportadas se vuelven aparentes rápidamente, y el supervisor toma la acción correspondiente.

Programas de baja frecuencia hechos por personal de mantenimiento

Hemos visto que los programas de alta frecuencia pueden ser planeados, organizados y controlados usando un checklist cuidadosamente estructurado. En contraste, el horizonte a largo plazo asociado con los planes de baja frecuencia implican que los pasos a seguir para planearlos, organizarlos y controlarlos son llevados a cabo por separado. Es más, los procedimientos usados para establecer programas basados en el tiempo transcurrido difieren mucho de aquellos usados para programas basados en el tiempo de funcionamiento, pero se pueden usar procedimientos similares para organizar y controlar ambos tipos de programas. En consecuencia, consideraremos en los próximos párrafos el proceso de planeamiento por separado, pero consideraremos juntos los pasos subsecuentes.

Planeamiento basado en el tiempo transcurrido

Los principios del planeamiento basado en el tiempo transcurrido son bien conocidos, y son usados para diversos propósitos además de la planificación del mantenimiento. Para programas de baja frecuencia, el planeamiento basado en el tiempo transcurrido generalmente se basa en una planilla de planeamiento similar a la que se muestra en la Figura 11.7 (o su equivalente planilla electrónica).

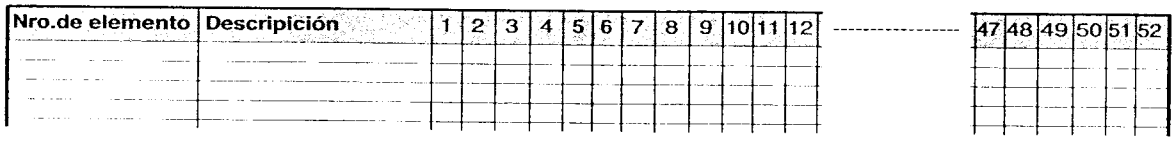


Figura 11.7: Una planilla de planeamiento de baja frecuencia típica

La mayoría de estos sistemas usan generalmente un horizonte de planeamiento de un año, dividido en 52 semanas. No obstante, cuando se establezca este tipo de sistemas, téngase en cuenta que algunas tareas, en particular las de búsqueda de fallas, pueden tener ciclos de tiempo de hasta diez años, y el horizonte de planeamiento de cualquier sistema de planeamiento asociado debe acomodar dichas tareas. También téngase en cuenta al momento de fijar dichos sistemas, que los programas de baja frecuencia casi siempre implican la detención de los equipos, y esto puede tener consecuencias operacionales exactamente de la misma manera que las detenciones que se supone que deben prevenir, con lo que se debe tener un cuidado especial para minimizar estas consecuencias. Los puntos a considerar incluyen:

- picos y valles en el ciclo de producción. Los programas que consumen más tiempo deben planificarse para los períodos de menor actividad para minimizar su impacto sobre las operaciones

- dos máquinas que requieren el mismo recurso especial al mismo tiempo (como una grúa)
- casos en los que no es posible realizar el programa si al mismo tiempo no se detienen otras máquinas. Esto se aplica especialmente a equipos que brindan servicios como producción de vapor y aire comprimido.

Por otro lado, si estas restricciones lo permiten, tratar de distribuir la carga de trabajo del mantenimiento de rutina de manera uniforme a lo largo del año de manera de equilibrar los requerimientos de mano de obra.

Un último punto respecto del planeamiento de programas de baja frecuencia basados en el tiempo transcurrido es que el uso de computadoras para este propósito se ve engañosamente simple. No obstante, hay que tener en cuenta que los puntos que se discutieron anteriormente introducen dentro del proceso de planeamiento basado en el tiempo calandario, un amplio rango de restricciones que no tienen ninguna relación entre sí. Por esto, téngase mucho cuidado cuando se diseñe o adquieran sistemas basados en el tiempo calandario que planeen progamas que se apoyen en parámetros predeterminados, o que re-agenden automáticamente programas que no se hayan cumplido. El autor ha encontrado muchos de estos sistemas que simplemente mueven los programas de una semana a otra, independientemente de las restricciones de tipo políticas. Esto se vuelve caótico, especialmente cuando los programas que sólo deben llevarse a cabo en temporada baja se mueven gradualmente al medio de la temporada alta, y así sucesivamente.

Programas basados en el tiempo de funcionamiento

El planeamiento basado en el tiempo de funcionamiento involucra los siguientes pasos:

- Se registra la cantidad de ciclos que cada máquina ha realizado en cada período (estos pueden estar medidos en términos de tiempo, distancia recorrida, unidades producidas, etc.)
- Estos registros son volcados a un sistema de planeamiento
- Se actualiza la cantidad total de horas de funcionamiento acumuladas desde que se hizo el último programa.

Los sistemas manuales de tiempo en uso pueden variar desde tableros electrónicos sofisticados que cuestan cientos –y hasta miles – de dólares a contadores que se mueven con un hilo. Si es posible, estos sistemas deberían contar de manera decreciente hasta llegar a cero, lo que ayuda a los planificadores a ver a simple vista cuánto tiempo queda para que venzan los programas. También dan un aviso anticipado sobre picos de trabajo que puedan sobrecargar el taller.

Los sistemas de planeamiento basados en el tiempo de funcionamiento se prestan fácilmente al uso de computadoras ya que demandan procesar y guardar grandes cantidades de datos. El dinamismo de los sistemas de tiempo de funcionamiento hace además que tengan menos políticas restrictivas que los sistemas de tiempo transcurrido.

Sin embargo, si la recopilación de datos de tiempo de funcionamiento no es automática, puede ser cara y propensa a errores, con lo que si las computadoras van a ser usadas para el planeamiento basado en el tiempo de funcionamiento, si es posible también debería estar automatizada la recolección de datos. El sistema también debe estar diseñado para proveer una proyección, continuamente actualizada y con el horizonte más largo posible, de la carga de trabajo de cada taller. Esto le da tiempo a los administradores para equilibrar los picos y valles de trabajo que surjan de la proyección.

Organizando programas de baja frecuencia

En la mayoría de sistemas de planeamiento, se comienzan a organizar los programas de baja frecuencia la semana anterior a que los programas venzan (con excepción de los programas de detenciones). El proceso de organización generalmente contiene los siguientes elementos:

- Se prepara un listado que muestra los programas que vencen la semana siguiente. Están generalmente separados por especialidad y por sección de la planta.
- Se llevan a cabo reuniones con el departamento de operaciones para acordar los días y los horarios en los cuales se van a realizar los programas (especialmente para aquellos que impliquen la detención del equipo)
- Se publican los programas para cada supervisor, quién planea quién los realizará y coordinará para disponer de cualquier otro recurso que fuera necesario, como haría para cualquier otro trabajo de mantenimiento.

Controlando los programas de baja frecuencia

Los programas de baja frecuencia están sujetos a los mismos controles de funcionamiento que cualquier otro tipo de trabajo de mantenimiento. Esto se aplica al tiempo que toma hacer los programas, estándares de mano de obra, etc.

Necesitamos considerar dos factores adicionales. Primero, el sistema de planeamiento debe indicar cuándo se vencen los programas. Como se mencionó anteriormente, dichos programas no deben reprogramarse automáticamente, pero deben manejarse sobre una base de excepción.

Finalmente, los programas de mantenimiento deben repasarse continuamente a la luz de las circunstancias cambiantes (especialmente las circunstancias que afectan las consecuencias de las fallas) y nuevas informaciones. En este contexto, téngase presente que cuanto más se involucre la gente

asociada con el equipo en determinar los requerimientos de mantenimiento, en el futuro estarán más dispuestos a ofrecer un "feedback" más constructivo y criterioso sobre dichos requerimientos. Este punto se discutirá con mayor detalle en el próximo capítulo.

11.7 Reportando Defectos

Además de asegurar que las tareas se hagan, también necesitamos asegurarnos que cualquier falla potencial que se encuentre sea rectificada antes que se vuelva una falla funcional, y que las fallas funcionales ocultas sean rectificadas antes que tenga posibilidades de ocurrir una falla múltiple. Esto significa que toda persona que pudiera descubrir una falla potencial o funcional debe tener acceso irrestricto a un procedimiento que sea simple, confiable y directo para reportarlos de inmediato a quien los deba reparar.

Esta comunicación tiene lugar instantáneamente si la persona que opera la máquina también es la persona que la mantiene. La velocidad y la precisión de la respuesta a los defectos que pueden ser detectados bajo estas circunstancias son una de las principales razones por las que la gente que opera las máquinas también debe estar capacitada para mantenerlas (o viceversa). Un segundo beneficio de este método es que los sistemas formales de reporte de defectos se necesitan solamente para fallas en las que el operario/persona de mantenimiento es incapaz de arreglarla por sí solo.

Si no es posible esta estructura organizacional o no es práctica, otra opción para asegurar que los defectos sean atendidos rápidamente es destinar personal de mantenimiento con dedicación permanentemente a un activo específico o a un grupo de activos. No solamente hace que esta gente conozca mejor las máquinas, lo que mejora su capacidad de diagnóstico, sino que también hace que la velocidad de respuesta tienda a ser mayor de lo que podría ser si trabajaran en un taller centralizado. También es posible mantener simple e informal el sistema de reportes de defectos.

Si no es posible organizar ninguna clase de soporte de mantenimiento compacto, se vuelve necesario implementar un sistema de reporte de defectos formal. En general, cuanto más lejos está la función mantenimiento de los activos a mantener (en otras palabras, cuanto más centralizada está), se vuelve más formal el proceso de reporte de defectos. Esto también se aplica a los defectos que sólo pueden arreglarse durante paradas de planta.

Básicamente, los sistemas de reporte de defectos formales permiten que cualquier persona informe por escrito (electrónica o manualmente) al departamento de mantenimiento respecto de la existencia de fallas potenciales o funcionales. Los criterios que deben dirigir esta clase de sistemas

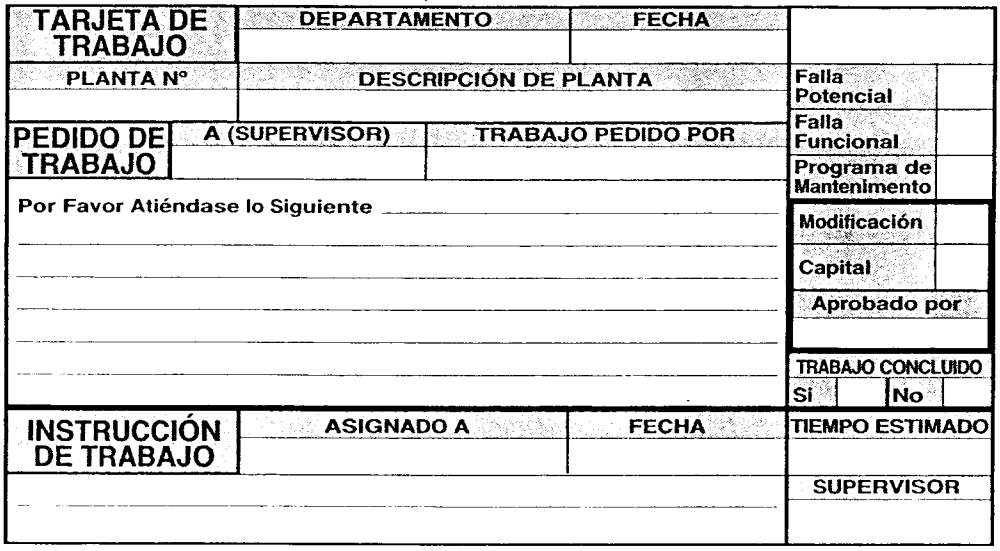


Figura 11.8: Un petitorio de trabajo clásico

siempre deben ser la simplicidad, la accesibilidad y la velocidad.

Los sistemas de reportes de defectos manuales generalmente se basan en simples tarjetas de trabajo del tipo que se muestra en la Figura 11.8. (Estas tarjetas de trabajo también pueden usarse por el departamento de mantenimiento para planear y registrar los trabajos, pero ese aspecto de su uso está más allá del alcance de este libro.) Si se usa un sistema de reporte de defectos computarizado, el formato de la pantalla es muy parecido al de estas tarjetas.

Un último punto sobre este tipo de sistemas es que la gente debe estar adecuadamente motivada para usarlos. Esto significa que los defectos que se reportan deben ser atendidos de inmediato, o se debe decir al usuario por qué no se lleva a cabo ninguna acción. Nada va a ser tan nocivo para este tipo de sistemas como que se reporte un defecto y aparentemente no se haga nada.

12 Análisis Actuarial y Datos de Falla

12.1 Los Seis Patrones de Falla

A lo largo de este libro, nos referimos numerosas veces a los seis patrones de falla, los que se muestran nuevamente en la Figura 12.1. También usamos frecuente los términos *edad, vida* y *TMEF*. Este capítulo explora estos conceptos y la relación entre ellos con más detalle. También considera qué rol (si hay alguno) cumplen, al formular políticas de mantenimiento, los registros técnicos históricos y otros datos de fallas.

Comenzamos con un análisis detallado de los patrones de falla B y E, porque representan los casos más comunes de fallas relacionadas con la edad y fallas aleatorias. Luego estudiaremos los patrones C y F, y posteriormente veremos los patrones A y D. La parte 2 de este capítulo resume los usos y limitaciones de los datos de falla.

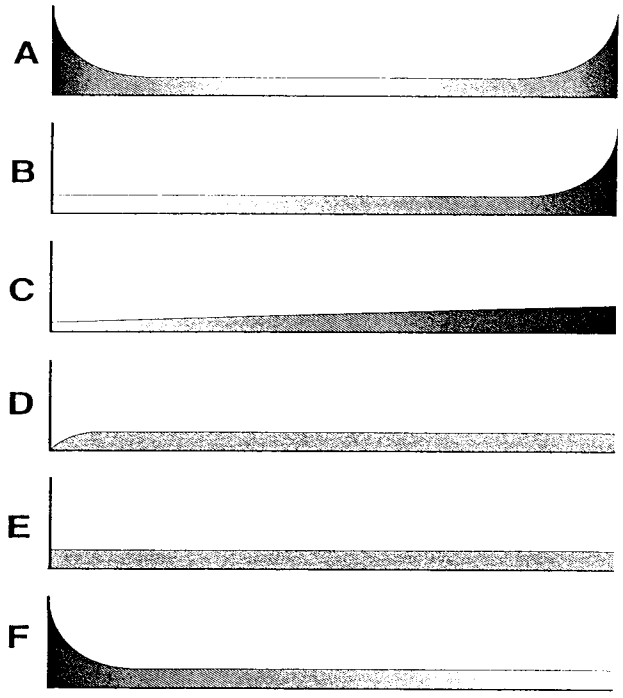


Figura 12.1: Seis patrones de Falla

Patrón de Falla B

Los Capítulos 1 y 6 mencionaron que el patrón B describe las fallas relacionadas con la edad. El Capítulo 6 explicó que aún cuando estas fallas son el resultado de un proceso de deterioro más o menos lineal, todavía habrá considerables diferencias en el comportamiento de dos componentes que estén sujetos a las mismas solicitaciones nominales. La figura 12.2 muestra como este comportamiento se convierte en el patrón de fallas B.

Un ejemplo de un componente que puede comportarse como se muestra en la figura 12.2 es el impulsor de una bomba que se usa para bombear un líquido moderadamente abrasivo. La parte 1 de la Figura 12.2 muestra las características

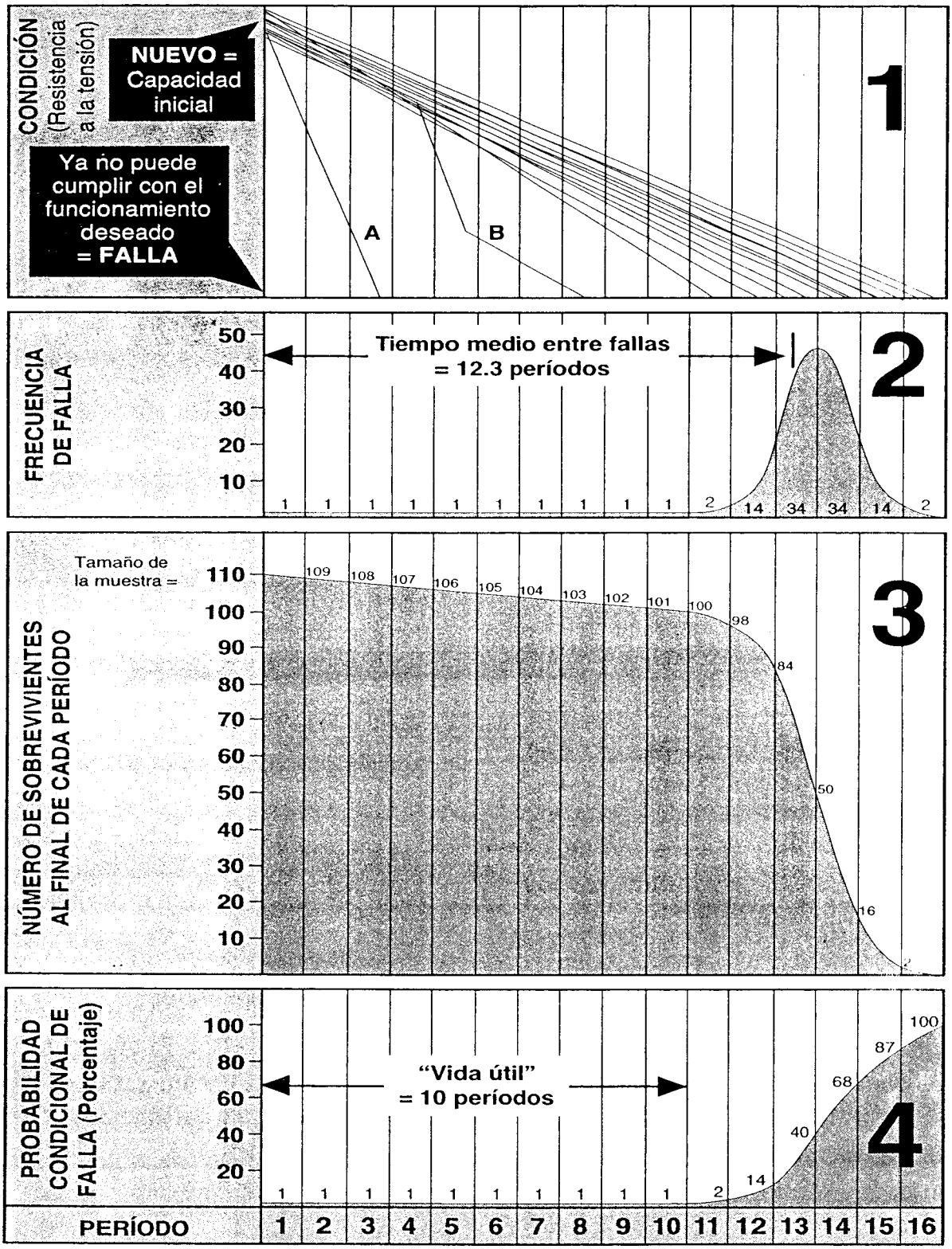


Figura 12.2: Patrón de Falla B

de desgaste de una docena de tales impulsores. Diez de ellos se deterioran aproximadamente al mismo tiempo, y duran entre 11 y 16 períodos antes de fallar. Sin embargo, dos de los impulsores fallan mucho antes de lo esperado, el "A" quizá porque el bastidor no estaba apropiadamente tratado y el "B" porque cambiaron en algún momento las propiedades del líquido, haciendo que se desgastara más rápido que lo usual. Nótese que esta distribución de falla sólo se aplica a impulsores que fallan debido al desgaste, y no se aplica a los que fallan por otras razones.

En la Parte 2 de la Figura 12.2 la distribución de frecuencias de fallas se representa en función de la edad operativa de una muestra grande de componentes. Ello muestra que a pesar de unas pocas fallas "prematuras", la mayoría de los componentes es probable que se ajusten a una distribución normal alrededor de un punto.

Por ejemplo, supongamos que hemos acumulado datos de falla para una muestra de 110 impulsores, los cuales han fallado debido a desgaste. Diez de estos impulsores fallaron prematuramente, uno en cada uno de los diez primeros períodos. Los otros 100 impulsores fallaron todos entre los períodos 11 y 16, y las frecuencias de estas fallas se ajustan a una distribución normal. (Para una distribución normal, las frecuencias de fallas en los últimos seis períodos serán aproximadamente como se muestra si se redondean al entero más cercano.) En base a estas cifras, el tiempo medio entre fallas de los impulsores debido a desgaste es de 12.3 períodos.

La Parte 3 de la Figura 12.2 muestra la supervivencia de los impulsores basada en esta distribución de frecuencia.

Por ejemplo, 98 impulsores duraron más de 11 períodos, y 16 de los mismos lo hicieron en más de 14 períodos.

La Parte 4 de la Figura 12.2 es el patrón de falla tipo B. Muestra la probabilidad que tiene cualquier propulsor que haya sobrevivido hasta el comienzo de un período, de fallar durante el mismo. Esto es conocido como *probabilidad condicional de falla*.

Aceptando un pequeño error por redondeo, vemos por ejemplo que hay una probabilidad de 14% que un propulsor que haya alcanzado el período 12 falle en dicho período. De igual manera, 14 de los 16 impulsores que alcancen el período 15 fallarán durante el mismo (una probabilidad condicional de falla del 87%).

La curva de frecuencia de la Parte 2 y la curva de probabilidad de la Parte 4 están describiendo el mismo fenómeno, pero difieren notablemente en el modo en que lo muestran. De hecho, la probabilidad condicional de la curva de falla provee una mejor ilustración de lo que realmente sucede que la curva de frecuencia, ya que esta última podría inducirnos engañosamente a suponer que las cosas mejorarían a partir del pico de la curva de frecuencia.
Estas curvas ilustran un cierto número de puntos adicionales:

- las curvas de frecuencia y de probabilidad condicional muestran que el término "vida" puede en realidad tener dos significados completamente distintos. El primero es el tiempo medio entre fallas (que es el mismo que *la vida promedio* si todas las piezas hubieran trabajado hasta la rotura). La segunda es el punto a partir del cual existe un rápido incremento de la probabilidad condicional de falla. A falta de otro vocablo mejor, se lo ha denominado *vida útil*.
- Si planificáramos el reacondicionamiento o la sustitución de componentes en el tiempo medio entre fallas, la mitad fallaría antes de alcanzarlo. En otras palabras, estaríamos previniendo sólo la mitad de las fallas, cosa que supone consecuencias operativas inaceptables. Evidentemente, si deseamos prevenir la mayoría de las fallas, necesitaríamos intervenir al final de la "vida útil". La Figura 12.2 muestra que la vida útil es más corta que el tiempo medio entre fallas- de hecho, si la campana fuera más achatada, sería mucho más corta.

  Como resultado, sólo podemos concluir que *el tiempo medio entre fallas es de poca utilidad para establecer la frecuencia de tareas de reacondicionamiento y sustitución cíclicas* para componentes que se ajustan a patrones de falla del tipo B. La variable clave es el punto a partir del cual hay un rápido incremento de la probabilidad condicional de falla.
- Si reemplazamos el componente al final de su vida útil tal como se definió anteriormente, la vida de servicio promedio de cada componente será más corta que si la dejáramos trabajar a la rotura. Tal como se discutió en la página 141, esto aumentaría el costo de mantenimiento (suponiendo que no hay un daño secundario asociado con las fallas).

  Por ejemplo, si tuviéramos que reemplazar todos los impulsores sobrevivientes de la figura 12.2 al final del período 10, la vida de servicio promedio de los mismos estaría alrededor de 9.5 períodos, en lugar de los 12.3 si se los dejara trabajar a la rotura.
- El hecho de que haya dos "vidas" asociadas con el patrón de falla B significa que debemos tener cuidado al especificar a cual nos referimos cada vez que usemos el término "vida".

  Por ejemplo, podríamos comunicarnos con el fabricante de cierto componente para preguntarle cuál es la "vida" del mismo. Podemos tener en mente la vida útil, pero si no expresamos exactamente lo que queremos expresar, él podría con total buena fe darnos el tiempo medio entre fallas. Si esto luego se usa para establecer una frecuencia de reemplazo, surgirán todo tipo de problemas, resultando en disgustos completamente innecesarios.

Aparte de los comentarios anteriores, quizás el mayor problema asociado con el patrón de fallas B, es que muy pocos modos de falla se comportan realmente de esta manera. Tal como se mencionó en los Capítulos 1 y 6, es mucho más común encontrar modos de falla que muestren muy poca relación a largo plazo entre edad y falla.

Patrón de Falla E

La Figura 7.9 de la página 160 muestra tres componentes que fallan de manera aleatoria o al azar. Existe una serie de razones por las cuales pueden ocurrir las fallas al azar, las cuales se discutieron en el Capítulo 7. Esta parte del capítulo explora con más detalle algunos de los aspectos cuantitativos de las fallas al azar, y prosigue reviendo algunas de las implicancias del patrón de fallas E. Para comenzar, la Figura 12.3 de la página siguiente muestra la relación entre la frecuencia y la probabilidad condicional de fallas al azar.

En la parte 1 de la Figura 12.3, las líneas punteadas representan cierto número de componentes – en este caso, cojinetes de bolilla – que fallan de manera aleatoria. Como en la Figura 7.9, cada falla está precedida por una curva P-F (algo elongada).

Que un elemento falle de manera aleatoria significa que la probabilidad de que falle en un período, es la misma que tendría de fallar en cualquier otro. En otras palabras, la probabilidad condicional de falla es constante, tal como muestra la Parte 2 de la Figura 12.3.

Por ejemplo, si aceptamos la evidencia empírica que los cojinetes con elementos rodantes se ajustan generalmente a un tipo de falla al azar – fenómeno observado primero por Davis[1952]- la probabilidad condicional de falla es constante tal como se ve en la Figura 12.3, Parte 2. Específicamente, esta muestra que un cojinete que no ha fallado al comienzo de cualquier período tiene una probabilidad del 10% que falle durante el mismo.

La Parte 3 de la Figura 12.3 muestra como una probabilidad condicional de falla que es constante se transforma en una distribución de supervivencia exponencial.

Por ejemplo, si comenzamos con una muestra de 100 cojinetes y la probabilidad de falla en el primer período es del 10%, entonces 10 cojinetes fallarían en el período 1 y 90 sobrevivirían más de un período. En forma similar, hay una probabilidad del 10% de que los cojinetes que sobrevivan al período 1 fallen en el 2, con lo que 9 cojinetes fallarán en el período 2 y que los 81 restantes sobrevivirán más de dos períodos. La Parte 3 de la Figura 12.3 muestra cuantos cojinetes sobrevivirían al comienzo de cada período subsiguiente para los primeros 16 períodos.

Teóricamente, este proceso de deterioro continuaría hasta el infinito. En la práctica, sin embargo, generalmente nos detenemos en la unidad – en otras palabras, cuando la curva de supervivencia sea menor de uno.

En el ejemplo visto en la Figura 12.3. una tasa de deterioro por período del 10% significa que la unidad se alcanza alrededor de los 43 períodos. Esto sugiere que sólo un cojinete duraría 43 períodos, pero que la gran mayoría habrán fallado mucho antes.

Finalmente, la Parte 4 de la Figura 12.3 muestra la curva de frecuencia derivada de la curva de supervivencia de la Parte 3. Esta curva también es exponencial. (La forma de esta curva de frecuencia hace que a menudo se la confunda con el patrón de fallas F, que es una curva de probabilidad condicional basada en una distribución de frecuencia diferente).

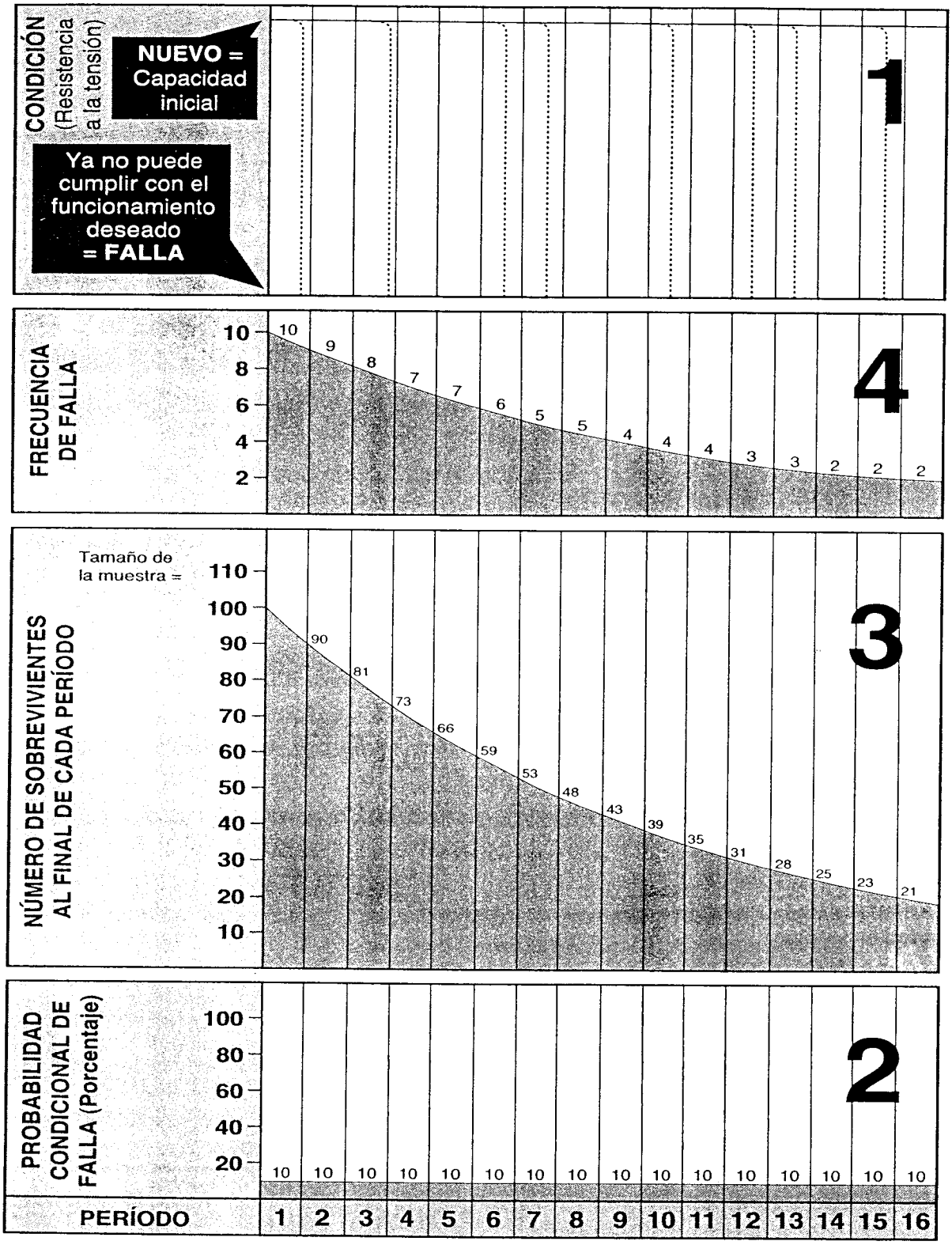


Figura 12.3: Patrón de Falla E

El hecho de que ambas curvas, la de frecuencia y la de supervivencia, sigan declinando indefinidamente significa que también permanece indefinidamente horizontal la curva de probabilidad condicional. En otras palabras, en ningún momento el patrón de falla E muestra un aumento significativo de la probabilidad condicional de falla, con lo que no puede determinarse edad alguna para la cual pudiéramos programar un reacondicionamiento o una sustitución cíclica. Otros puntos adicionales sobre el patrón de fallas E son los siguientes:

- *TMEF y fallas al azar*: a pesar del hecho de que es imposible predecir cuanto tiempo durará cualquier ítem que se ajuste a un patrón de fallas E (de ahí el uso del término falla "aleatoria"), todavía es posible determinar un tiempo medio entre fallas para tales elementos. En este caso el TMEF está dado por el punto en el cual el 63% de los mismos ha fallado.

  Por ejemplo, en la Parte 3 de la Figura 12.3 se indica que el 63% de los ítems han fallado aproximadamente a mitad del período 10. En otras palabras, el TMEF de los cojinetes en este caso es de 9.5 períodos.

  El hecho de que estos elementos tengan un tiempo medio entre fallas, pero no tengan una "vida útil" tal como se definió anteriormente, significa que debemos ser doblemente cuidadosos cuando hablamos de "vida" de un componente.

- *comparando confiabilidad:* el TMEF provee una base para comparar la confiabilidad de dos componentes distintos sujetos a fallas del tipo E, aún cuando la falla es "aleatoria" en ambos casos. Esto es porque el elemento con un TMEF mayor tendrá una menor probabilidad de falla en cualquier período dado.

  Por ejemplo, supongamos que los cojinetes Marca X están sujetos a la distribución de fallas vista en la Figura 12.3. Si la probabilidad condicional de falla de la Marca Y es sólo de 5% en cada período, sólo tendrán la mitad de posibilidad de fallar y eso sería considerado mucho más confiable.

  En el caso de elementos que se ajustan al patrón de falla B, un componente más confiable tiene una "vida útil" mayor que uno que sea menos confiable. De modo que en lenguaje común, podría decirse para los componentes del tipo B que uno dura más que el otro, mientras que para los componentes del tipo E deberíamos decir que uno falla *con menos frecuencia* que el otro.

(En la práctica, la confiabilidad de cojinetes se mide por la vida " B10". Esta es la vida bajo la cual un proveedor de cojinetes garantiza que no más que el 10% de sus cojinetes fallarán bajo determinadas condiciones de carga y velocidad. Esto corresponde a un período de la Parte 2 de la Figura 12.3. También sugiere que si un tipo de cojinetes se ajusta a una distribución de supervivencia verdaderamente exponencial, entonces el TMEF de los mismos debido a "uso y desgaste normal" sería de alrededor de 9.5 veces la vida B10.

De modo que si el cojinete Marca Y es dos veces más confiable que el Marca X, la vida B10 – que también es conocida como la vida L10 o la vida N10 – de la Marca Y sería el doble de la Marca X. Esto es útil cuando se toman decisiones para la compra de cojinetes, pero no nos dice cuanto durará cada cojinete en servicio).

- *Las curvas P-F y las fallas al azar:* La Figura 7.9 de la página 160 y la Parte 1 de la Figura 12.3 nos muestran fallas al azar precedidas por curvas P-F. Esto no implica sugerir que *todas* las fallas que aparecen al azar están precedidas por tal curva. En realidad muchos modos de falla que se ajustan al patrón E no están precedidos por ninguna clase de señal, o si las hay, el período de aviso es tan corto que no es de utilidad. Esto es especialmente cierto para la mayoría de las fallas que afectan componentes electrónicos o eléctricos.

  Esto no menosprecia de ninguna manera la validez del análisis. Simplemente significa que no existe ninguna clase de mantenimiento preventivo – a condición, reacondicionamiento o sustitución cíclica – que sea técnicamente factible para estos componentes, y que deben ser tratados en base de una política "a falta de" adecuada tal como se discutió en los Capítulos 8 y 9.

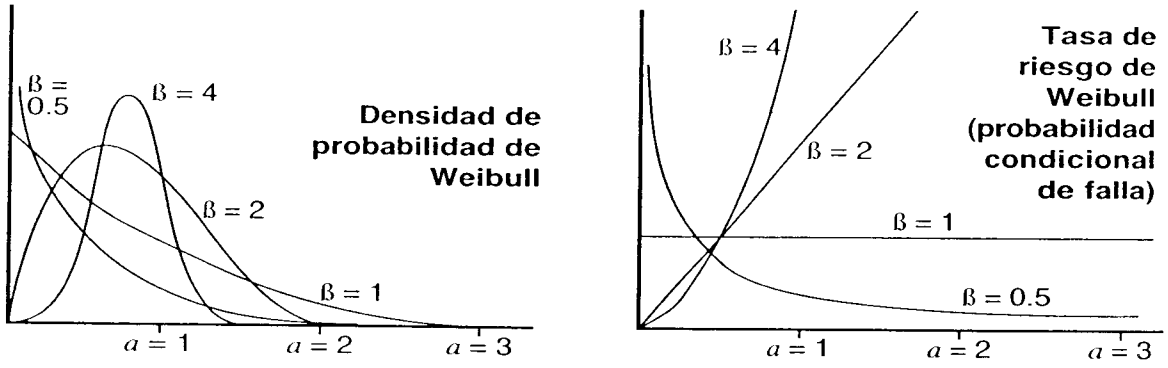


Figura 12.4: Distribuciones de Weibull

Una nota sobre las distribuciones de Weibull

En esta etapa, es útil hacer un comentario sobre la distribución de Weibull. Esta distribución se usa mucho porque tiene una gran variedad de formas que permiten ajustarla a distintos patrones de datos, especialmente aquellos relacionados con la vida de productos. La distribución de frecuencia de Weibull (o mejor dicho, *función de densidad de probabilidad)* es:

$$f(t) = (ß/a^{ß})t^{ß-1}\exp[-(t/a)^{ß}]$$

"ß" es el llamado *parámetro de forma* puesto que define la forma de la distribución. "a" es el *parámetro de escala,* define la amplitud de la distribución y corresponde al percentil 63° [$100-(1-e^{-1})$] de la distribución acumulada. Las curvas de la función de densidad de probabilidad de Weibull y su

correspondiente probabilidad condicional se muestran en la Figura 12.4. (Esto muestra que la probabilidad condicional de falla también es conocida como "tasa de riesgo").

Cuando ß=1, la distribución de Weibull es la distribución exponencial. Cuando ß está entre 2 y 3 se aproxima suficientemente a la distribución normal. Más adelante veremos como describe otros patrones de fallas.

Patrón de Falla C

El patrón C muestra una probabilidad de falla que crece de manera uniforme y donde no existe ningún punto en el cual podamos decir "aquí es donde falla". Esta parte del capítulo considera una razón posible por la que ocurre el patrón de falla C, y luego muestra como se lo deduce.

La causa que consideramos posible por la que ocurre el patrón C es la fatiga. La teoría clásica de la ingeniería sugiere que la falla por fatiga es causada por tensiones cíclicas, y que la relación entre las mismas y la falla está regida por la curva S-N, tal como se muestra en la Figura 12.5.

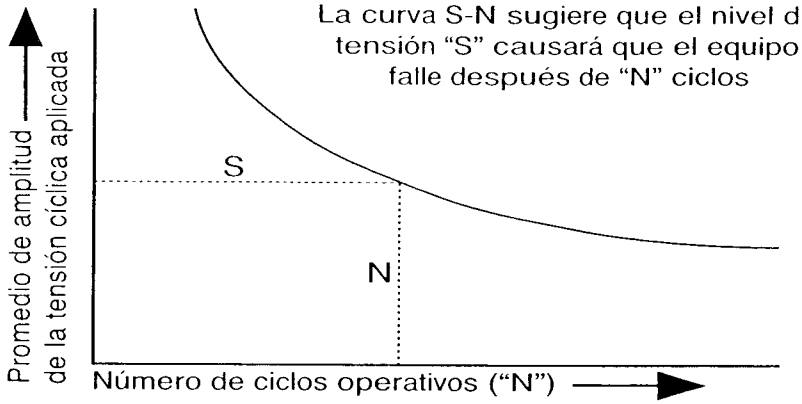


Figura 12.5: La curva S-N

La figura 12.5 sugiere que si conociéramos la curva S-N, entonces seríamos capaces de predecir la vida de un componente con gran precisión para una tensión cíclica de amplitud dada. Sin embargo, en la práctica esto no es así porque la amplitud promedio de la tensión cíclica no es constante, y la capacidad del componente para soportar la tensión – en otras palabras, la posición de la curva S-N – no será exactamente la misma para cada componente.

La Parte 1 de la Figura 12.6 sugiere que la amplitud promedio de la tensión aplicada podría ajustarse a una distribución normal alrededor de una media, que está indicada con la letra S en la Figura 12.6. Esta distribución se representa por la curva P. En forma similar, la distribución de las curvas S-N podría ser determinada por la curva normal Q.

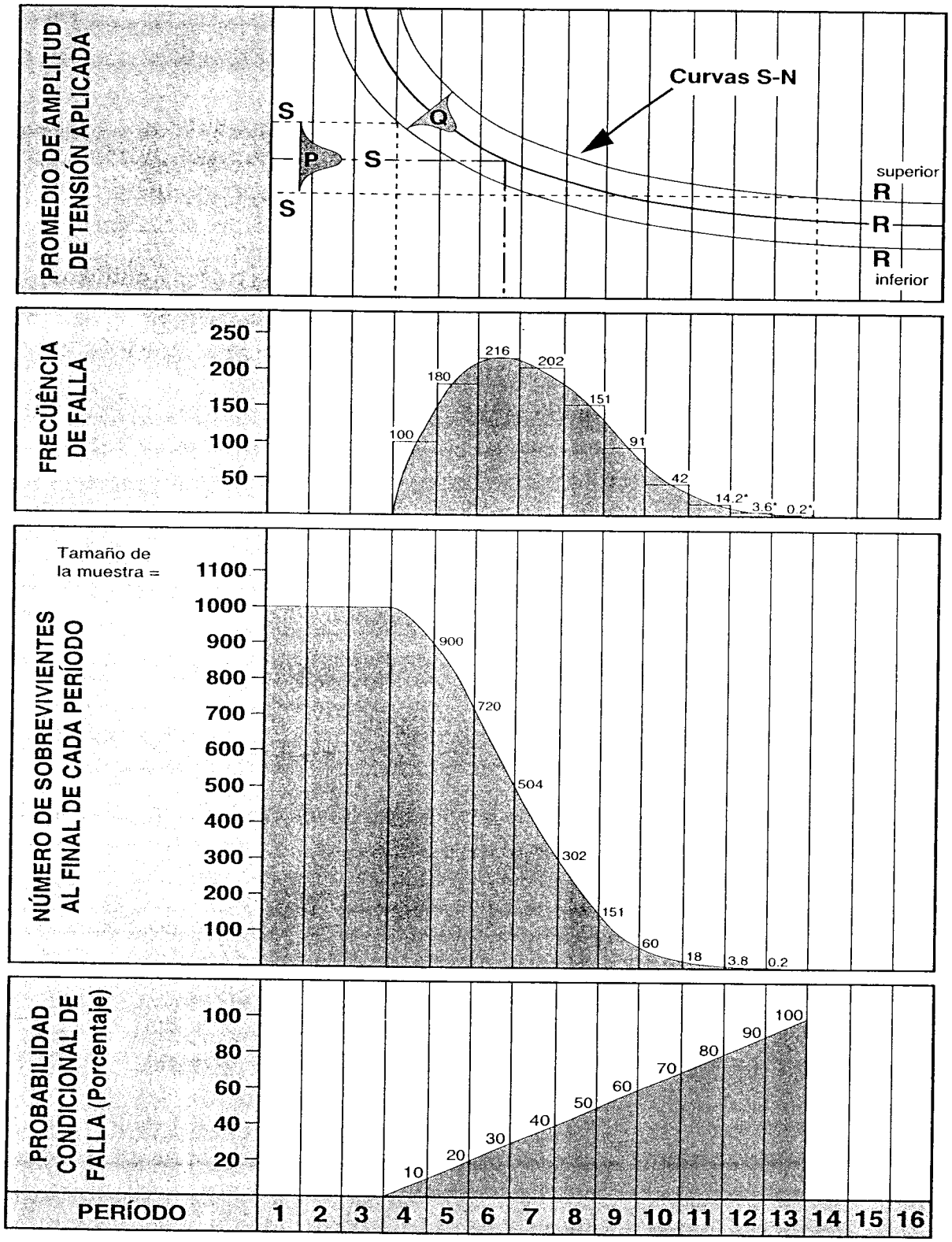


Figura 12.6: Patrón de Falla C (modificado)

La combinación de estas dos curvas será tal que las edades en las que ocurre la falla se ajustará a una distribución sesgada hacia la izquierda. Cuánto está sesgada la distribución depende de la forma de la curva S-N. Siguiendo el razonamiento, la Parte 2 de la Figura 12.6 sugiere que se ajustará a una distribución de Weibull con parámetro de forma B=2. (Hablando estrictamente, esta debiera llamarse distribución Weibull "desviada" porque no comienza en tiempo cero).

Sobre la base de esta distribución, la Parte 2 de la Figura 12.6 continúa estimando cuantas fallas podrían ocurrir en cada período si ensayáramos a la falla una muestra de 1000 componentes. (El hecho de que los números marcados con un asterisco no son enteros explica porque esta curva debería llamarse de densidad de probabilidad en lugar de distribución de frecuencia).

La Parte 3 de la Figura 12.6 transforma la Parte 2 en una curva de supervivencia, mientras que la Parte 4 muestra la probabilidad condicional de falla basada en las dos curvas precedentes. Las dos últimas curvas se derivan del mismo modo que las correspondientes de la Figura 12.2.

Otros puntos sobre el patrón de falla C incluyen:

- la distribución Weibull desviada significa que la curva de probabilidad condicional comienza en un punto a la derecha del tiempo t=0. La figura 12.6 muestra que este es el punto donde hay " un rápido incremento en la probabilidad condicional de falla ", que es naturalmente la vida útil tal como se definió anteriormente. En la Figura 12.6 esta es tres períodos. Sin embargo, las representaciones anteriores del patrón de falla tipo C muestran una probabilidad condicional de falla partiendo por sobre cero. Esto en la práctica puede ocurrir si un modo de falla conduce a una distribución Weibull truncada (una que comienza hipotéticamente a la izquierda del tiempo t=0) con un parámetro de amplitud B=2 tal como se muestra en la Figura 12.7.

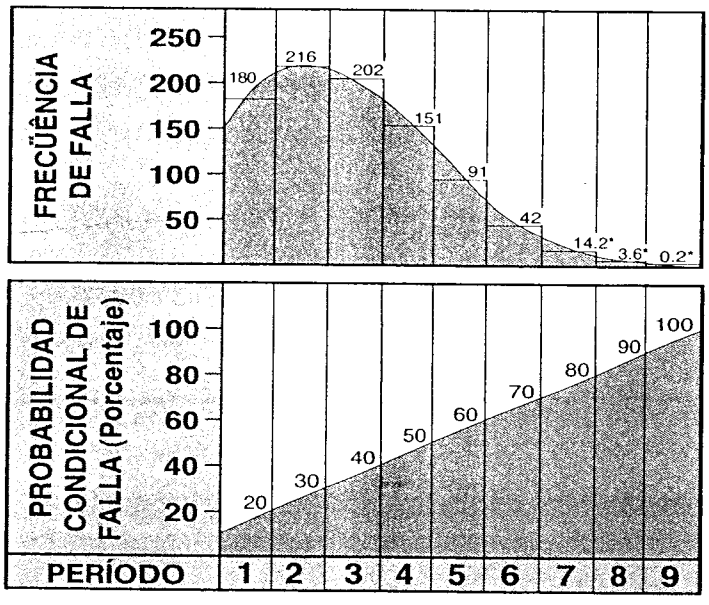


Figura 12.7: Distribución de Weibull truncada y Patrón de falla tipo C

- la pendiente del patrón C aparece muy empinada en estos ejemplos. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la pendiente real estará dada por el parámetro de escala "*a*" de Weibull, que puede medirse en rangos que varían de semanas a décadas (o aún siglos), de modo que la pendiente del patrón C puede variar entre completamente empinada y casi plana.
- el patrón de falla tipo C no está solamente asociado a la fatiga. Por ejemplo, se ha encontrado que se corresponde con la falla de la aislación de los bobinados de ciertos tipos de generadores.
- Recíprocamente, no todas las fallas relacionadas con la fatiga se adecuan al tipo de falla C.

Por ejemplo, si la curva P de la Figura 12.6 estuviera desviada hacia el límite $S_{inferior}$ y la curva Q lo estuviera hacia el límite $R_{superior}$, la curva de frecuencia de falla estaría más sesgada hacia la derecha. Esto daría un parámetro de configuración de Weibull mayor que 2, que tiende hacia una distribución normal y por lo tanto da una curva de probabilidad condicional de falla que se asemeja al tipo B.

Por otra parte, si el límite $S_{inferior}$ está bajo el punto en el que $R_{superior}$ se hace asintótico, entonces la distribución de frecuencia mostrará una larga "cola" hacia la derecha. Esto corresponde a una distribución de Weibull donde ß está entre 1 y 2, que a su vez genera un patrón de falla tipo D.

Finalmente, como se mencionó en la página 163, un gran número de factores influyen sobre la tasa de fatiga que desarrollan los cojinetes de bolilla. Esto haría que la amplitud de cualquier distribución sea grande, la que a su vez tendería a una curva de probabilidad condicional casi plana. Agréguese a esto la variedad de modos de falla adicionales para los cojinetes a bolillas vistos en la página 163 que tienen los mismos síntomas de la fatiga, y la densidad de probabilidad total se convierte en una exponencial, que tiende a un patrón de falla tipo E tal como hemos visto.

De modo que la fatiga puede manifestarse como una falla tipo B, C, D o aún E.

Patrón de Falla D

Tal y como se mencionó, el patrón de falla D es la curva de la probabilidad condicional asociada con una distribución de Weibull cuyo parámetro de forma ß es mayor que 1 pero menor que 2.

Patrón de Falla F

El patrón de falla tipo F es quizás el más interesante, por dos razones:

- es el único patrón de falla donde la probabilidad de falla realmente *decrece* con la edad (aparte del tipo A, que es un caso especial)
- es el más común de los seis patrones de falla, tal como se mencionó en la página 13.

Por estas razones, vale la pena estudiar más detalladamente los factores que lo originan.

La forma del patrón de falla tipo F indica que la mayor probabilidad de falla se da cuando el equipo es nuevo o justo después de haber sido reacondicionado. Este fenómeno se conoce como *mortalidad infantil*, y tiene una amplia variedad de causas. Estas se resumen en la Figura 12.8 y se discuten en párrafos subsiguientes.

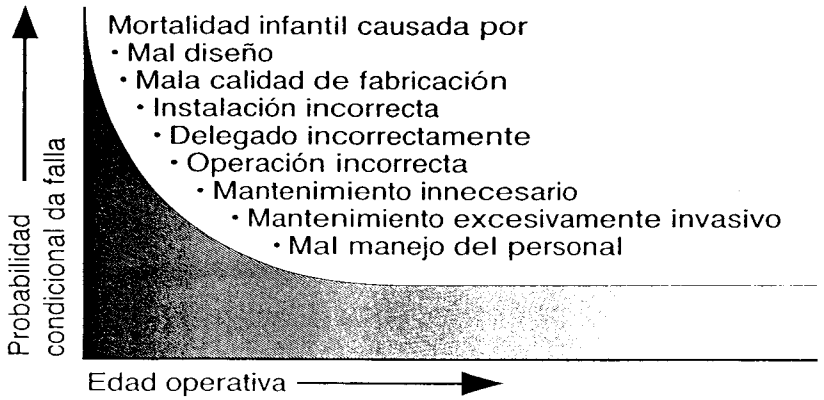


Figura 12.8: Causas de mortalidad infantil

Diseño

Los problemas de mortalidad infantil atribuibles al diseño ocurren cuando parte de un equipo simplemente es incapaz de cumplir con el desempeño deseado, y de ahí que tienda a fallar poco después de ser puesto en servicio. Cuando afectan a un activo existente, estos problemas sólo pueden resolverse con rediseño, tal como se discutió en el Capítulo 9. Los mismos pueden prevenirse en alguna medida al

- usar tecnología comprobada. *El autor encontró una compañía que aseguraba estar "en una carrera a toda prisa para ser la segunda" en adoptar nuevas tecnologías, porque había encontrado que ser la primera generalmente implicaba una importante inversión en detectar y eliminar defectos – una inversión involuntaria hecha en forma de tiempo de parada del equipo. No obstante, a largo plazo ser segundo puede ser una desventaja.*
- Usando el equipo más simple posible para cumplir con la función requerida *ya que las piezas que no estén allí no pueden fallar.*

Fabricación e instalación

La mortalidad infantil atribuible a la fabricación del equipo ocurre ya sea porque los estándares de calidad son demasiado bajos, o porque las piezas correspondientes han sido mal instaladas. Estos problemas sólo pueden ser solucionados reensamblando los conjuntos afectados o reemplazando las partes involucradas. Dos maneras para prevenir estos problemas son:

- implementar esquemas aceptables de SQA(Aseguramiento de la Calidad del Proveedor) y PQA (Aseguramiento de la Calidad del Proyecto). Tales esquemas generalmente dan mejores resultados cuando son dirigidos por alguien que no sea el contratista original.
- requerir garantías extendidas, quizás con un soporte de tiempo completo en la planta con técnicos del proveedor hasta que el equipo esté trabajando como se pretende durante un período determinado.

Por delegación

Los problemas por delegación surgen ya sea cuando el equipo está preparado incorrectamente, o cuando se pone en funcionamiento en forma indebida. Estos problemas se minimizan si se tiene cuidado de asegurar que cada persona a la que se pueda delegar una tarea conozca exactamente como se espera que trabaje la planta, y que se da suficiente tiempo para asegurarse de que así sea.

Mantenimiento de rutina

Una gran parte de la mortalidad infantil es causada por las tareas de mantenimiento de rutina innecesarias, o innecesariamente invasivas. Las últimas son tareas que desestabilizan o perturban el equipo, perturbando sin necesidad sistemas básicamente estables. El modo de evitar estos problemas es dejar de hacer tareas innecesarias, y en aquellos casos donde sea necesario el mantenimiento programado, elegir aquellas tareas que alteren el equipo tan poco como sea posible.

Mano de obra de mantenimiento

Evidentemente, si algo se arma incorrectamente fallará rápidamente. Este problema sólo puede evitarse asegurándose que cualquier persona que deba efectuar una tarea de mantenimiento preventivo o correctivo, sea entrenada y motivada para hacerlo correctamente la primera vez.

Mortalidad infantil y RCM

La discusión anterior sugiere que los problemas de mortalidad infantil se resuelven generalmente por cambios de una sola vez en lugar del mantenimiento programado (con la excepción de unos pocos casos donde para anticipar fallas sea factible efectuar tareas a condición). No obstante, a pesar del rol mínimo que juega el mantenimiento de rutina para este tipo de fallas, el uso de RCM para analizar un nuevo activo antes de ponerlo en servicio promueve reducciones sustanciales en la mortalidad infantil por las siguientes razones:

- un estudio detallado de las funciones del activo generalmente revela un número sorprendente de fallas de diseño que, si no se corrigen, harían totalmente imposible el funcionamiento del activo

- los especialistas y los operarios aprenden exactamente cómo se espera que funcione el activo, y así tienden a cometer menos errores que causen fallas
- se identifican y tratan muchas deficiencias, que de otra manera provocarían fallas prematuras, *antes* de que el activo entre en servicio
- el mantenimiento de rutina se reduce al mínimo esencial, lo que significa menos intervenciones desestabilizadoras, pero este mínimo esencial asegura que la vida temprana del activo no esté plagada de fallas que podrían ser anticipadas o prevenidas.

Falla Tipo A

Hoy día se acepta que el patrón de falla A – la curva de la bañera - es realmente una combinación de dos o más fallas de distinto tipo, una de las cuales comprende mortalidad infantil y la otra que muestra el incremento de la probabilidad de fallas con la edad. Algunos especialistas todavía sugieren que la parte central (plana) de la curva bañera constituye un tercer período (aleatoria) entre los otros dos, tal como muestra la Figura 12.9.

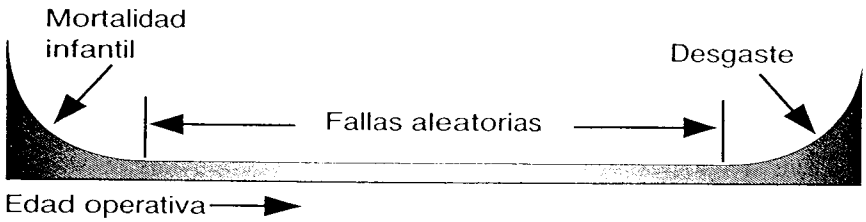


Figura 12.9: La clásica vista de la " bañera"

Esto significa que el patrón de falla A generalmente describe la probabilidad condicional de dos o más modos de fallas diferentes. Desde el punto de vista del manejo de las fallas, cada una de estas debe ser identificada y tratada a la luz de sus consecuencias y características técnicas propias.

Se pueden extraer conclusiones similares acerca del patrón de falla B tal como se muestra en la Figura 12.2. Esto es porque las fallas que aparecen entre los períodos 11 y 16 están causadas por desgaste "normal", mientras que las que aparecen entre los períodos 1 y 10 son causadas por otros factores "al azar" que hacen que el impulsor se desgaste más rápido de lo que sería normal.

Esto sugiere la formulación de cierto número de preguntas acerca del significado de estos patrones, las que son consideradas más extensamente en la próxima sección de este capítulo.

12.2 Datos de Historia Técnica

El Rol del Análisis Actuarial al Establecer Políticas de Mantenimiento

Un número sorprendente de personas cree que sólo pueden formularse políticas de mantenimiento efectivas sobre la base de abundante información *histórica de las fallas*. A partir de esta creencia se han instalado en todo el mundo miles de sistemas de registros manuales o computarizados de historia técnica. También ha llevado a poner gran énfasis en los patrones de fallas descriptos en la Parte 1 de este capítulo. (El hecho que la curva de bañera todavía aparezca en casi todo texto importante de administración del mantenimiento es testimonio de la casi fe mística que ponemos en la relación entre edad y falla).

Aún desde el punto de vista del mantenimiento, estos patrones están llenos de dificultades prácticas, acertijos y contradicciones. Algunos de estos están resumidos bajo los siguientes encabezados:

- complejidad
- tamaño de la muestra y evolución
- informe de fallas
- la contradicción fundamental

Complejidad

La mayoría de los emprendimientos industriales consisten en cientos, o miles de activos diferentes. Están hechos de docenas de componentes distintos, que exhiben entre ellos todos los aspectos extremos e intermedios de comportamientos en cuanto a confiabilidad. Esta combinación de complejidad y diversidad significa simplemente que no es posible desarrollar una descripción analítica completa de las características de confiabilidad de una empresa completa – o aún de cualquier activo importante dentro de la misma.

Aún al nivel de fallas funcionales individuales, no es fácil un análisis comprensible. Esto es porque muchas fallas funcionales individuales no son causadas por dos o tres sino por dos o tres *docenas* de modos de falla. Como resultado de esto, mientras puede ser fácil registrar la incidencia de las fallas funcionales, es una tarea estadística compleja el aislar y describir el tipo de falla que se aplica a cada uno de los modos de falla que cae dentro del esquema de cada falla funcional. Lo que es más, muchos modos de falla tienen virtualmente idénticos síntomas físicos, que hace fácil la confusión entre unos y otros. Esto a su vez hace casi imposible un análisis actuarial sensato.

Tamaño de la muestra y evolución

Los grandes procesos industriales poseen sólo uno o dos activos de cada tipo específico. También tienden a ponerlos en operación en serie antes que simultáneamente. Esto significa que el tamaño de las muestras suelen ser muy pequeños como para que los procedimientos estadísticos sean convincentes. Para los equipos nuevos que implican un alto nivel de tecnología de punta, las muestras son siempre muy pequeñas.

Estos activos generalmente también están en un estado continuo de evolución y modificación, en parte como respuesta a nuevos requisitos operacionales y en parte como un intento de eliminar fallas que podrían tener serias consecuencias o que costaría demasiado prevenir. Esto quiere decir que la cantidad de tiempo que cada activo consume en cierta configuración es relativamente corto. Por lo tanto los procedimientos actuariales no se usan demasiado en estas situaciones porque la base de datos es muy pequeña y en constante cambio. (Como se discute posteriormente, la principal excepción son empresas que usan gran número de componentes idénticos y de manera más o menos parecida).

Informe de fallas

El problema de analizar datos de fallas se complica todavía más por las diferencias en las políticas de información entre una y otra organización. Un área de confusión es la diferenciación entre fallas potenciales y funcionales.

Por ejemplo, en el caso de las cubiertas discutido en las páginas 164 y 165, una organización podría clasificar y registrar las cubiertas como "falladas" cuando la profundidad del dibujo sea menor de 3 mm y se retiran para recapar. Sin embargo, mientras que no se permita que la profundidad del dibujo sea menor de 2 mm, esta "falla" es en realidad una falla potencial tal como se definió en el Capítulo 6. De modo que otras organizaciones podrían elegir clasificar tal tarea como "precautoria" porque las cubiertas no han fallado en servicio, o como "programada", porque está programado el reemplazo de las cubiertas en la primera oportunidad luego de haber descubierto la falla potencial. En estos dos últimos casos, es probable que los cambios de las cubiertas no sean reportados como fallas.

Por otra parte, si por alguna razón la profundidad del dibujo cae por debajo de los 2 mm, entonces no hay duda que la cubierta ha fallado.

El que existan diferencias sobre las expectativas de desempeño de un activo, puede causar diferencias similares. El Capítulo 3 definió una falla funcional como la incapacidad de un componente de cumplir con un estándar de rendimiento deseado, y estos estándares pueden ser diferentes para un mismo tipo de activo si el contexto operativo es distinto.

Por ejemplo, en la página 54 se da el ejemplo de una bomba que en un contexto falla si es incapaz de entregar 800 litros por minuto y en otro 900 litros por minuto.

Esto demuestra que lo que es una falla en una organización – o en una parte de una organización – puede no ser una falla en otra. Esto puede resultar en dos juegos de datos de fallas completamente distintos para dos componentes aparentemente idénticos.

Adicionalmente pueden existir diferencias en la presentación e interpretación de datos de fallas por las diferentes perspectivas que tienen sobre un activo los fabricantes y usuarios. El fabricante generalmente considera que es su responsabilidad proveer un activo que sea capaz de entregar un nivel deseado de desempeño (si hay alguno) bajo condiciones de solicitación específicas. En otras palabras, garantiza una cierta capacidad básica de diseño, y a menudo lo condiciona al cumplimiento de ciertas rutinas específicas de mantenimiento.

Por otra parte, vimos que muchas fallas ocurren porque los usuarios operan los equipos más allá de sus capacidades de diseño (en otras palabras, el "querer" excede el "poder", tal como se discutió en las páginas 65-69). Mientras que los usuarios están inclinados naturalmente a incorporar datos sobre estas fallas en sus propios registros históricos, los fabricantes son renuentes a aceptar responsabilidad sobre las mismas. Esto lleva a los fabricantes a "censurar" los datos de fallas causadas por errores de los operadores. Como Nowlan y Heap lo puntualizaron, el resultado es que los usuarios hablan sobre lo que ven realmente, mientras que el fabricante habla sobre lo que podrían haber visto.

La contradicción fundamental (El Acertijo Resnikoff)

Un artículo que destruye completamente el tema del historial técnico es el hecho de que si estamos reuniendo datos sobre fallas, debe ser porque no las estamos previniendo. Las implicancias de esto están resumidas muy sucintamente por Resnikoff[1978] en el siguiente enunciado:

"La adquisición de la información considerada como de suma necesidad por los que diseñan la política de mantenimiento- información sobre las fallas críticas- es en principio inaceptable y es evidencia de la falla del programa de mantenimiento. Esto es porque las fallas críticas causan pérdidas potenciales (en algunos casos ciertas) de vidas, ***pero no hay tasa de pérdida de vida que sea aceptable para ninguna organización como precio de la información de fallas a ser usada para el diseño de una política de mantenimiento.*** *De este modo, el diseñador de políticas de mantenimiento se enfrenta con el problema de crear un sistema para el que "la pérdida de vidas esperada" durante la vida operacional planeada para el activo sea menor a 1 (uno). Esto significa que, en la práctica y como principio, la política debe ser diseñada sin usar datos experimentales que surgirían de las fallas que se desean evitar".*

Nowlan y Heap[1978] prosiguen haciendo los siguientes comentarios acerca del rol que juega el análisis acturial si ha de ocurrir una falla crítica a pesar de los mejores esfuerzos de quien diseñe las políticas de mantenimiento:

"El desarrollo de una relación edad-confiabilidad, tal como se expresa por una curva de probabilidad condicional de falla, requiere una cantidad considerable de datos. Cuando la falla tiene consecuencias serias, ese conjunto de datos no existirá, dado que deberían tomarse medidas preventivas inmediatamente después de haber sufrido la primer falla. Por lo tanto, el análisis actuarial no puede usarse para establecer los límites de edad de las fallas de mayor importancia –necesarios para proteger la seguridad operativa".

En este contexto, recordemos los comentarios hechos en la página 143 acerca de los límites de vida segura y datos de ensayos. Estos datos habitualmente son tan escasos que el límite de vida segura (si es que lo hay) se establece dividiendo los resultados de la prueba por algún factor arbitrario altamente conservador en lugar de utilizar las herramientas provistas por el análisis actuarial.

La misma limitación se aplica a fallas que tienen consecuencias operacionales realmente serias. La primera vez que ocurre la falla, se toman inmediatamente decisiones sobre acción preventiva o correctiva a realizar sin esperar los datos necesarios para efectuar un análisis actuarial.

Todo lo que nos lleva a la contradicción fundamental referida a la prevención de fallas con serias consecuencias y a la información histórica acerca de tales fallas: *el mantenimiento preventivo exitoso implica evitar la recolección de datos históricos que creamos necesitar para decidir qué mantenimiento preventivo debemos hacer.*

Esta contradicción se aplica en sentido inverso en el otro extremo de la escala de consecuencias. Las fallas con consecuencias menores tienden a ser admitidas precisamente porque no interesan demasiado. Como resultado, estarán disponibles grandes cantidades de datos históricos concernientes a estas fallas, lo que significa que habrá abundante material para análisis actuariales precisos. Estos también podrían revelar algunos límites de edad. Sin embargo, dado que las fallas no importan mucho, es altamente improbable que el reacondicionamiento o sustitución cíclica resultantes sean costo-eficaces. De modo que mientras el análisis actuarial de esta información puede ser preciso, también es probable que sea una pérdida de tiempo.

El uso principal del análisis actuarial en mantenimiento es estudiar los problemas de confiabilidad en la zona intermedia, donde hay una relación indefinida entre edad y fallas que tienen consecuencias económicas significativas, pero no de seguridad. Estas fallas caen en dos categorías:

- aquellas asociadas con un gran número de componentes idénticos cuyas funciones son prácticamente idénticas, y cuyas fallas sólo pueden tener un impacto menor cuando se toman individualmente pero cuyo efecto acumulativo puede tener un impacto importante sobre el costo.

  Algunos ejemplos de elementos que caen dentro de esta categoría son las luces de la calle, componentes de vehículos (especialmente de grandes flotas) y muchos de los componentes usados por las fuerzas armadas y en las industrias distribuidoras de electricidad, agua y gas. Los componentes de este tipo son usados en cantidad suficiente como para llevar a cabo análisis actuariales, y justifican estudios de costo-beneficio detallados (en muchos casos, aunque sólo sea para minimizar la cantidad de movimientos involucrados en el mantenimiento de los equipos).
- la segunda categoría de fallas que ameritan investigación actuarial son aquellas que son menos comunes pero se cree que tienen relación con la edad, y donde el costo de cualquier tarea preventiva y el costo de la falla son muy altos. Tal como se mencionó en la página 138, esto se aplica especialmente a probabilidades de fallas gradualmente incrementales tipificadas por el patrón de falla C.

El rumbo venidero

Los párrafos anteriores indican que salvo por un número limitado de situaciones completamente especializadas, el análisis actuarial de la relación entre la edad operativa y la falla es de muy poco valor desde el punto de vista de la administración del mantenimiento. Quizás el defecto más serio de la información histórica es que está enraizada en el pasado, mientras que los conceptos de anticipación y prevención están necesariamente enfocados hacia el futuro.

De modo que se necesita un tratamiento renovado de este tema – uno que cambie el enfoque del pasado al futuro. De hecho, RCM es precisamente dicha propuesta. En principio, trata con los problemas específicos mencionados anteriormente de la siguiente manera:

- *definición de la falla:* al comenzar con la definición de las funciones y los estándares asociados de funcionamiento de cada activo, RCM nos permite definir con gran precisión que entendemos por " fallado". Al distinguir claramente entre capacidad inherente y rendimiento deseado, y entre las fallas potenciales (el estado de *falla*) y las fallas funcionales (el estado *fallado*), se elimina toda confusión posterior.
- *complejidad:* RCM analiza cada activo definiendo sus funciones y para cada función sus fallas funcionales, y recién entonces identifica los modos de falla que causan cada falla funcional. Esto provee una estructura ordenada dentro de la cual considerar cada modo de falla. Esto a su vez las hace mucho más manejables que si comenzáramos en el nivel de modo de falla (que es el punto de comienzo de los FMEAs y FMECAs más clásicos).

- *evolución:* al proveer un registro comprensivo de todos los estándares de rendimiento, de las fallas funcionales y de los modos de falla asociados con cada activo, RCM hace posible definir muy rápidamente cómo afecta al activo cualquier cambio en el diseño o en el contexto operativo, y revisar las políticas y procedimientos de mantenimiento sólo en aquellas áreas donde se necesiten cambios.
- *la contradicción fundamental:* RCM tiene en cuenta este tema de muchas maneras. En primer lugar, al obligarnos a completar la Hoja de Información descripta en el Capítulo 4, pone atención en *qué puede suceder*. En contraste con esto el análisis actuarial enfatiza *qué ha sucedido*. En segundo lugar, al preguntar cómo y cuánto importa cada falla tal como se estableció en el Capítulo 5, asegura que nos concentremos en las fallas que tienen serias consecuencias y que no perdamos tiempo en aquellas que no las tienen. Finalmente, al adoptar un enfoque estructurado para la selección de tareas proactivas y acciones "a falta de " descriptas en los Capítulos 6-9, RCM asegura que hagamos lo necesario para prevenir la aparición de fallas serias, tanto como sea humanamente posible, evitando tener que analizarlas siquiera históricamente.

En segundo lugar, el proceso RCM presta atención a la información necesaria para fundamentar decisiones específicas. No nos pide relevar una gran cantidad de datos con la esperanza de que eventualmente pudiera decirnos algo. Este punto se discute con más detalle en la próxima sección de este capítulo.

Usos Específicos de Datos al Formular Políticas de Mantenimiento

No obstante los comentarios precedentes, la aplicación exitosa de RCM necesita una gran cantidad de información. Tal como se explicó extensamente en los Capítulos 2 al 9, mucha de esta información es descriptiva o cualitativa, especialmente en la Hoja de Información de RCM. Sin embargo, en vista del énfasis puesto en los temas cuantitativos de este capítulo, la Tabla 12.1 resume los principales tipos de datos cuantitativos que se usan para respaldar las distintas etapas del proceso de toma de decisiones de mantenimiento. Lo hace bajo los siguientes títulos:

- *dato:* el fragmento de información que es de interés.
- *aplicación:* un resumen muy breve del uso a darle a cada dato. Nótese que algunos se usan en conjunto con otros para arribar a una solución final, y que muchos son utilizados solamente cuando los datos cualitativos no son suficientemente consistentes como para tomar una decisión intuitiva.
- *observaciones:* dónde es más probable encontrar cada dato. Note que en algunos casos, están establecidas por el usuario del activo.
- *páginas:* se refiere a las páginas de este libro donde el uso de cada dato se trata con mayor detalle.

DATOS	APLICACIÓN	OBSERVACIONES	PAG.
Estándares de funcionamiento deseados	Estos estándares definen los objetivos del mantenimiento para cada activo. Comprenden la producción, la calidad del producto, el servicio al cliente, la eficiencia energética, la seguridad y la integridad del medio ambiente	Establecida por los usuarios (y por las regulaciones del medio ambiente y algunos estándares de seguridad)	22 - 27 48 - 55
VALORACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS OPERACIONALES Y NO OPERACIONALES			
Tiempos de parada	Valora si una falla afectará a la producción/operación y si es así en cuánto las afectará	No es lo mismo que TMDR (Tiempo Medio de Reparación)	79
Costo de la producción perdida	Usado junto con el tiempo de parada para evaluar el costo total de cada falla que afecte las operaciones	Sólo es necesaria cuando el costo-beneficio del mantenimiento programado no es intuitivamente obvio	109 - 110
Costo de la reparación	Usado junto al TMEF para valorar el costo eficacia del mantenimiento programado	Sólo necesario cuando el costo-beneficio del mantenimiento programado no es intuitivamente obvio (consecuencias operacionales o no operacionales solamente)	112 - 113
Tiempo Medio Entre Fallas	Usado con el tiempo de parada, el costo de la producción perdida (si lo hay) y el costo de la reparación para comparar el costo de mantenimiento programado con el costo de una falla en un período de tiempo	Idem Costo de la reparación	109 - 110 112 - 113
VALORACIÓN DE FALLAS CON CONSECUENCIAS EN SEGURIDAD Y MEDIO AMBIENTE			
Riesgo tolerable de una falla simple	Usada para evaluar si el mantenimiento programado vale la pena para fallas que podrían tener un efecto adverso para la seguridad o el medio ambiente	Casi siempre valuada por los usuarios de los activos/víctimas probables con probabilidad intuitiva	102 - 105
ESTABLECIENDO FRECUENCIAS DE TAREAS A CONDICION			
Falla Potencial	Punto en que se hace detectable la falla inminente	Basada en la naturaleza de la curva P-F y la técnica de monitoreo: generalmente cuantificada para monitoreo de rendimiento, de condición y SPC	148 - 149

Tabla 12.10: Resumen de datos clave como apoyo de decisiones en mantenimiento.

DATOS	APLICACIÓN	OBSERVACIONES	PAG.
Intervalo P-F	Usado para establecer la frecuencia de las tareas a condición	"que tan rápido falla": muy pocas veces existen registros formales	149 - 153 166 - 169
FRECUENCIAS DE TAREAS PROGRAMADAS DE REACONDICIONAMIENTO Y REEMPLAZO			
Edad en la que existe un rápido incremento de la probabilidad condicional de falla	Usada para establecer la frecuencia de la mayoría de las tareas de reacondicionamiento y sustitución cíclica	"Vida útil": basada en registros formales si están disponibles: generalmente basados en el consenso de la gente que más sabe del activo	240 - 242
Análisis actuarial de la relación entre la edad y la falla	Optimización de los intervalos de restauración/descarte para grandes cantidades de partes idénticas que se sabe que sus fallas están relacionadas con la edad, o para fallas costosas que siguen el patrón C	En la mayoría de las empresas sólo vale la pena para no más del 1 o 2% de los modos de falla: se necesita de gran cantidad de datos históricos: usado solamente para modos de falla que tienen consecuencias operacionales o no operacionales	257 - 258
CONSECUENCIAS DE FALLAS OCULTAS Y FRECUENCIAS DE TAREAS DE BÚSQUEDA DE FALLAS			
Probabilidad tolerable de falla múltiple	Usada para establecer políticas de mantenimiento para sistemas de protección	Establecida por los usuarios del activo: usada sólo cuando se debe hacer un análisis riguroso	122 - 124 183 - 186
Tiempo medio entre fallas de una función protegida (M_{GIDO})	Usada junto con la " probabilidad tolerable de una falla múltiple" para determinar la disponibilidad deseada del dispositivo protector	Basada en el desempeño pasado y el futuro anticipado de la función protegida: usada sólo para respaldar un análisis riguroso no necesario para el enfoque intuitivo (ver abajo)	183 - 186
Disponibilidad deseada de un dispositivo protector	Usada junto con el TMEF del dispositivo protector para establecer un intervalo de tarea de búsqueda de fallas	Derivada de la dos variables anteriores si la frecuencia de las tareas debe obtenerse de un análisis riguroso: de otro modo es establecida directamente por los usuarios del activo sobre la base de una valoración intuitiva de los riesgos de la falla múltiple	122 179 - 183
Tiempo medio entre fallas de un dispositivo protector(M_{TOR})	Usado con la disponibilidad deseada para establecer un intervalo de tarea de búsqueda de fallas..	Basado en registros de *fallas encontradas* si éstos están disponibles: sino, podría usarse cualquier fuente de datos aceptable con la cual comenzar (incluyendo estimaciones probables) pero debe iniciarse inmediatamente una base de datos apropiada	179 - 186

Tabla 12.10: Resumen de datos clave como apoyo de decisiones en mantenimiento.

Se han revisado ciertos puntos finales concerniente a los datos cuantitativos bajo los siguientes títulos:

- información gerencial
- una aclaración sobre el TMEF
- historial técnico.

Información gerencial

La Tabla 12.1 sólo describe datos que son usados directamente para formular políticas diseñadas para tratar con modos de falla específicos. No incluye datos utilizados para controlar el rendimiento global de la función Mantenimiento generalmente clasificados como "información gerencial". Ejemplos de tal información son las estadísticas de disponibilidad de planta, estadísticas de seguridad e imputaciones sobre los gastos del mantenimiento contra los presupuestos.

El monitoreo del rendimiento global de la función Mantenimiento es, naturalmente, un aspecto esencial de su administración. Este es un tópico que se trata con más detalle en el Capítulo 14.

Una aclaración sobre el TMEF

Últimamente, el concepto de "tiempo medio entre fallas" parece haber adquirido un nivel que es bastante desproporcionado respecto a su verdadero valor en la toma de decisiones del mantenimiento. Por ejemplo, no tiene nada que ver con la *frecuencia* de las tareas a condición y con la *frecuencia* de las tareas programadas de restauración y de sustitución. Sin embargo, sí tiene ciertos usos muy específicos. La Tabla 12.1 menciona tres:

- para establecer la *frecuencia* de las tareas de búsqueda de fallas.
- para ayudar a decidir si *merece la pena* el mantenimiento programado en el caso de modos de falla que sólo tienen consecuencias operacionales o no-operacionales. (En otras palabras, nos ayuda a decidir *si* deben hacerse tales tareas, pero no *cuán frecuentemente* han de ser realizadas).
- para ayudar a establecer la *disponibilidad deseada* de un dispositivo protector.

En el primer caso, el TMEF siempre es necesario para tomar la decisión apropiada, pero en los dos siguientes sólo se usa si la naturaleza y consecuencias de las fallas son tales que debe efectuarse un análisis riguroso.

El TMEF también tiene una cantidad de usos aparte de la formulación de políticas de mantenimiento, tales como:

- *en el campo del diseño:* para llevar a cabo una justificación de costos detallada en caso de una modificación propuesta, tal como se mencionó sucintamente en la página 199.

- *en el campo de las compras:* para evaluar la confiabilidad de dos componentes diferentes que pueden tener la misma aplicación, tal como se mencionó en la página 245.
- *en el campo de la información gerencial:* tal como se discute en el Capítulo 14, un camino para asegurar la efectividad global de un programa de mantenimiento es controlar el tiempo medio entre fallas no anticipadas de cualquier activo.

El estudio detallado de los dos primeros usos del TMEF se encuentra fuera del alcance de este libro. El tercero se trata en el Capítulo 14.

Historial técnico

Junto con los comentarios precedentes sobre el TMEF, la tabla 12.1 puede usarse para ayudar a decidir que tipos de datos realmente se necesitan registrar en un sistema de documentación de historial técnico.

Quizás la información más importante que se necesita registrar de manera convencional es ***qué se encuentra*** *cada vez que se efectúa una tarea de búsqueda de fallas*. Específicamente, necesitamos registrar si se encontró que el componente estaba por completo funcional o si estaba en estado de falla.

Tales registros nos permiten determinar el tiempo medio entre fallas del dispositivo protector (M_{TOR} en la página 181), y por lo tanto verificar la validez del intervalo de búsqueda de fallas asociado. *Esta información debería ser registrada para* ***todas*** *las funciones ocultas – en otras palabras, para todos los dispositivos de seguridad que no poseen seguridad inherente.*

Además de utilizarse para fallas ocultas, la Tabla 12.1 identifica dos áreas adicionales donde los datos históricos de fallas pueden utilizarse para tomar (o validar) decisiones sobre políticas de mantenimiento:

- *la aparición de modos de falla que tienen consecuencias operacionales significativas*. Esta información puede usarse para computar el tiempo medio entre fallas a fin de asegurar la costo-eficacia del mantenimiento programado. Sin embargo, tal como se mencionó en la Tabla 12.1, esto sólo requiere hacerse si el costo-beneficio de la acción proactiva no es intuitivamente obvia. Si lo es, debiera tomarse dicha acción – sea mantenimiento programado o rediseño – de modo tal que no habría más fallas que registrar (excepto quizás como fallas potenciales si la acción proactiva es una tarea a condición). La Tabla 12.1 menciona que en ciertos casos, puede ser importante capturar también estos datos a fin de llevar a cabo análisis actuariales completos con vista a optimizar las frecuencias de reacondicionamiento y sustitución cíclica.

- *el tiempo medio entre fallas de una función protegida (M_{GIDO} en la página 183).* Es necesario si un intervalo de búsqueda de fallas será determinado en forma rigurosa. Puede ser especificado registrando el número de veces que un dispositivo protector necesita actuar debido a la falla de la función protegida.

  Por ejemplo, debe registrarse cada vez que la sobrepresión de una caldera hace actuar la válvula de alivio.

Si vamos a tomar algunos de estos datos, los sistemas de reporte de fallas deben diseñarse para identificar el dato que se requiere - generalmente el *modo de falla* - de manera tan precisa como sea posible. Esto puede hacerse consultando a la persona que efectúa la tarea (o que descubre la falla en el caso de búsqueda de fallas) ya sea para:

- completar un formulario convenientemente diseñado, para ingresar los datos a un sistema manual o computarizado de registro histórico, o
- ingresar directamente los datos en una computadora si se usara para almacenarlos un sistema on-line.

En la mayoría de las organizaciones, los registros pueden ser almacenados en:

- una base de datos de una PC común, o
- un sistema computarizado especial o manual de registro histórico de mantenimiento.

El diseño de tales sistemas también está fuera del alcance de este libro. Sin embargo, la Tabla 12.1 sugiere que si los sistemas de registro de historial técnico se usan para capturar datos específicos para cierto propósito, en vez de usarlos para registrar todo esperando que eventualmente nos indiquen algo, los mismos resultarán ser aportes útiles y eficaces a la práctica de la administración del mantenimiento y no costosos elefantes blancos al que tienden a ser muchos de estos sistemas.

13 Aplicando el Proceso RCM

13.1 ¿Quién sabe?

En los Capítulos 2 al 10 se consideraron extensamente las siete preguntas básicas que componen el proceso RCM. Luego de examinar con mayor profundidad la información necesaria para responder las preguntas, en el Capítulo 12 se llegó a la conclusión que en la mayoría de las industrias, los registros históricos pocas veces son suficientemente comprensivos para usarse con este propósito. La pregunta todavía debe contestarse, de modo que la información requerida aún tiene que obtenerse de algún lugar.

No es extraño que, " ese lugar" pueda ser "alguien"- alguien que tiene un conocimiento y experiencia profundos sobre el activo en consideración. También hay ocasiones en las que el proceso de búsqueda de información revela puntos de vista sustancialmente diferentes que deben ser consensuados antes de tomar decisiones.

Las secciones posteriores de este capítulo describen como pueden usarse grupos reducidos para reunir información, compatibilizar distintos puntos de vista y tomar decisiones. Sin embargo, antes de considerar estos grupos, esta parte del capítulo examina la información necesaria para responder a cada pregunta, y tiene en cuenta quién la puede conocer. Para esto se hace referencia a las secciones anteriores del libro donde las preguntas han sido discutidas en detalle.

- ***¿Cuáles son las funciones y los estándares asociados de funcionamiento de los activos en contexto operativo actual?***

RCM está basado en la premisa de que cada activo se adquiere para cumplir una función o funciones específicas, y que el mantenimiento significa hacer lo que sea necesario para asegurar que continúe cumpliendo cada función a satisfacción de sus usuarios. En la mayoría de los casos, los usuarios más importantes son los *gerentes de operaciones y producción*. A fin de asegurar que RCM genere un programa de mantenimiento que facilite lo que estos gerentes desean, es necesario que ellos participen activamente en todo el proceso. (En áreas tales como seguridad, higiene o el medio ambiente, también puede necesitarse de las recomendaciones de *especialistas* competentes).

Sin embargo, también hemos visto que la capacidad inherente del activo – lo que *puede* hacer – es lo máximo que realmente puede proporcionar el mantenimiento. *El personal de mantenimiento y de diseño, a menudo en los niveles de supervisión,* tienden a ser los custodios de esta información, de modo que son piezas clave de este proceso.

Si esta información es compartida dentro de un grupo de trabajo específico, los hombres de mantenimiento comienzan a percibir con mayor claridad lo que están tratando de obtener los operadores, mientras que los usuarios logran una comprensión más clara de lo que el mantenimiento puede – y no puede – proporcionar.

- ***¿De qué forma falla en satisfacer su función?***

El ejemplo de la página 54 demostró por qué es esencial que los estándares de funcionamiento usados para analizar las fallas funcionales, sean establecidos por el *personal de mantenimiento y de operaciones* trabajando en forma conjunta.

- ***¿Qué causa cada falla funcional?***

En el Capítulo 14 se explica cómo opera realmente el mantenimiento a nivel del modo de falla. Luego se acentúa la importancia de identificar las causas de cada falla funcional. El ejemplo de la página 75 muestra cómo estas causas generalmente son comprendidas con mayor profundidad por el personal y la supervisión de planta que operan más cerca de cada máquina (especialmente los *operadores u oficiales calificados y los técnicos* que tienen que diagnosticar y reparar cada falla). En el caso de equipos nuevos, una fuente valiosa de información acerca de lo que puede fallar es un *técnico de campo empleado del proveedor* y que haya trabajado en equipos iguales o similares.

- ***¿Qué sucede cuándo ocurre cada falla?***

La Parte 5 del Capítulo 4 enumera una amplia gama de información que es necesario registrar como efecto de la falla. Esto incluye:

- la evidencia de que la falla ha ocurrido, lo que a menudo se obtiene de los operadores del equipo
- la cantidad de tiempo que generalmente la máquina está parada cada vez que aparece la falla, también obtenido de los operadores o los supervisores de primera línea
- los riesgos asociados con cada falla, que pueden necesitar asesoramiento de especialistas (especialmente relacionados con temas tales como la toxicidad e inflamabilidad de los químicos, o los riesgos asociados con elementos mecánicos como los recipientes de presión, equipos elevadores y grandes componentes giratorios).
- qué debe hacerse para reparar la falla, que generalmente se obtiene de los operadores u oficiales calificados o técnicos que llevan a cabo las reparaciones.

- ***¿De qué manera afecta cada falla?***

Las consecuencias de cada falla se discuten extensamente en el Capítulo 5 y se resumen en las cuatro preguntas que encabezan la Figura 10.1 de las páginas 204/205. La evaluación de las consecuencias de las fallas sólo puede hacerse en estrecha consulta con el personal de producción/operaciones por las siguientes razones:

- *consecuencias para la seguridad y el medio ambiente*: si los efectos de un modo de falla se explican en forma razonablemente detallada, por lo general será bastante fácil evaluar si es probable que afecte la seguridad o el medio ambiente. La mayor dificultad en este área radica en decidir que nivel de riesgo es tolerable. La discusión de la página 105 acerca de quién debería evaluar el riesgo, sugiere que esta decisión debiera ser tomada por un grupo integrado por las *probables víctimas de la falla, el personal sobre el que recaiga la responsabilidad si la misma ocurriese, y si es necesario, un experto relacionado con las características específicas de la falla.*
- *fallas ocultas:* El análisis de las funciones ocultas requiere al menos cuatro elementos de información, especialmente si se utiliza un enfoque riguroso para determinar los intervalos de búsqueda de fallas (ver Capítulo 8). Esta información se resume a continuación:
  - *evidencia de la falla*: la primera pregunta del Diagrama de Decisión de RCM busca determinar si la pérdida de función causada por el modo de falla actuando por sí mismo, resultará evidente a los operarios en condiciones normales. Esta pregunta sólo puede ser contestada con certeza consultando a los operarios involucrados.
  - *circunstancias normales:* tal como se explicó en la página 130, diferentes personas pueden asignar significados completamente distintos al término "normal" para las mismas situaciones, de modo que es sensato efectuar esta pregunta en presencia de los operadores y sus supervisores.
  - *probabilidad tolerable de una falla múltiple*: esto debería ser establecido por el grupo estudiado en la página 105.
  - *el tiempo medio entre fallas de una función protegi*da: se necesita si la disponibilidad deseada de un dispositivo protegido se determinará de manera rigurosa. Si esta información no fue registrada en el pasado, a veces puede obtenerse preguntando a los operadores del equipo cuán a menudo se pide al dispositivo protector actuar por la falla de la función protegida.

- *consecuencias operacionales*: una falla tiene consecuencias operacionales si afecta a la producción, a la calidad del producto o al servicio al cliente, o si produce un incremento de los costos, además de los costos directos de reparación. Evidentemente, el personal que está en la mejor posición para evaluar las consecuencias son los gerentes y supervisores de operaciones, quizás con la ayuda de un contador de costos.

- *consecuencias no operacionales:* habitualmente el personal que está en mejor posición para evaluar los costos directos de reparación son los supervisores de primera y segunda línea de mantenimiento.

- ***¿Qué puede hacerse para predecir o prevenir cada falla?***

En los Capítulos 6 al 9 se discutió la información necesaria para evaluar la factibilidad técnica de los diferentes tipos de tareas proactivas, y las preguntas clave se resumen en la página 209. Si no se dispone de datos actuariales ciertos para proporcionar respuestas, entonces las preguntas deben responderse nuevamente sobre la base del juicio y la experiencia, tal como sigue:

- *tareas a condición:* las páginas 158 y 159 subrayaban cuán importante es considerar tantas fallas potenciales diferentes como sea posible cuando se buscan tareas a condición. Las posibilidades de monitoreo varían desde técnicas sofisticadas de monitoreo de condición, pasando por la calidad del producto y el monitoreo de los efectos primarios, hasta los sentidos humanos, con lo que debemos consultar con operadores, personal de mantenimiento, supervisores y, si fuese necesario, con especialistas en las distintas técnicas.

  Un grupo similar debería considerar la duración y uniformidad de los intervalos P-F asociados, tal como fue explicado en las páginas 168 y 169. La cantidad de tiempo necesaria para evitar las consecuencias de la falla (en otras palabras, el intervalo P-F neto) se establece en conjunto con los supervisores de mantenimiento y los de operaciones.

- *reacondicionamiento y sustitución cíclica*: en ausencia de datos históricos aceptables, las personas que por lo general es más probable que sepan si cualquier modo de falla está relacionado con la edad, y si así fuera cuándo se da y cuál es el punto donde hay un rápido incremento de la probabilidad condicional de falla, una vez más son los operarios, el personal de mantenimiento y los supervisores que estén más cercanos al activo.

  Generalmente los supervisores de mantenimiento o en casos dudosos, los especialistas técnicos, son quienes deciden si es posible o no restituir al activo la resistencia original a la falla.

- ***¿Qué sucede si no puede encontrarse una tarea proactiva aceptable?*** Las dos acciones a "falta de" que se necesitan considerar son principalmente, las tareas de búsqueda de fallas y el rediseño:

- *búsqueda de fallas:* Si la frecuencia de la tarea de búsqueda de fallas es establecida sin un análisis riguroso del sistema protegido, la disponibilidad deseada del sistema protector debería ser determinada *por un grupo como el descrito en la página 105.*

  En ausencia de registros apropiados, el TMEF del dispositivo puede obtenerse inicialmente solicitando esta información al fabricante del dispositivo, o pidiendo a quienes en el pasado han realizado algún tipo de inspección funcional, los resultados obtenidos. Tal como se mencionó en la página 187, generalmente esto lo realiza *un operador o una persona de mantenimiento.*

  Los especialistas de mantenimiento y los supervisores generalmente son las personas mejor calificadas para evaluar si es posible realizar una tarea de búsqueda de fallas de acuerdo con el criterio establecido en la página 189.

- *rediseño:* el tema del rediseño se discutió detalladamente en el Capítulo 9. Téngase en cuenta que el proceso RCM convencional sólo intenta identificar situaciones donde el rediseño es obligatorio o deseable. Los Grupos de Análisis RCM no deben intentar desarrollar diseños nuevos durante las sesiones de RCM por dos razones:
  - el proceso de diseño requiere de habilidades que por lo general las personas que participan en una sesión de RCM no poseen.
  - hecho en forma apropiada, el desarrollo de un diseño nuevo toma un tiempo enorme. Si se usa este tiempo durante las sesiones de revisión de RCM, el proceso se demora y puede paralizar el resto del programa. (Esto no significa que los diseñadores no deban consultar a los usuarios y a quienes mantienen el activo – sino que no debe hacerse como parte del proceso de revisión RCM).

Los párrafos anteriores demuestran que es imposible para una persona, o aún para un grupo de personas de un departamento, aplicar el proceso RCM por sí mismos. La variedad de la información que se necesita y la diversidad de personas a las cuales se les solicitará, sugiere que puede hacerse solamente sobre la base de amplia consulta y cooperación, especialmente entre el personal de producción/operaciones y mantenimiento. La manera más eficaz de organizar esto es convenir con el personal clave para que aplique el proceso en pequeños grupos.

13.2 Los grupos de Revisión RCM

A la luz de los temas planteados en la primera parte de este capítulo, consideramos ahora quiénes deberían participar en un grupo típico de revisión RCM, qué hace realmente cada grupo, y qué obtendrán los participantes de este proceso.

Quiénes deberían participar
El personal que se mencionó más frecuentemente en la primer parte de este capítulo fueron los supervisores, operarios y especialistas. Esto sugiere que un grupo típico de revisión RCM debería incluir al personal indicado en la Figura 13.1.

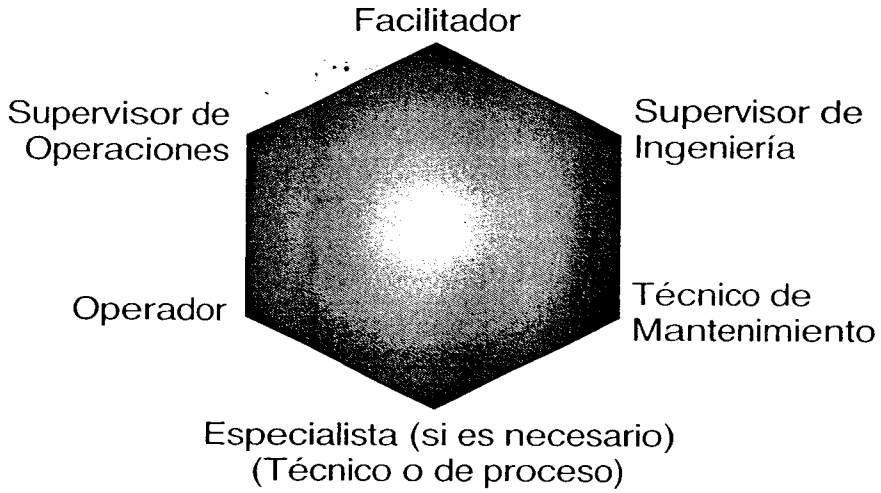


Figura 13.1: Un grupo típico de revisión RCM

En la práctica, los lugares de cada grupo no tienen que completarse exactamente por el mismo personal que el que muestra la Figura 13.1. El objetivo es conformar un grupo que pueda proveer toda, o al menos la mayor parte, de la información descrita en la Parte 1 de este capítulo. Estas personas son aquellas que tienen un conocimiento más amplio y una experiencia mayor sobre el activo y sobre los procesos de los que forma parte. Para asegurar que se tienen en cuenta los distintos puntos de vista, este grupo debería incluir una referencia cruzada de usuarios y de mantenedores, y del personal que efectúa las tareas y quién los dirige. En general, debería consistir de no menos de cuatro y no más de siete personas, siendo ideal cinco o seis. El grupo debe incluir los mismos individuos durante todo el análisis del activo. Si cambian las caras presentes en cada reunión, se pierde demasiado tiempo en temas ya cubiertos para el sólo beneficio de los recién llegados.

Tal como se sugirió en la primera parte de este capítulo, los "especialistas" pueden serlo en:

- alguna característica del proceso. Estos temas tienden a ser peligrosos o medioambientalmente sensibles.
- una forma típica de falla, tal como la fatiga o la corrosión.
- un tipo de equipo específico, tal como los sistemas hidráulicos.
- algún aspecto de la tecnología de mantenimiento, tal como el análisis de vibraciones o la termografía.

A diferencia de otros miembros del grupo, los especialistas sólo necesitan asistir a las reuniones en las que se discute su especialidad.

Qué hace cada grupo

El objetivo de cada grupo es usar el proceso RCM para determinar los requisitos de mantenimiento de un activo específico o una parte del proceso en particular. Bajo la conducción de un Facilitador, el grupo analiza el contexto en el cual está operando el activo, y luego completa la Hoja de Información tal como se explicó en los Capítulos 2 a 4. (La trascripción la realiza el Facilitador, de modo que los miembros del grupo no tienen que llevar ninguna clase de papel si no lo desean) Luego usan el Diagrama de Decisión de RCM visto en las páginas 204 y 205 para decidir como tratar cada uno de los modos de falla indicados en la Hoja de Información. Sus conclusiones se registran en las Hojas de Decisión tal como se explicó en el Capítulo 10.

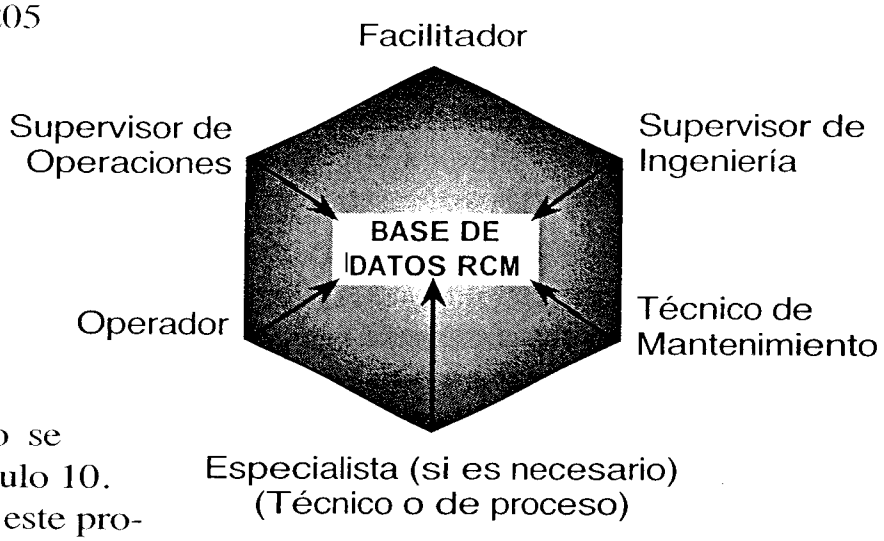


Figura 13.2: El flujo de información en la base de datos RCM

A través de todo este proceso la consigna clave *es el consenso*. A cada miembro del grupo se lo alienta en cada etapa del proceso a contribuir en todo lo que pueda, tal como se muestra en la Figura 13.2. No debería registrarse nada hasta que haya sido aceptado por todo el grupo. (Tal como se discutió en la Parte 3 de este capítulo, el Facilitador desempeña un rol crucial en este aspecto del proceso).

Este trabajo se hace en una serie de reuniones que duran cada una alrededor de tres horas, y cada grupo se reúne en promedio de uno a cinco veces por semana. Si el grupo incluye trabajadores por turno, las reuniones deben planearse cuidadosamente.

El activo debiera ser subdividido y asignado a los grupos de tal manera que cualquiera de ellos pueda completar en su totalidad el proceso en no menos de cinco y no más de quince reuniones – seguramente no más de veinte.

Qué obtienen los participantes del proceso

El flujo de información que tiene lugar en estas reuniones no está solamente en la base de datos. Cuando cualquier miembro del grupo efectúa una contribución, inmediatamente los otros aprenden tres cosas:

- más sobre el activo, más del proceso del que forma parte y más sobre lo que debe hacerse para mantenerlo trabajando. Como resultado, en lugar de tener cinco o seis personas que saben cada una un poco – a menudo sorprendentemente muy poco – del activo en revisión, la organización gana cinco o seis expertos en el tema.
- más sobre de los objetivos y metas de sus colegas. En particular, el personal de mantenimiento aprende más sobre lo que sus colegas de producción tratan de obtener, mientras que el personal de producción aprende mucho más sobre lo que el personal de mantenimiento puede – y no puede – ayudar a realizar.
- más sobre las fortalezas y debilidades individuales de cada miembro del grupo. Como saldo, se tiende a conocer más sobre las fortalezas que sobre de las debilidades, lo que tiene un efecto más saludable sobre el respeto mutuo y la comprensión recíproca.

En resumen, los participantes de este proceso ganan un mejor entendimiento de:

- lo que cada miembro del grupo (ellos mismos incluidos) debería estar haciendo
- lo que el grupo está tratando de lograr al hacerlo y
- cómo está preparado cada miembro para enfrentar el intento.

Esto transforma a un conjunto de individuos completamente diferentes provenientes de dos disciplinas notoriamente opuestas (operaciones y mantenimiento) en un equipo.

El hecho de que cada uno de ellos haya tomado parte en la definición de los problemas e identificación de las soluciones, también promueve en los participantes un mayor sentido de pertenencia. Por ejemplo, los operadores comienzan a hablar de "sus" máquinas, mientras que el personal de mantenimiento se inclina mucho más a realizar críticas constructivas sobre "sus" programas.

Este proceso ha sido descripto como " aprendizaje simultáneo ", puesto que los participantes identifican lo que necesitan aprender al mismo tiempo que lo asimilan. (Esto es mucho más rápido que el enfoque tradicional del aprendizaje, que comienza con un análisis de necesidades de entrenamiento, continúa con el desarrollo de un programa de capacitación y concluye con la presentación de los cursos de formación – un proceso que puede tomar meses).

Una limitación de este sistema de aprendizaje grupal es que a menos que se tomen acciones específicas para distribuir la información resultante, las únicas personas que se benefician directamente son los miembros del grupo. Hay dos maneras de superar este problema, y son las siguientes:

- asegurar que cualquier persona en la organización pueda tener acceso a la base de datos en cualquier momento
- usar la información del proceso RCM para desarrollar cursos normales de entrenamiento.

Las reuniones de RCM también proporcionan un foro muy eficaz para que personal clave aprenda como operar y mantener un equipo nuevo, especialmente si uno de los técnicos del proveedor participa de las reuniones desarrolladas en las etapas finales de la implementación. El proceso RCM proporciona un criterio para que dichos técnicos transfieran a los otros miembros del grupo todo lo que saben sobre el activo de una manera ordenada y sistemática. Las hojas de trabajo de RCM permiten a la organización tener la información por escrito para poder distribuirla a todo aquel que la necesite.

13.3 Facilitadores

La Parte 2 de este capítulo mencionó que el Facilitador tiene un rol crucial en la implementación de RCM. La función primaria de un Facilitador de RCM es ayudar a la aplicación de la filosofía RCM efectuando preguntas a un grupo de personas seleccionadas por su conocimiento de un activo o proceso específico, asegurando que el grupo tenga consenso en las respuestas, y registrando las mismas.

De todos los factores que influyen en la calidad final del análisis, la habilidad del Facilitador es la más importante. Esto se aplica tanto a la calidad técnica del análisis como a:

- el ritmo en el que se completa el análisis
- la actitud de los participantes hacia el proceso RCM.

Para lograr un estándar razonable un Facilitador RCM debe ser competente en 45 áreas clave. Estas habilidades pueden ordenarse dentro de 5 categorías:

- aplicar la lógica RCM
- dirigir el análisis
- conducir las reuniones
- administrar el tiempo
- administrar la logística e interacción con los niveles superiores.

En los párrafos siguientes se discuten los puntos clave sobre cada categoría.

Aplicar la Lógica RCM

El Facilitador debe asegurar que el grupo de revisión aplica correctamente el proceso RCM. Esto implica que todas las preguntas que componen el proceso RCM son efectuadas correctamente, en la secuencia correcta, que son comprendidas correctamente por todos los miembros del grupo y que el grupo logre consenso acerca de las respuestas.

Dirigir el Análisis

En general, las siguientes decisiones las toma el Facilitador y/o hace el trabajo por sí mismo.

- *Preparar las reuniones*: Antes de la primera reunión el Facilitador debe recolectar la información básica sobre el activo/proceso. Esto incluye diagramas de flujo, manuales de operación, registros históricos – si los hay – y diagramas de los circuitos eléctricos, hidráulicos y neumáticos.
- *Seleccionar los niveles de análisis / definir los límites*: El equipo a ser analizado por cada grupo de revisión deberá ser identificado durante la etapa de planeamiento. Sin embargo, puede ser necesario agrupar el equipo de forma diferente a fin de llevar a cabo un análisis inteligente. Esto significa que el Facilitador toma la decisión final acerca del agrupamiento/ nivel de análisis del equipo, y por lo tanto tiene que definir los límites del análisis.
- *Tratar apropiadamente los modos de falla complejos:* Al listar los modos de falla decidir cuándo elegir cada una de las cuatro opciones enumeradas en el Capítulo 4, Parte 7 (páginas 90 / 92).
- *Saber cuándo dejar de listar modos de falla*: Saber cuándo finalizar el listado de los modos de falla que pudieran causar cada falla funcional es uno de los elementos clave de una facilitación exitosa, y requiere un juicio cuidadoso. Pasar rápidamente a la falla funcional siguiente significa que se pueden pasar por alto modos de falla críticos o los efectos de la falla son descriptos en forma inadecuada. El listado de demasiados modos de falla conduce a la parálisis del análisis.

- *Interpretar y registrar las decisiones con un mínimo lenguaje técnico:* Como norma, el Facilitador registra las decisiones del grupo. Al hacerlo, debe tener cuidado de asegurar que todos los términos técnicos usados sean comprendidos por las personas que pudieran acceder al análisis (incluyendo auditores, ingenieros de diseño y gerentes senior).
- *Reconocer cuando el grupo no sabe:* El Facilitador tiene que distinguir entre la inseguridad (el grupo no está 100% seguro, pero sí lo suficiente como para tomar una decisión viable) y la ignorancia (simplemente, el grupo no sabe lo suficiente para tomar una decisión).
- *Evitar los intentos de rediseñar el activo durante las reuniones de RCM:* Los intentos de rediseñar el activo son la pérdida de tiempo más grande de las reuniones de RCM. El Facilitador simplemente debería anotar que el rediseño es obligatorio / puede ser deseable, y puede tomar nota de una sugerencia si la respuesta parece obvia. El proceso de rediseño en sí mismo debería ser efectuado en otro momento. (Esto no quiere decir que el grupo de RCM no pueda involucrarse en el proceso de rediseño – deberían – sino que simplemente no deberían hacerlo en la reunión de RCM.)
- *Completar las Hojas de Trabajo RCM:* Ya sea que se archiven de forma manual o electrónica, las Hojas de Trabajo de Información y de Decisión deberían completarse de manera tal que resulten claras y legibles. Las abreviaturas deberían evitarse, y contener un mínimo de errores ortográficos y gramaticales.
- *Preparar un archivo de auditoría*: Tal como se discutió en el Capítulo 11, los gerentes que tienen la máxima responsabilidad sobre un activo necesitan auditar los análisis efectuados por los grupos de revisión. Antes de poder hacer esto, el Facilitador necesita preparar las Hojas de Trabajo con un estilo claro y coherente. Esto generalmente implica reunirlas en un documento formal denominado "archivo de auditoría". Este documento también debe contener información de apoyo suficiente -dibujos esquematizados, datos conocidos de fallas, incluso fotografías del equipo- para permitir a los auditores hacer su trabajo apropiadamente.
- *Ingresar los datos de RCM en una base de datos computarizada:* Esto lo hace un "data entry" o el Facilitador. Exactamente quién debe hacerlo depende de la capacidad de escribir en computadora y de los conocimientos de informática, y de la cantidad de tiempo disponible, del Facilitador. (Los datos debieran ser ingresados directamente en una computadora durante las reuniones si el Facilitador puede tipear al menos tan rápido como pueda escribir, y si lo que se tipea puede ser leído fácil e inmediatamente por cada miembro del grupo. Tal como se vio en la Parte 8 de este capítulo, la computadora nunca debería ser usada para "hacer las preguntas").

Conducir las Reuniones

Los puntos siguientes tratan sobre la manera en que el Facilitador interactúa con los participantes de las reuniones a un nivel puramente humano.

- *preparar la escena:* En la primera reunión de cada grupo, el Facilitador debe acordar con el grupo las normas básicas de las reuniones (temas tales como el uso de nombres, vestimenta, puntualidad, etc.) y asegurar que cada miembro del grupo comprenda el alcance y los objetivos del ejercicio y por qué se invitó a participar a cada uno. Al comienzo de todos los encuentros subsiguientes, el Facilitador debería recapitular muy brevemente que se ha hecho hasta la fecha y proveer una agenda resumida de esta reunión. El Facilitador debería asegurarse que el grupo tiene suficientes materiales (las hojas de trabajo completas, etc.) para permitirles seguir el curso del proceso.
- *La conducta del Facilitador*: La forma como se conduce el Facilitador tiene un efecto profundo sobre la manera en que se comportan los otros miembros del grupo. En particular, el Facilitador debe dar un buen ejemplo exhibiendo una actitud positiva hacia el proceso, tener cuidado de preservar la dignidad de los miembros del grupo y proveer un feedback positivo para responder a contribuciones válidas.
- *Efectuar en orden las preguntas RCM*: Una vez encaminadas las sesiones, el papel principal del Facilitador es efectuar las preguntas requeridas por el proceso RCM. Es esencial evitar cualquier tendencia a pasar por alto alguna pregunta o dar por sentadas las respuestas. (En particular, hay que tener cuidado de no ignorar o dejar de lado las preguntas diseñadas para establecer si alguna tarea vale la pena.)
- *Asegurar que cada pregunta se comprenda correctamente:* A pesar del hecho de que todos los miembros del grupo debieron haber asistido a un curso básico de entrenamiento en RCM, no están tan familiarizados con el proceso RCM como el Facilitador. Como resultado, a menudo no comprenden las preguntas, especialmente en las etapas iniciales, y el Facilitador debe estar alerta ante tales circunstancias. Los errores más comunes se vieron en la segunda parte del Capítulo 12.
- *Alentar a que participe cada miembro del grupo*: Todo aquel que tenga algo para aportar debería hacerlo. Esto tiende a alentar a que la gente reticente participe y asegurar que las personalidades dominantes no prevalezcan en las reuniones excluyendo al resto. Debe mantenerse el interés y alentarse la participación pidiendo a los miembros del grupo que realicen pequeñas tareas entre las reuniones tales como clarificar puntos técnicos (quizás llamando a un proveedor, validando una dimensión, verificando un estándar de calidad, etc.).

- *Responder las preguntas*: Los Facilitadores deben evitar lo que por lo general es una gran tentación; responder directamente las preguntas de RCM. Sin embargo, es legítimo clarificar las respuestas dudosas con preguntas adicionales.
- *Asegurar el consenso*: Una de las funciones más importantes del Facilitador es asegurar que el grupo logre consenso. El consenso no significa que las decisiones se toman votando. Tampoco quiere decir que cada uno debe estar completamente de acuerdo con cada decisión. Implica estar preparado para aceptar el punto de vista de la mayoría. (Si un grupo simplemente no logra consenso, el Facilitador debería solicitar que posteriormente los asesore alguien cuya experiencia sea respetada por todo el grupo, y si fuera necesario proporcione la opinión final.)
- *Motivar al grupo*: Tal como se discutió anteriormente, uno de los factores más importantes que afectan la actitud del grupo es la actitud del Facilitador. Otros de los temas de motivación con los cuales el Facilitador ha de lidiar es la disminución del entusiasmo (especialmente si se necesita un gran número de reuniones para analizar un activo grande) y el escepticismo, donde los miembros del grupo no creen que sus recomendaciones serán tomadas seriamente por la dirección.
- *Manejar las interrupciones apropiadamente*: Todas las reuniones sufren ocasionalmente de interrupciones. Sin embargo en el caso de RCM, el grupo está tratando de hacer una cantidad de trabajo importante que requiere de concentración intensa, de modo que las interrupciones no son especialmente bienvenidas. Las tres áreas que generalmente requieren especial cuidado son las disgresiones, los conflictos de personalidad y los motivos de queja que no están relacionados con el proceso RCM.
- *Orientar al grupo o a los miembros individualmente*: Algunas veces es necesario que el Facilitador oriente a los individuos o al grupo en su totalidad en algún elemento de la filosofía RCM. Sin embargo, la orientación es ineficiente y una pérdida de tiempo, de modo que no debe tomarse como un sustituto del entrenamiento normal en RCM.

Administrar el Tiempo

RCM es un proceso que requiere el uso intensivo de recursos y es lo suficientemente exhaustivo como para que las gerencias a todo nivel tengan interés en la cantidad de tiempo y esfuerzo que requiere completar cada análisis. Los recursos requeridos para aplicar RCM y la duración de cada proyecto son profundamente afectados por el ritmo con el que los Facilitado-

res conducen las reuniones y la forma en que administran su tiempo fuera de las mismas. Como resultado, los Facilitadores necesitan desarrollar sus destrezas para administrar el tiempo tanto como en cualquier otro aspecto de RCM. Existen cinco medidas clave para una administración eficaz del tiempo:

- *Ritmo de trabajo:* Un cierto número de personas está presente en cada reunión de RCM, de modo que el tiempo que se pierde en estas reuniones tiene un impacto mayor sobre la cantidad de horas hombre utilizadas en el proceso RCM. Un progreso lento también significa la necesidad de tener más reuniones, lo que podría demorar la fecha de terminación del proyecto. Como resultado, ésta es la más importante de las cinco medidas de efectividad del tiempo utilizado.
- *Cantidad total de reuniones efectuadas*: El número total de reuniones necesarias para realizar un análisis completo debería ser determinado en la etapa de planeamiento del proyecto RCM. Una segunda medida de efectividad en la administración del tiempo es la comparación entre el número real de reuniones realizadas y su estimado. Sin embargo, los estimados pueden ser erróneos, de modo que generalmente se acepta que un Facilitador complete cualquier análisis con una tolerancia en exceso que esté dentro del 20% del número estimado de reuniones (con los adicionales apropiados para el proceso de aprendizaje en el caso de Facilitadores nuevos).
- *Fecha real de finalización contra la fecha objetivo*: La fecha de finalización de cada serie de reuniones también debería determinarse durante la fase de planeamiento del proyecto RCM. Ningún obstáculo debería detener al Facilitador para arribar a esta fecha. La finalización de las reuniones generalmente se demora porque el número requerido excede al estimado o porque las mismas no se efectuaron de acuerdo con lo planeado. Si ocurre alguno de estos problemas, deberían hacerse los esfuerzos necesarios para recuperar el tiempo perdido, y si fuere necesario programar reuniones extra.
- *Tiempo empleado para preparar la auditoría*: Tal como se explicó anteriormente, luego que las reuniones han sido completadas el Facilitador necesita preparar un archivo para la auditoría de RCM. Dado que las recomendaciones no pueden ser implementadas hasta que hayan sido auditadas, este paso debe ser llevado a cabo tan rápido como fuera posible. Un Facilitador experimentado debería ser capaz de tener un análisis listo para la auditoría final en no más de dos semanas a partir de la última reunión del grupo de revisión.

- *Tiempo fuera de las reuniones*: Los Facilitadores también son recursos escasos y caros, de modo que tienen la obligación consigo mismos y con sus empleadores de usar su propio tiempo tan eficazmente como sea posible. En el contexto de RCM, esto quiere decir que el tiempo que los Facilitadores insumen en tareas administrativas fuera de las reuniones debería ser casi el mismo tiempo utilizado para las reuniones en sí.

Administrar la Logística e Interacción con los Niveles Superiores

Esta parte del capítulo trata sobre las actividades donde el Facilitador interactúa con personas (generalmente gerentes) que no son miembros de los grupos de revisión. Estas interacciones comprenden tomar decisiones, proveer información o lograr que se haga el trabajo. Quien haga realmente esa tarea puede variar en los distintos proyectos, pero sin considerar quién se supone que debe hacerlo, el Facilitador todavía juega una parte importante en asegurar que realmente se haga. Como resultado, los Facilitadores tienden a ser juzgados sobre el progreso en estas áreas tanto como en cualquier otra:

- *Preparar el proyecto RCM como un todo*: Consiste en los siguientes pasos:
  - decidir qué activos (o qué parte de qué activos) van a ser analizados usando el proceso RCM
  - establecer los objetivos de cada análisis, y acordar cuándo y cómo van a ser medidos sus resultados
  - estimar cuántas reuniones de RCM serán necesarias para estudiar cada activo
  - decidir cómo van a ser divididos los activos entre los diferentes grupos de revisión
  - decidir quién auditará cada análisis.

Estos pasos se ejecutan generalmente en estrecha consulta con el gerente del proyecto RCM y con el gerente del activo. Si RCM es nuevo en la unidad de negocios, esta fase tiende a ser hecha con la asistencia de consultores experimentados (especialmente para estimar el número de reuniones).

- *Planear el proyecto*: Antes de comenzar cada análisis, deben planearse detalladamente los siguientes elementos:
  - decidir quién va a participar en cada grupo de análisis
  - disponer el entrenamiento en RCM para los miembros del grupo y para los auditores que todavía no fueron capacitados
  - decidir cuándo, dónde y en qué momento se celebrará cada reunión
  - decidir cuándo será auditado el análisis
  - decidir cuándo se realizará la presentación al nivel gerencial superior.

Generalmente estos pasos también se llevan a cabo consultando con el gerente del proyecto RCM y con el gerente del activo.

- *Comunicar los planes:* Los participantes y sus jefes deben recibir información escrita de los planes preliminares sobre cursos de entrenamiento y reuniones. Todas las revisiones subsiguientes de estos planes también deben ser comunicadas a tiempo. Los auditores necesitan ser advertidos sobre las próximas auditorías. Una vez encaminadas las reuniones, el gerente del proyecto RCM debe asegurar que el personal asista a las reuniones planeadas. Las normas de asistencia deben ser definidas claramente, publicadas y cumplidas estrictamente.
- *El lugar de la reunión*: El lugar para una reunión de RCM debe ser lo suficientemente grande como para que las personas se sienten alrededor de una mesa sin molestarse unas a otras, y estar razonablemente cerca del lugar de trabajo de los miembros del grupo. También debe ser un lugar tranquilo, razonablemente aislado, bien iluminado y adecuadamente ventilado. No debería ser interrumpido por llamadas telefónicas o pagers. Generalmente son esenciales un rotafolio y un pizarrón blanco. Si se proporcionan o no refrescos durante las reuniones depende de las normas de la organización.
- *Comunicar los hallazgos urgentes*: Antes de la auditoría, debe informarse a los gerentes apropiados los hallazgos o recomendaciones que les puedan ser de especial interés, o que puedan necesitar atención urgente (tales como riesgos serios para la seguridad o el medio ambiente). Esto asegura que los problemas potencialmente peligrosos se traten rápidamente, y así ayudar a mantener el interés de las personas que proveen los recursos para el proyecto.
- *Comunicar los progresos*: Mantener informada a la gerencia acerca del progreso respecto al plan. Llamar su atención sobre problemas que usted no pueda solucionar y que impidan o amenacen el progreso, tales como ausentismo permanente a las reuniones, comportamiento seriamente antiproductivo, interrupciones excesivas, etc.
- *Asegurar que se auditen las hojas de trabajo de RCM*: Generalmente el Facilitador debería asistir personalmente a las reuniones de auditoría para responder preguntas, tomar nota de las correcciones y (si se requiere) proporcionar una guía a los auditores acerca del proceso RCM (aunque los auditores deben pasar por un entrenamiento formal en RCM antes de intentar auditar un análisis RCM). El Facilitador también debe asegurar que se logre consenso entre los auditores y el grupo de revisión durante el proceso de auditoría. Esto implica que los hallazgos de la auditoría sean informados al grupo de trabajo, y asegurar que se resuelvan las diferencias. Finalmente, el Facilitador debe actualizar las hojas de trabajo para incorporar los resultados de la auditoría.

- *Presentación a la gerencia superior:* Debería presentarse a los gerentes senior de cada unidad de negocios donde se aplica el proceso, un resumen corto y de alta calidad de al menos un análisis RCM importante. Esta presentación debe mostrar como los objetivos iniciales del análisis han sido o serán logrados, y que debe hacerse para conseguirlos.
- *Implementación*: Asegurar que se implementen las decisiones de RCM es generalmente responsabilidad del gerente del activo, aún cuando el Facilitador necesitará permanecer afectado. Los elementos clave del proceso de implementación se discutieron en el Capítulo 11.
- *Un programa viviente*: Luego de completar cada análisis, el Facilitador debe trabajar con el gerente del proyecto RCM y el gerente del activo para programar las reuniones de reconsideración y actualizar el análisis donde sea necesario. Estas reuniones debieran efectuarse con intervalos de nueve a doce meses, e idealmente deberían ser conducidas por el Facilitador original. Este tema se trata con más detalle en la quinta parte de este capítulo.

Quién debería facilitar

Los Facilitadores debieran tener un conocimiento tecnológico importante, ser sumamente metódicos y promotores naturales de consenso. Pueden trabajar como Facilitadores a tiempo completo o parcial. Deberían tener también una comprensión razonable del proceso y de la tecnología incorporada en los activos bajo revisión, pero no deberían ser expertos en cada tema. Este enfoque está totalmente basado en el concepto que los otros miembros del grupo son los expertos en estas áreas. (También puede explicar por qué los expertos del proceso y los gerentes y supervisores de mantenimiento deberían participar en el proceso como miembros del grupo, pero no hacerlo como Facilitadores).

En el tema en que un Facilitador debiera ser experto, es en RCM, lo que quiere decir que generalmente se requiere un entrenamiento apropiado. A fin de asegurar el nivel de "propiedad" más alto posible y el compromiso a largo plazo con las conclusiones extraídas durante el proceso, el Facilitador también debería ser un empleado a tiempo completo de la organización que opera/mantiene el activo en el largo plazo. (Esta es una de las muchas razones por las que es altamente recomendable que no sean utilizados como Facilitadores de RCM quienes no pertenecen a la organización.)

13.4 Estrategias de Implementación

Hablando en general, el enfoque del grupo de RCM descripto puede aplicarse en una de tres maneras:

- el enfoque de la fuerza de tareas
- el enfoque selectivo
- el enfoque amplio

Los aspectos clave de estos enfoques se tratan a continuación.

El Enfoque de la Fuerza de Tareas

Las organizaciones que tienen activos o procesos que sufren problemas recurrentes con consecuencias serias, adoptan el enfoque de "fuerza de tareas" para aplicar RCM. Esta enfoque implica entrenar a un pequeño grupo (la fuerza de tareas) para llevar a cabo un análisis RCM intensivo del sistema afectado. Cada fuerza de tareas está formada por miembros provenientes de las mismas áreas que los descriptos en la Parte 2 de este capítulo. Generalmente trabajan a tiempo completo en el proyecto de revisión hasta que está completo, y luego el grupo se disuelve.

- Las ventajas principales de este criterio son que: *es rápido*, porque sólo uno o dos grupos tienen que progresar en la curva de aprendizaje de RCM, *es fácil de dirigir*, porque está involucrado sólo un pequeño número de personas, y si tiene éxito – lo que es habitual – puede obtener ahorros sustanciales (en términos de mejoramiento del desempeño de planta) *con una inversión relativamente pequeña*.
- Las principales desventajas de este enfoque son que: *no hace nada para asegurar participación y compromiso de todas las personas de la organización hacia los resultados en el largo plazo*, de modo que los resultados *son mucho menos probables que perduren*, y dado su enfoque limitado, *hace poco para fomentar las mejores prácticas en toda la organización*.

El Enfoque Selectivo

Además de los problemas agudos que puede llevar a las empresas al enfoque de la fuerza de tareas, la mayoría también tienen algunos activos que son más susceptibles que otros a problemas crónicos difíciles de identificar. Estos problemas generalmente se manifiestan como tiempos de parada, pobre calidad del producto, pobre calidad del servicio al cliente o costos de mantenimiento excesivos. Otras áreas pueden enfrentarse con riesgos inaceptables para la seguridad o el medio ambiente, que necesiten ser abordados en forma sistemática.

Dado que hay cientos o miles de elementos para elegir en un emprendimiento grande, lo más sensato es comenzar a aplicar una técnica con el poder de RCM en aquellas áreas donde se encuentran los peores problemas. Una vez tratados estos activos, se decide si RCM será usado para analizar otros activos con problemas menos serios, y así sucesivamente.

El autor ha encontrado que en la mayoría de los casos, el camino más sencillo, más rápido y más eficaz para identificar los activos físicos que están causando los problemas más serios (especialmente en términos de consecuencias de fallas) es preguntando a los usuarios. Esto generalmente quiere decir preguntar a gerentes de producción o de operaciones de todos los niveles.

Si los peores problemas no son evidentes inmediatamente, o si no es posible lograr consenso acerca de dónde comenzar informalmente, entonces a veces es necesario decidir dónde debe aplicarse RCM usando un criterio más formal. Esto puede realizarse en tres etapas:

- identificar los activos "importantes". Son aquellos que más probablemente se beneficien del proceso RCM.
- ordenar los activos en orden decreciente de importancia.
- decidir si para activos muy similares puede usarse un criterio "patrón".

Activos importantes

Un activo es considerado importante si puede sufrir algún modo de falla que por sí mismo:

- pudiera amenazar la seguridad o quebrantar cualquier estándar medioambiental conocido
- tuviera consecuencias económicas importantes.

Los equipos también pueden ser considerados importantes si contienen funciones ocultas cuyas fallas expondrían a la organización a una falla múltiple con consecuencias importantes para la seguridad, el medio ambiente o las operaciones. Por el contrario, debemos estar seguros que cualquier equipo que sea clasificado como no importante cumpla con lo siguiente:

- ninguno de sus modos de falla afectarán la seguridad o el medio ambiente
- ninguno de sus modos de falla tendrá consecuencias operacionales importantes
- no contiene una función oculta cuya falla exponga a la organización al riesgo de una falla múltiple importante.

El proceso de identificar equipos importantes es rápido, aproximado y conservador. En otras palabras, si no se está seguro que un activo no sea importante en el sentido descripto anteriormente, entonces debiera estar sujeto a una revisión completa de RCM. Téngase en cuenta que la evaluación de importancia puede realizarse a cualquier nivel, entendiendo que ese puede no ser el nivel en el que eventualmente se haga el análisis RCM.

Cuando se toman decisiones sobre importancia, téngase en cuenta que el proceso RCM se aplica a cualquier activo en su contexto operacional. Este contexto es una función del proceso o sistema del que forma parte, de modo

que cualquier activo sólo podría ser analizado en el contexto de un proceso o sistema específico (tal como una línea de empaque, un tren de laminación o una grúa). La elección de los equipos importantes nunca debe basarse en equipos o elementos generales (todas las bombas, todos los cojinetes, todas las válvulas de alivio), porque éstos serían sacados de contexto.

En la industria de la aviación civil, un porcentaje sorprendentemente alto de elementos pueden clasificarse como no importantes en el sentido descripto anteriormente. Sin embargo, durante treinta años esta industria ha estado diseñando aviones específicamente preparados para evitar o minimizar las consecuencias de las fallas, de modo que hay un nivel muy alto (pero todavía no infalible) de redundancia en sus activos.

Sin embargo, en otras industrias, los activos tienden a tener un nivel de redundancia mucho menor, de manera que una proporción relativamente alta de componentes termina siendo clasificada como importante, especialmente si se le da la debida consideración a las fallas que podrían afectar la seguridad o el medio ambiente. Esto significa que la mayoría de las organizaciones se encontrarán con un gran número de componentes que deberían ser analizados. Si la respuesta en sí no resulta evidente, la próxima pregunta que necesita ser respondida sistemáticamente es: "¿Dónde comenzamos?".

Clasificación de los activos importantes en orden de importancia

Se han desarrollado una gran cantidad de técnicas que intentan proveer un criterio sistemático, generalmente cuantitativo, para decidir qué activos probablemente se beneficien más por la aplicación de procesos analíticos como RCM. Algunas veces llamadas "evaluaciones de criticidad", la mayoría de estas técnicas usan alguna variación del concepto conocido como "número riesgo/probabilidad" o NRP.

Un NRP se obtiene asignando un valor numérico a la probabilidad de falla – o tasa de falla – de un activo (cuanto mayor es la probabilidad, mayor es el valor), y otro valor para la gravedad de las consecuencias de la falla (de nuevo, cuanto más seria es la falla, más alto es el valor). Los dos números se multiplican para dar un coeficiente que es el NRP. Los activos con los NRP más altos se analizan primero, luego aquellos con menores puntajes y así hasta que se encuentren activos donde el retorno probable no justifica un análisis detallado.

Las variaciones más sofisticadas de este proceso desarrollan NRP compuestos asignando diferentes ponderaciones a distintas categorías de consecuencias de fallas (típicamente, altos para consecuencias para la seguridad o el medio ambiente, intermedios para las operacionales y bajas para los costos directos de reparación).

Si se dispone de datos históricos válidos de tasas de fallas y de costos, estas clasificaciones pueden ser refinadas posteriormente usando el análisis de Pareto. Las clasificaciones sistemáticas de este tipo pueden utilizarse para clarificar y generar consenso acerca de los activos que realmente importan y donde son particularmente vulnerables los sistemas grandes y complejos. Sin embargo, el criterio y las ponderaciones relativas usadas para evaluar la gravedad y la probabilidad varían completamente de una compañía a otra, de modo que la mayoría de los procesos de evaluación de criticidad usan graduaciones y valores que son validos para organizaciones específicas.

Análisis por similitud

Otra manera de reducir la inversión en RCM es usar el análisis de un activo como "patrón" para otros. Por las razones señaladas repetidamente a lo largo de los Capítulos 2, 3, 4 y 5, este enfoque sólo puede aplicarse a activos o procesos que son muy similares, si no idénticos, y que están operando virtualmente en el mismo contexto.

Cuando se adopta este criterio, un grupo RCM efectúa un análisis amplio de base cero del primero de una serie de componentes o procesos muy similares, y luego usa este análisis como base para la revisión de los otros componentes de la serie. Para hacer esto, el grupo pregunta si las funciones y los estándares de rendimiento de cada uno de los componentes subsiguientes difieren en algo de aquellos listados en las hojas de trabajo del componente de base cero. Las diferencias (si las hay) se registran en las hojas de trabajo del segundo componente, y los analistas luego comparan las fallas funcionales, y así hasta que hayan completado todo el análisis.

Si los componentes son técnicamente idénticos y el contexto operativo es muy similar, este enfoque puede ahorrarnos una cantidad considerable de tiempo y esfuerzo, porque en la mayoría de los casos una proporción sustancial del análisis permanece sin cambios para los componentes subsiguientes.

Sin embargo, mientras que es técnicamente atrayente, el análisis por similitud también puede tener inconvenientes motivacionales bastante serios. Esto es porque se les pide a los operadores y al personal de mantenimiento de los activos subsiguientes que acepten decisiones tomadas por otros, lo que naturalmente reduce su sentido de pertenencia. En casos extremos, este personal puede llegar a rechazar el análisis inicial sin atender razones porque "no fue inventado aquí". Este fenómeno ha inducido a algunas organizaciones a no usar en absoluto el análisis por similitud, y comenzar todos los análisis a partir de base cero.

(Es interesante ver que esto puede conducir a programas de mantenimiento completamente distintos, dado que los diferentes grupos eligen métodos

distintos para tratar con la misma falla. Las razones por las cuales esto puede ocurrir en forma completamente legítima se explicó en la Figura 7.8 de la página 158.)

Ventajas y desventajas del enfoque selectivo

Por lo general, las organizaciones que adoptan el enfoque selectivo, aplican RCM del 20% al 40% de sus activos.

- La ventaja principal de este enfoque es que la inversión se realiza sólo cuando produce *retornos rápidos* y (generalmente) *mensurables*. Puesto que RCM se aplica sólo a parte de la instalación, *el proyecto es menos costoso* y por lo tanto *más fácil de administrar* que si se analizara la instalación por completo.
- La desventaja principal de este enfoque *es que pone mucho mayor énfasis en el desempeño técnico y operativo del equipo que en la gente* de la que finalmente depende el equipo en el largo plazo (los operadores y el personal de mantenimiento).

El Enfoque Amplio

El tercer enfoque para la aplicación de RCM pone al menos el mismo énfasis en mejorar el conocimiento y la motivación de los individuos y perfeccionar el trabajo en equipo entre los usuarios y quienes mantienen los activos, como sobre el rendimiento de los activos mismos. Esto se hace a menudo de dos maneras:

- analizar todos los activos del lugar en una campaña corta e intensa. En la mayoría de los lugares las campañas de esta naturaleza duran de seis a dieciocho meses. Pueden estar activos simultáneamente hasta veinte y aún más grupos, trabajando bajo la dirección de tres o cuatro, hasta treinta o cuarenta Facilitadores. Tan pronto como un grupo completa el análisis de su activo o proceso, se activa un nuevo grupo. De esta manera, finaliza la campaña rápidamente y la organización disfruta de todos los beneficios igual de rápido. En realidad, este es un camino excelente para lograr cambios importantes y duraderos en el desempeño de mantenimiento para las compañías que necesitan hacerlo rápidamente. Sin embargo, este es un enfoque que requiere un uso de recursos intensivo, de modo que se necesita un planeamiento muy minucioso y mucha atención gerencial. Realmente no debería ser considerado si se emprenden otras iniciativas en paralelo con RCM.
- una segunda posibilidad es revisar todos los equipos del lugar, pero hacerlo en etapas. Quizás se activen cuatro o cinco grupos al mismo tiempo, trabajando bajo la dirección de uno o dos Facilitadores. Sobre esta base puede estimarse que tomaría de cinco a diez años analizar todos los equipos de una instalación grande (tres a cuatro en una más pequeña). La organi-

zación todavía obtiene todos los beneficios de RCM, pero toma mucho más tiempo el lograrlo. Este criterio es menos desorganizador en el corto plazo, pero si sus expectativas no son administradas cuidadosamente, podría ser visto como "algo interminable", y por lo tanto podría resultar desmotivador. Por otra parte, significa que RCM puede ser aplicado en paralelo con otras iniciativas y viceversa.

Dado que las personas que pueden beneficiarse con este enfoque a menudo superan en número a los activos, generalmente es necesario analizar la mayoría o todos los activos de modo que todos puedan participar del proceso.

- Las desventajas principales de este criterio son: es más lento porque debe familiarizarse con la metodología RCM mucha más gente, y *es más difícil de conducir*, porque hay muchas más personas involucradas.
- La ventaja principal es que asegura *un sentido mucho más amplio de pertenencia de los problemas de mantenimiento y sus soluciones* en el largo plazo. Esto no sólo mejora la motivación individual y el trabajo de equipo, sino que también asegura que los resultados del ejercicio *son mucho más propensos a perdurar*. (La mejor práctica se convierte en "parte de la manera en que aquí hacemos las cosas")

Decidiendo qué enfoque usar

Para aplicar RCM correctamente, se requiere un compromiso sustancial de recursos. Si se aplica el enfoque amplio descripto precedentemente, se necesita del compromiso y cooperación de una gran cantidad de personas. Como resultado, es prudente decidir qué enfoque debería usarse en etapas.

Dado que los gerentes tienen que ceder los recursos para RCM, tiene sentido darles la oportunidad de aprender de qué se trata RCM, para que ellos mismos evalúen qué recursos se requieren para aplicarlo y que juzguen qué beneficios potenciales ofrece en sus áreas de responsabilidad. Generalmente la mejor forma de hacer esto, es hacer que asistan a un curso introductorio de entrenamiento.

Si la respuesta es favorable, el paso siguiente es iniciar uno o dos proyectos piloto. Estos permiten a la organización ganar experiencia de primera mano sobre la dinámica del proceso completo de RCM, lo que se obtiene, y qué recursos necesitan comprometerse para lograrlo.

Sin embargo, antes de emprender cualquier proyecto piloto, es esencial evaluar los recursos requeridos con relación a los beneficios probables, y planear el proyecto tan minuciosamente como sea posible. Esto debería hacerse en estrecha consulta con los gerentes del área donde sea probable que se lleve a cabo un proyecto piloto, y comprende los siguientes pasos:

- confirmar el alcance del proyecto y definir los objetivos (el estado actual y el estado final deseado)

- tiempo necesario estimado para la revisión de los equipos de cada área
- identificar el gerente del proyecto y el (los) Facilitador (es)
- identificar los participantes (por título y nombre)
- planear el entrenamiento de los participantes y los Facilitadores
- planear la fecha, tiempo y lugar de cada reunión.

Cuando el (los) proyecto(s) están completos, los participantes están en posición de evaluar los resultados por sí mismos y decidir a cuál, dónde, y cuán rápido debería aplicarse RCM al resto de los activos de la organización. El Capítulo 14 explica que RCM devenga retornos sustanciales, pero que la naturaleza de estos ahorros varía mucho de una organización a otra. Como resultado, el mejor momento para decidir qué criterio adoptar es luego de haber completado cierto número de proyectos piloto y la organización es capaz de juzgar por sí misma qué retornos ofrece RCM con relación a los gastos.

13.5 RCM Perdurable

La aplicación de RCM conduce a una comprensión mucho más precisa de las funciones de los activos que se analizan, y una visión mucho más científica de lo que debe hacerse para que continúen cumpliendo sus funciones específicas. Sin embargo, el análisis no será perfecto – y nunca lo será – por dos razones:

- la evolución de la política de mantenimiento es imprecisa por naturaleza. Muchas decisiones deben tomarse sobre la base de datos incompletos o inexistentes, especialmente sobre las relaciones entre edad y falla. Deben tomarse otras decisiones acerca de la posibilidad y consecuencias de modos de falla que no han ocurrido todavía, y que podrían no ocurrir nunca. En un medio como este, es inevitable que algunos modos de falla y/o sus efectos sean pasados por alto completamente, en tanto que algunas consecuencias de fallas y frecuencias de tareas serán evaluadas incorrectamente.
- los activos y los procesos de los cuales forman parte están cambiando permanentemente. Esto significa que aún cuando las partes del análisis hoy sean completamente válidas mañana pueden dejar de serlo.

El personal involucrado en el proceso también cambiará. Esto es en parte porque las perspectivas y prioridades de aquellos que toman parte en el análisis original inevitablemente irán cambiando con el tiempo, y en parte porque simplemente la gente olvida cosas. En otros casos, las personas se alejan y sus lugares son ocupados por otros que necesitan aprender por qué

las cosas son como son. Todos estos factores expresan que la validez de la base de datos RCM y la actitud de las personas se deteriorarán inevitablemente si no se hace algo para evitar que esto suceda.

Una manera de evitar esto es usar el proceso RCM para analizar todos los modos de falla no anticipados que ocurren después de haber completado el análisis inicial. Esto puede hacerse convocando un grupo ad-hoc que use RCM para determinar la manera más efectiva de tratar con la falla.

Los resultados de sus reuniones deberían ser introducidos en la base de datos del activo afectado. El grupo ad-hoc debería incluir tantas personas de las que efectuaron el análisis inicial como fuera posible.

Una segunda manera – y mucho más segura –de asegurar que la base de datos RCM permanezca actualizada a perpetuidad es solicitar a los grupos originales que revisen la base de datos de su "activo" de manera regular una vez cada nueve o doce meses. Tal revisión no necesita durar más que una tarde. Las preguntas específicas que deberían ser consideradas incluyen:

- ¿ha cambiado *el contexto operativo* del equipo lo suficiente como para modificar cualquiera de las decisiones tomadas durante el análisis inicial? (Los ejemplos incluyen el cambio de un turno simple a uno doble, o viceversa)
- ¿ha cambiado alguno de los *rendimientos esperados* del equipo lo suficiente como para necesitar revisiones de los estándares de funcionamiento registrados en las hojas de trabajo RCM?
- ¿desde el análisis inicial, han ocurrido algunos *modos de falla* que deberían ser registrados en las hojas de trabajo RCM?
- ¿debería agregarse o cambiarse algo en las descripciones de los *efectos de fallas*? (Esto se aplica especialmente a la evidencia de falla y las estimaciones de tiempos de parada)
- ¿ha ocurrido algo que lleve a creer que las consecuencias de las *fallas* deberían ser evaluadas de otra manera? (Aquí las posibilidades incluyen cambios de las normas de medio ambiente, o cambio de ideas sobre los niveles aceptables de riesgo)
- ¿hay alguna razón para creer que cualquiera de las *tareas* inicialmente elegidas en realidad no son técnicamente factibles o que no merezcan la pena?
- ¿ha pensado alguien en una *técnica proactiva* que sería mejor que alguna de las elegidas previamente? (En la mayoría de los casos, "mejor" significa " más costo eficaz ", pero también podría ser técnicamente superior)
- ¿hay alguna razón para sugerir que alguna tarea o tareas deberían ser *hechas por* otra persona que la seleccionada inicialmente?

- ¿el activo ha sido *modificado* de alguna manera que agrega o quita algunas funciones o modos de falla, o que cambia la factibilidad técnica de algunas tareas? (Debería prestarse especial atención a los sistemas de control y protección).

Si tales revisiones se llevan a cabo regularmente, sólo insumen una fracción del tiempo necesario para generar la base de datos original, pero aseguran que la organización continúa aprovechando a perpetuidad los beneficios del ejercicio original. Estos beneficios se explican con más detalle en el Capítulo 14.

13.6 Cómo No Debería Aplicarse RCM

Si se aplica correctamente, RCM obtiene resultados muy rápidamente. Sin embargo, no toda aplicación de RCM rinde a su máximo potencial. Algunas logran poco o nada. Según la experiencia del autor, las razones por las que ocurre esto pueden ser de naturaleza técnica, pero la mayoría son de organización. En los párrafos siguientes se discuten las más comunes.

El análisis se realiza a un nivel muy bajo.

Los problemas que surgen si un análisis RCM se realiza a un nivel muy bajo se discutieron en detalle en la Parte 7 del Capítulo 4. Los más importantes son que el análisis demora más que lo que debiera, genera un importante aumento del papeleo y se deteriora la calidad de las decisiones. Como resultado, las personas comienzan a pensar que el proceso es tedioso y pierden interés, cuesta mucho más de lo debido y no se obtiene tanto como se pordría.

Una aplicación demasiado apurada o muy superficial.

Generalmente esto es el resultado de un entrenamiento insuficiente, o de demasiada presión sobre los participantes clave. A menudo resulta en un conjunto de tareas que son casi las mismas que se hacían al comienzo.

Demasiado énfasis en los datos de fallas.

Por lo general existe una tendencia a sobreenfatizar la importancia de datos tales como TMEF (Tiempo Medio Entre Fallas) o TMER (Tiempo Medio Entre Reparaciones). Este tema fue explicado detalladamente en el Capítulo12. Tales datos son casi siempre sobreenfatizados a costa de la apropiada definición y cuantificación de los estándares de funcionamiento, de la evaluación completa de las consecuencias de las fallas y del uso correcto de datos tales como los intervalos P-F.

Pedirle a una sola persona que aplique el proceso.

Uno de los caminos menos efectivos para aplicar RCM es pedirle a una sola persona que aplique el proceso por sí mismo. En realidad, no importa cuánto esfuerzo aplique una sola persona al desarrollar un programa de mantenimiento (ya sea usando RCM o cualquier otra técnica) los planes resultantes casi siempre morirán cuando lleguen al taller, principalmente por dos razones:

- *validez técnica*: no es posible que un individuo pueda tener un conocimiento adecuado de las funciones, los modos de falla, los efectos y las consecuencias de fallas de los activos para los cuales ha desarrollado un programa. Esto conduce a programas que por naturaleza son genéricos de modo que la gente que se supone que los implementará, los encontrará incorrectos o totalmente irrelevantes.
- *pertenencia*: las personas del taller (supervisores y especialistas) tienden a ver los programas como papeleo inoportuno que viene de alguna torre de marfil y desaparece luego de ser anunciado. Muchos de ellos aprendieron que es mucho más cómodo simplemente firmar los programas y luego devolverlos, que intentar ejecutarlos. (Esto lleva a tener índices de cumplimiento de programas engañosos que tiene contentos a los planificadores). Sin duda alguna, la razón principal de la pérdida de interés es la falta absoluta de pertenencia.

La única forma de salvar los problemas de validez técnica y falta de pertenencia es involucrar a las personas del taller directamente en el proceso de formulación de estrategias de mantenimiento tal como se dijo anteriormente.

Si esto se hace bien, RCM no sólo genera programas con un grado de validez técnica mucho mayor que cualquier otro anterior, sino que también conlleva un nivel excepcionalmente alto de pertenencia con los resultados finales.

Utilizar sólo el departamento de mantenimiento para aplicar RCM.
En muchas organizaciones, todavía existe una división insalvable entre las funciones de mantenimiento y producción. A menudo esto lleva a que el personal de mantenimiento de tales organizaciones trate de aplicar RCM por su cuenta. De hecho, tal como se aclaró en el Capítulo 2, mantenimiento debe hacer todo para asegurar que los activos continúen funcionando a los estándares de funcionamiento requeridos por sus usuarios. Hemos visto que los "usuarios" son casi siempre personal de producción u operaciones. Si estas personas no están estrechamente involucradas en ayudar a definir las funciones y los estándares de funcionamiento, generalmente surgen dos problemas:

- el personal de mantenimiento lo hace por sí mismo. Por la experiencia del autor, esto casi siempre conduce a gran cantidad de enunciados incorrectos de funciones y estándares de funcionamiento, y consecuentemente a programas diseñados para resguardar funciones distorsionados o inapropiados.
- Hay poca o ninguna aceptación del programa por parte de los usuarios, quienes después de todo son los "clientes" del servicio de mantenimiento. Esto a su vez significa que los usuarios no ven tan claramente por qué liberar las máquinas para el mantenimiento elemental redunda en su propio beneficio, y también por qué se necesita que los operadores efectúen ciertas tareas de mantenimiento.

Además de definir lo que desean que haga el activo, tienen que hacer una contribución vital en el proceso de formulación de la estrategia. Como se explicó en la primera parte de este capítulo, al participar en el AMFE (Análisis de Modos de Falla y sus Efectos), aprenden mucho acerca de modos de falla causados por error humano, y por lo tanto qué deben hacer para no continuar deteriorando sus máquinas. También juegan un rol importante al evaluar las consecuencias de fallas, y tienen una experiencia personal invalorable para determinar muchos de los avisos de falla más comunes. Si no participan del proceso todo esto se pierde.

En resumen, desde un punto de vista puramente técnico, se hace evidente que es virtualmente imposible en la mayoría de los emprendimientos industriales, establecer un programa de mantenimiento viable y duradero sin involucrar a los usuarios de los activos. (Este enfoque sobre el usuario –o cliente– es naturalmente la esencia del TQM: Total Quality Management o Administración de la Calidad Total) Si se puede asegurar su participación en todas las etapas del proceso, aquella barrera insalvable comienza a desaparecer rápidamente y las dos funciones comienzan a trabajar como un equipo genuino por primera vez.

Solicitar a los proveedores del equipo que apliquen RCM por su cuenta. Una característica universal de la adquisición de activos es la insistencia en que el fabricante, como parte del contrato de provisión del nuevo equipo, debería entregar un programa de mantenimiento. Aparte de cualquier otra cosa, esto implica que los fabricantes conocen todo lo que se necesita saber para generar un programa de mantenimiento aceptable.

En realidad, como se explicó en la Página 82, generalmente los fabricantes de equipos tienen poca de la información necesaria para elaborar programas de mantenimiento para un contexto operativo específico. También, cuando especifican tales programas tienen otros objetivos (uno de los cuales es vender repuestos). Es más, comprometen los recursos de los usuarios para hacer el mantenimiento (en cuyo caso no tienen que pagarlos, de modo que tienen poco interés en minimizarlo) o pueden proponer hacer ellos mismos el mantenimiento (en cuyo caso pueden estar tentados a hacer tanto como sea posible).

Esta combinación de compromisos comerciales e ignorancia sobre el contexto operativo, implica que los programas de mantenimiento especificados por los fabricantes a menudo contienen un nivel de mantenimiento excesivamente alto (algunas veces hasta ridículo) junto con una provisión excesiva de repuestos.
La mayoría de los profesionales de mantenimiento son conscientes de este problema. Sin embargo, a pesar de su conocimiento, la mayoría todavía persiste en solicitar estos programas a los fabricantes, y luego aceptan que deben seguirlos para que las garantías continúen siendo validas (y así obligamos contractualmente a realizar el trabajo, al menos durante el período de garantía).

Nada de esto implica sugerir que los fabricantes nos engañan deliberadamente cuando adjuntan sus recomendaciones. En realidad, hacen lo mejor posible según los objetivos de su propio negocio y con la información de que disponen. Si alguien está en falta, en realidad, somos nosotros–los usuarios– por hacer pedidos irracionales a organizaciones que no están en la mejor posición para satisfacerlas.

Un número cada vez mayor de usuarios solucionan este problema adoptando un enfoque completamente diferente para el desarrollo de programas de mantenimiento de equipos nuevos, involucrando a los asistentes técnicos de los fabricantes en un análisis RCM conducido por los usuarios, tal como se vio en la página 82.

De este modo, el usuario consigue acceder a la información más útil que el fabricante pueda facilitar a la vez que se desarrolla un programa de mantenimiento adaptado directamente al contexto en el que el equipo será usado. El fabricante podrá perder ciertas ventas iniciales de repuestos y mantenimiento, pero en definitiva a largo plazo obtendrá todos los beneficios asociados con el mejor rendimiento del equipo, menores costos en el período de vida y una comprensión mucho mayor de las necesidades reales del usuario. Una situación en la que ambas partes ganan.

Utilizar terceros para aplicar RCM

Es aconsejable no caer en la tentación de usar terceros para formular estrategias de mantenimiento. Estos tienen los mismos defectos que se aplican a las personas en forma individual, a los departamentos de mantenimiento que lo hacen por sí mismos y a los fabricantes / proveedores de equipos tal como se analizó en los párrafos previos. Además, la mayoría del personal externo desconoce la dinámica de la organización para la cual se hacen los programas, tales como el contexto operativo de cada activo, los riesgos que la organización está preparada a tolerar y las habilidades de los operadores y los especialistas en mantenimiento del activo. A menudo esto resulta en análisis genéricos que contienen muchas más suposiciones que si fueran realizados por personal interno informado. Es más, luego de haber completado los análisis iniciales, el personal externo generalmente se desplaza a otras organizaciones. Luego de haberse retirado, la mayoría de las veces no queda nadie con un sentido de pertenencia suficiente con los análisis y sus resultados como para asegurar que permanezcan vigentes en el sentido dado en el punto 5.

Finalmente, el hecho de que la mayoría del personal externo generalmente esté trabajando por contrato introduce restricciones comerciales que pueden distorsionar el proceso RCM si no se manejan en forma muy cuidadosa. En particular, la necesidad de finalizar los contratos en tiempo y presupuesto

crea presiones adicionales de tiempo que pueden hacer que se tomen demasiadas decisiones en muy poco tiempo. Estas podrían tener consecuencias devastadoras años, o décadas, después de haberse completado los contratos.

Por otra parte, si RCM se aplica por personal propio adecuadamente entrenado, sus trabajos – de hecho, sus vidas –dependerán casi literalmente de la validez a largo plazo de cada análisis. Como resultado, naturalmente estarán más inclinados (y menos limitados) a ocupar todo el tiempo extra que sea necesario para asegurar que *todos* los riesgos razonablemente previsibles sean tratados apropiadamente.

Usar computadoras para conducir el proceso

El Capítulo 10 mencionaba que deberían usarse bases de datos computarizadas para almacenar y clasificar la información generada por el proceso RCM. Sin embargo, igual que con el mundo de la tecnología de la información, es fácil sucumbir a la tentación de ir más allá de eso para lo cual *deberían* usarse las computadores, y buscarle otros usos.

Por ejemplo, es tentador computarizar algoritmos RCM tales como el diagrama principal de decisión de las páginas 204 y 205. Generalmente esto se hace creando un cuadro que efectúe (digamos) la pregunta H, y estableciendo un sistema de modo tal que una respuesta "no" nos lleve a un cuadro que efectúe la pregunta H1 mientras que una respuesta "sí" nos conduzca a uno que hace la pregunta S, y así siguiendo. Esto se hace creyendo que misteriosamente dicha sucesión de cuadros de alguna manera apresurará o "modernizará" el proceso. En realidad, simplemente no hay modo de explicar que una sucesión de doce a veinte cuadros es más rápida de leer que una sola hoja de papel, de manera que usar una computadora con este criterio es retardar el proceso.

Usar una computadora en forma inapropiada para conducir el proceso también puede tener un efecto fuertemente negativo en la comprensión de RCM. Demasiado énfasis en una computadora significa que RCM comienza a ser visto como un ejercicio mecánico de llenado de una base de datos, en lugar de un análisis de las verdaderas necesidades del activo en revisión. Por esta razón el autor coincide con Smith (1993) cuando dice que no hay "programa que realice el pensamiento de ingeniería por nosotros", y que la computadora "no reemplaza la necesidad de juicio y conocimientos de ingeniería sólidos". En resumen, RCM es reflexión, no un programa de computadora.

Conclusión

Estos comentarios sugieren que el camino más seguro para lograr la mayoría o todos los beneficios positivos de RCM es aplicar el proceso en el nivel apropiado, y hacerlo así en forma regular usando grupos de personas entrenadas que representen las funciones de operaciones y mantenimiento, y que tengan un conocimiento profundo y de primera mano del equipo bajo revisión.

13.7 Desarrollo de Habilidades en RCM

RCM provee una estructura común que permite a las personas de diferentes medios lograr consenso sobre una amplia gama de temas altamente técnicos. Sin embargo, este proceso en sí mismo comprende muchos conceptos que son nuevos para la mayoría de las personas. Estas personas necesitan aprender qué son y cómo se entrelazan estos conceptos nuevos antes de poder usar el proceso exitosamente. (Algunas personas especializadas en los enfoques tradicionales del mantenimiento también necesitan olvidar bastante).

La mejor manera de asegurar que una gran cantidad de personas adquiera rápidamente las habilidades necesarias, es realizar un entrenamiento apropiado. La combinación más apropiada de cursos para la gente en distintos niveles es la siguiente:

- *personal de mantenimiento y operadores*: un curso en los principios básicos de RCM. Dicho curso debería incorporar una variedad de casos de estudio y ejercicios prácticos que permita a los participantes apreciar como la teoría trabaja en la práctica.
- *gerentes de mantenimiento, ingenieros, gerentes de operaciones, supervisores y técnicos superiores*: un curso que cubra los mismos temas que el curso de los especialistas y los operadores, pero que también explique qué debe hacerse para administrar la implementación de RCM.
- *Facilitadores*: los Facilitadores deben ser iniciados en RCM en un curso introductorio tal como los descriptos precedentemente, y luego pasar al menos diez días de entrenamiento intensivo formal antes de comenzar a trabajar con los grupos. De allí en adelante, la mayoría de los Facilitadores requieren el monitoreo de un especialista experimentado en RCM, durante un período de pocos meses, antes de que logren ser plenamente competentes en la totalidad de las 45 áreas clave de habilidad enumeradas en la parte 3 de este capítulo.

(Para acceder a una descripción de un conjunto abarcativo de cursos de entrenamiento y de soporte que cumplen con todos los requisitos precedentes, vea el sitio ***http://www.aladon.co.uk***).

14 Qué logra el RCM (Beneficios del RCM)

14.1 Midiendo el Desempeño de Mantenimiento

Como se discutió en profundidad en el Capítulo 11, con la aplicación de RCM se obtienen tres resultados tangibles, como sigue:

- Programas de mantenimiento a ser realizados por el departamento de mantenimiento.
- Procedimientos de operación revisados para los operadores de los activos.
- Una lista de áreas donde cambios de una sola vez deben ser hechos, tanto en el diseño del activo como en la manera en que es operado, de modo de manejar las situaciones donde los activos no pueden suministrar el estándar de funcionamiento deseado en la configuración actual.

Otros dos resultados menos tangibles, que fueron mencionados en el Capítulo 13, son que los participantes en el proceso aprenden mucho sobre como el activo trabaja, y también que tienden a funcionar mejor como equipo.

Alcanzar todos estos resultados requiere de mucho tiempo y esfuerzo, especialmente si RCM es aplicado como se describe en el Capítulo 13. Sin embargo, si RCM es aplicado correctamente, rinde beneficios que por lejos superan los costos involucrados. La mayoría de las aplicaciones se repagan en un período de meses, aunque algunas se han repagado en dos semanas o menos. La gran variedad de formas en que RCM se repaga son discutidas en profundidad en la parte 4 de este capítulo. Para colocar la discusión en perspectiva, primero necesitamos considerar diferentes formas en que es posible medir el desempeño de la función mantenimiento.

El desempeño de mantenimiento puede ser considerado desde dos puntos de vista bien distintos. El primero se focaliza en cuan bien el mantenimiento asegura que los activos continúen haciendo lo que sus usuarios desean que hagan. Esto es usualmente señalado como *efectividad* del mantenimiento, y es generalmente de gran interés para los usuarios ó "clientes" del servicio de mantenimiento. El segundo punto de vista se concentra en cuan bien se usan los recursos del mantenimiento. Esto es usualmente señalado como *eficiencia* del mantenimiento. Es usualmente de más interés para los gerentes que son directamente responsables del mantenimiento. Estos dos aspectos son considerados separadamente en las dos próximas secciones de este capítulo.

14.2 Efectividad del Mantenimiento

Los Capítulos 1 y 2 enfatizan que el objetivo del mantenimiento es asegurar que todo activo físico continúe satisfaciendo las funciones pretendidas hasta el estándar de funcionamiento deseado por sus usuarios. Como resultado, cualquier evaluación sobre el cumplimiento de las metas de mantenimiento debe incluir una evaluación sobre cuán bien los activos *continúan* satisfaciendo sus funciones hasta el estándar de funcionamiento deseado. Esto está influenciado por tres aspectos:

- la "continuidad" puede ser medida de varias maneras diferentes
- los usuarios tienen diferentes expectativas de diferentes funciones
- activos individuales pueden tener más de una y frecuentemente varias funciones, como explicado en el Capítulo 2.

Estos aspectos son considerados en más detalle en los siguientes párrafos.

Diferentes Maneras de Medir la Efectividad del Mantenimiento

La función principal de cualquier planta manufacturera altamente mecanizada y completamente cargada, es producir al menos tantas unidades de productos vendibles como se esperaba de ella cuando fue construida. ("Completamente Cargada" significa que está operando siete días por semana/24 horas al día y que exista un mercado listo para cada unidad que la planta pueda producir.) En este contexto, cualquier falla que reduzca la producción resulta en pérdida de ventas.

En casos como este, la medida global más simple del desempeño operacional de la planta como un todo es la *producción total del período*.

Si los usuarios sienten que la planta no está produciendo lo que debería estar produciendo en forma regular, no estarán satisfechos hasta que la situación se corrija. Hasta ese momento, los *usuarios* estarán inclinados a juzgar la efectividad en términos de producción total respecto a los objetivos. Esto debe ser reconocido cuando se establezca cualquier sistema de registro de la efectividad de mantenimiento.

No todo está necesariamente bien si la producción total alcanza el objetivo. Una planta que esté produciendo el número correcto de unidades puede aún estar experimentando problemas que afecten la seguridad, la calidad del producto, los costos operativos, la integridad ambiental, el servicio al cliente, y demás, por lo que todo esto debe ser medido y manejado adecuadamente. Hay muchas maneras en que podemos medir cuan efectivamente un activo está satisfaciendo sus funciones. Cinco de las más comunes son como sigue:

- *cuán seguido falla*. Este es el significado más ampliamente aceptado del término "confiabilidad". Es usualmente medido como "tiempo medio entre fallas" o "tasa de fallas".

- *cuánto dura*. Esto es usualmente definido como la "vida" o el "período de vida", al final del cual el ítem en consideración falla y es o bien reconstruido o descartado y reemplazado por uno nuevo. Estrictamente hablando, este fenómeno debe ser descrito como "durabilidad".
- *cuánto tiempo está fuera de servicio cuando falla*. Esto es usualmente mencionado como "tiempo de parada" o "indisponibilidad", y mide cuanto tiempo el ítem es incapaz de satisfacer la función establecida a satisfacción del usuario, en relación a la cantidad de tiempo que el usuario desea que lo haga. La indisponibilidad (o su inverso la Disponibilidad) se expresa usualmente en porcentaje.
- *qué probabilidad tiene de fallar en el próximo período*, asumiendo que sobrevivió hasta el inicio de ese período. Hemos visto que esta es la probabilidad condicional de falla. Esto puede tal vez describirse como una medida de la "dependabilidad", aunque sea solo para distinguirla de las otras tres variables. Una variación común de esta medida es la "Vida B10". El Capítulo 12 explica que es usualmente medida desde el momento que el ítem es puesto en funcionamiento, y es el período en el cual no más del 10% de los ítems pueden fallar. (En otras palabras, la probabilidad condicional de falla en dicho período es de 10%.)
- *eficiencia*. En usos normales de negocios, el término eficiencia tiene realmente dos significados muy distintos. El primero mide resultados versus entradas, mientras que el segundo mide cuan bien algo es realizado contra cuan bien debería realizarse.

Por ejemplo, en una planta generadora de energía, la eficiencia de energía mide la cantidad de energía entregada en relación con la cantidad de energía suministrada por el combustible. Dependiendo de la tecnología utilizada (carbón, gas, ciclo combinado, etc.), varía de alrededor de 35% hasta casi 58%. Sin embargo, si la planta que debería en promedio tener una eficiencia de 40% solo está promediando 38%, estará suministrando 95% de la energía que debería suministrar. En el contexto de este libro, la primer medida (40%) es un estándar de desempeño funcional. Como se explicó en el Capítulo 3, esto es usado para juzgar si el ítem ha fallado. La segunda medida (95%) es usada para juzgar la efectividad con que la organización está alcanzando el desempeño deseado en forma continuada.

"Eficiencia" también se refiere a ritmo de trabajo, y también significa eso en dos sentidos – cuan rápido un activo debería trabajar respecto al ritmo al cual podría trabajar (desempeño deseado versus capacidad inicial), y cuan rápido realmente trabaja relativo al ritmo al cual debería trabajar (desempeño real versus desempeño deseado). Hemos visto que el desempeño deseado debe ser menor que la capacidad inicial porque debe haber posibilidad para el deterioro. Por lo tanto en el contexto de este capítulo, la eficiencia compara el ritmo al cual un activo realmente trabaja con el ritmo al cual debería trabajar, no con el ritmo al cual podría trabajar.

Medidas del tipo "Eficiencia" también pueden ser usadas en una forma un poco diferente para el consumo de insumos de mantenimiento (como aceites lubricantes y aceite hidráulico) e insumos de proceso (como solventes y reactivos usados en plantas químicas y en la extracción de minerales).

Todas estas cinco medidas son válidas. Es solamente un problema de decidir cual es la más apropiada en el contexto en consideración.

Por ejemplo, si un turbogenerador tiene el más bajo costo de energía por unidad de producción ente todos los usados por una planta eléctrica, es muy probable que los usuarios quisieran tenerlo generando potencia (carga base) por el mayor tiempo posible. En términos de esta función, la más apropiada medida de la efectividad del mantenimiento es la disponibilidad. (Los operadores pueden ocasionalmente elegir operarlo a menos de su carga máxima. Ellos pueden incluso elegir pararlo completamente de tiempo en tiempo por puras razones operacionales. Bajadas de ritmo o paradas de esta naturaleza afectan la utilización del activo como opuesto a su disponibilidad. En esencia, disponibilidad mide que porcentaje del tiempo la máquina está disponible para cumplir con su desempeño requerido, mientras que la utilización mide cuánto realmente alcanza de ese desempeño.)

Por el otro lado, el generador podría ser usado solamente para satisfacer picos de demanda de energía (cargas pico). En este caso, la principal preocupación de los usuarios será que el generador entre en producción tan pronto como sea requerido, por lo tanto una medida primaria de efectividad será cuán seguido hace eso (o inversamente, cuán seguido fracasa en hacer eso, expresado por una tasa de falla).

Cuando se mide seguridad, el desempeño es usualmente medido en términos de días o número de horas hombres trabajadas entre incidentes con pérdidas de días laborables (ó fatalidades). Esta es una forma de "tiempo medio entre fallas". Medidas similares son usadas para incidentes ambientales.

En el aspecto de la calidad del producto, una tasa de descartes de (digamos) 4% puede ser visto como una medida de indisponibilidad, en el sentido que mientras la máquina está produciendo desperdicios, no está "disponible" para producir productos de primera clase. (Una tasa de desperdicios de 4% corresponde a un rendimiento de 96%).Las tasas de descartes pueden también ser expresadas como (digamos) 20 partes por millón, que es otra manera de expresar la tasa de falla. Ambas son medidas válidas de la efectividad del mantenimiento, especialmente en plantas de procesos automatizadas y altamente mecanizadas.

Expectativas Diferentes

Cada función tiene asociada consigo un único conjunto de expectativas de continuidad (confiabilidad, y/o durabilidad y/o disponibilidad y/ó dependabilidad).

Por ejemplo, dos de las funciones asociadas con la carrocería de un auto son "aislar a los ocupantes del auto de los elementos" y "verse aceptable". La mayoría de los dueños de autos esperan que la carrocería sea capaz de satisfacer la primera función a lo largo de toda la vida esperada del auto (siempre que el auto no sea un convertible o el usuario abra una puerta ó una ventana). Por otro lado, todos saben que los autos se ensucian – y entonces comienza a "verse inaceptable" – en un lapso de unos pocos días o semanas. Por lo tanto en el primer caso tenemos una

expectativa de continuidad que puede ser medida en cientos de miles de kilómetros ó en décadas, mientras que en el segundo caso, la expectativa de continuidad es medida en cientos de kilómetros ó días.

Este asunto es complicado por el hecho que la pérdida de cada función puede ser causada por más de un modo de falla, a veces docenas. Cada modo de falla tiene asociado una tasa de falla específica (o TMEF), y cada uno sacará a la función de servicio por una cantidad de tiempo que es específica a ese modo de falla. Como resultado, las características de continuidad de cualquier función serán realmente la composición de las características de continuidad de todos los modos de falla que pueden causar la pérdida de esa función.

Por ejemplo, tome la función "verse aceptable" que fue mencionada antes. Además de por la acumulación de suciedad, esta función puede ser perdida debido a oxidación y corrosión, deterioro de la pintura (pérdida de brillo), daño externo (ralladuras en un estacionamiento) y vandalismo entre otras. También podría ser aparente que algunos de estos modos de falla tienen poca o ninguna relación con el mantenimiento. Por ejemplo, el daño externo es principalmente una función de cómo este auto – o el otro vehículo involucrado – es conducido, aunque el diseño puede jugar una pequeña parte agregando protectores de goma para reducir el daño y/o para hacer más fácil y económico el reemplazar las partes dañadas. La probabilidad de vandalismo es también una función de dónde es usado el auto (el contexto operativo); por lo tanto está casi completamente fuera del control del diseñador y el mantenedor. La tasa de acumulación de suciedad es una función de dónde y cuando el auto es usado (condiciones de la calle y del clima), y es manejado por un adecuado programa de mantenimiento (lavar el auto). La corrosión y el deterioro de la pintura pueden ser influenciados fuertemente en la etapa de diseño (a pesar que también el contexto operativo – condiciones climáticas y provisión de protección – y hasta cierto punto las actividades de mantenimiento – limpieza y lavado del auto – pueden jugar una parte en moderar la severidad y frecuencia de esas fallas).

Este ejemplo nos lleva a dos importantes conclusiones:

- necesitamos una comprensión adecuada de todos los modos de falla que son razonablemente probables de causar cada pérdida de función, de modo de ser capaces de diseñar, operar y mantener un activo de tal manera que las expectativas de efectividad que tenemos de cada función sean alcanzadas.
- no es razonable dejar al mantenedor de un activo como único responsable del logro de cualquier objetivo de continuidad (confiabilidad / disponibilidad / durabilidad / dependabilidad) de cualquier activo o cualquier función de cualquier activo. El logro de estos objetivos es también una función de cómo es diseñado, construido y operado. La responsabilidad por alcanzar los objetivos asociados debe ser dividida conjuntamente entre las personas responsables de todas estas funciones. (En otras palabras, la efectividad del "mantenimiento" tal como fue definida en este capítulo no es solo una medida de la efectividad del departamento de mantenimiento.

Mide cuan efectivamente *todos* los relacionados al activo están jugando su parte en hacer lo que sea necesario para asegurar que éste continúa haciendo lo que sus usuarios desean que haga.)

Diferentes Funciones

Tal vez el más importante punto sobre la medición de la efectividad de las actividades de mantenimiento es el hecho que cada activo tiene más de una y a veces docenas de funciones. Como fue explicado antes, se asocia un único conjunto de expectativas de continuidad a cada función. Esto significa que si un activo tiene diez funciones, la efectividad con que este activo está siendo mantenido puede ser medida de (al menos) diez maneras diferentes.

Por ejemplo, consideremos como la efectividad del mantenimiento podría ser medida por el dueño de una típica estación de gasolina suburbana. Para el propósito de este ejemplo, el "activo" es el sistema de almacenaje y bombeo usado para la gasolina. En este sistema, la gasolina sin plomo es almacenada en un tanque subterráneo con una capacidad de 50000 litros. Es llenado periódicamente por un camión cisterna hasta un nivel de 48000 litros. Un interruptor de alto nivel en el tanque enciende una luz de alerta local si el tanque ha sido llenado hasta un nivel de 48500 litros, y otro interruptor de nivel enciende otra luz de alerta en la oficina principal si el nivel cae hasta 5000 litros. Una alarma de bajo nivel suena en la oficina si el nivel del tanque cae a 2000 litros, y una alarma local de último alto nivel suena si el nivel del tanque alcanza los 49000 litros. El tanque tiene doble pared para asegurar que la gasolina sea contenida en el caso de una fuga en la pared interior. Un indicador de nivel indica el nivel en el tanque.

El tanque suministra gasolina a cinco bombas. Cada bomba es encendida y apagada mediante el accionado y soltada de la manija de la tobera del surtidor. La tobera del surtidor también incorpora un interruptor de presión que desconecta la bomba cuando el tanque del vehículo es llenado hasta la punta de la tobera. Un medidor de caudal mide la cantidad de combustible suministrada cada vez que la bomba es activada y muestra el volumen y el valor del combustible suministrado al cliente. Este caudalímetro es puesto a cero cada vez que la tobera del surtidor es retornada a su soporte.

(Este sistema incluye funciones secundarias adicionales que tratan con el acceso sobre y dentro del tanque, drenajes, venteos, válvulas, facilidad de uso por parte del cliente, otras protecciones, apariencia y demás. Esto sería también listado en una situación real. Sin embargo, para el propósito de este ejemplo, nosotros solo consideraremos las funciones descriptas antes.) Sobre esta base, la lista de funciones sería la que sigue:

- bombear entre 25 y 40 litros/minuto de gasolina al vehículo
- indicar el volumen y el valor del combustible suministrado al cliente con un error de 0,03% del volumen/valor real
- detener la bomba a solicitud del cliente o cuando el tanque de combustible del cliente esté lleno
- contener la gasolina
- almacenar entre 2000 y 48000 litros de gasolina
- encender una luz de alerta en la oficina principal si el nivel del tanque cae a 5000 litros
- encender una luz de alerta local si el nivel del tanque alcanza los 48500 litros

- sonar una alarma en la oficina principal si el nivel del tanque cae por debajo de 2000 litros
- sonar una alarma si el nivel del tanque alcanza 49000 litros
- contener el contenido del tanque en el caso de una fuga
- indicar el nivel de combustible en el tanque con un error de 0,05% del nivel real

Cuando defina la efectividad del mantenimiento de este sistema, el dueño de la estación de gasolina tendrá diferentes criterios para cada una de las funciones mencionadas. Por ejemplo:

- Función 1: bombear entre 25 y 40 litros/minuto de gasolina al vehículo.

Esta función puede fallar de tres formas con tres conjuntos de consecuencias bien diferentes, por lo que cada falla funcional necesita ser considerada en sus propios méritos, como sigue:

- Falla funcional A: incapaz de bombear nada: Obviamente, si la bomba no está trabajando, no puede ser usada para bombear gasolina. Sin embargo hay cinco bombas en la estación por lo que el nivel de disponibilidad requerido depende del patrón de demanda. Por ejemplo, el dueño de la estación puede decirnos que el "rara vez" tiene las cinco bombas en uso al mismo tiempo – tan poco que podemos ignorar esa posibilidad. Podría decirnos también que cuatro bombas se usan en simultáneo por no mas de una hora al día, y además que nunca por más de diez minutos cada vez. Si cada bomba tiene una disponibilidad promedio de 95%, dos bombas estarán fuera de servicio simultáneamente por no mas de 2% del tiempo. En otras palabras, cuatro bombas estarían disponibles 98% del tiempo, mientras que hay una demanda de cuatro bombas el 4% del tiempo. Bajo estas circunstancias, solo una pequeña fracción de los clientes necesitarán esperar por gasolina, y en ese caso no por mucho tiempo. Esto puede tentar al dueño a aceptar una disponibilidad del 95%. (Si el regularmente tuviera cinco o más clientes queriendo comprar gasolina al mismo tiempo, el esperaría una disponibilidad más alta. Pero le costará algo más lograrla, especialmente si él debe pagar un premio por rápida respuesta cuando llama a los técnicos que reparan las fallas.)
- Falla funcional B: bombea menos de 25 litros/minuto: Algunos clientes regulares encontrarían a las bombas lentas suficientemente irritantes como para irse a comprar a otro lado, especialmente si hay alternativas más rápidas cerca. Consecuentemente, el dueño es probable que quiera que todas sus bombas bombeen al ritmo requerido en "todo momento – o al menos lo más cercano a todo momento que sea posible lograr". Esto podría significar que (digamos) 99,8% del tiempo que la bomba no esté de algún modo fuera de ritmo – sea otra forma de "disponibilidad".
- Falla funcional C: bombea más de 40 litros/minuto: Si la bomba bombea demasiado rápido, es probable que genere suficiente contra presión para que continuamente dispare el interruptor de presión de "tanque lleno" de la tobera del surtidor. Los clientes tendrán que aprender a reducir el ritmo de llenado no apretando la manija demasiado, lo que algunos clientes regulares podrían encontrar también suficientemente irritante para causar que se vayan a comprar a otro lado. Como resultado, el dueño es probable que diga que no querría que este estado de falla ocurra "muy seguido". El podría entonces cuantificar su expectativa como una tasa de falla – digamos no más de una vez en cincuenta años en cualquiera de las bombas.

- Función 2: indicar el volumen y valor del combustible suministrado a un cliente con un error de 0,03% del volumen/valor real: Esta función puede fallar de dos maneras, como sigue:
  - Falla funcional A: indica que más del 0,03% en menos del combustible real se ha suministrado: Si esto ocurre, el dueño de la estación aparecería vendiendo menos combustible del que realmente vende, por lo que perdería dinero. La falla se hace evidente después de un tiempo, porque la tasa de combustible vendido respecto al recibido comenzara a disminuir. Por lo tanto, el dueño querría probablemente procurar una tasa de falla baja – digamos no mas de una en 1000 años en cualquiera de las bombas. (Si el indicador falla completamente, mostrará que nada fue suministrado. Si esto pasa, un cliente con suerte podría obtener un tanque de combustible gratis, luego el gerente de la estación sacaría de servicio la bomba hasta que el problema sea rectificado.)
  - Falla funcional B: indica que más del 0,03% en más del combustible real ha sido suministrado: Si esto pasa y llega a la atención de los clientes o las autoridades de normas de comercio (probablemente ambos), el dueño de la estación estaría en serios problemas. Muchos de los clientes lo verían como un estafador y se irían a comprar a otro lugar. Las autoridades probablemente lo sancionen y dependiendo de la severidad de la discrepancia, podrían incluso revocarle su licencia comercial (poniéndolo esto fuera del negocio). Ante cualquier cosa de estas que ocurra, su posición en la comunidad quedaría comprometida. La severidad de estas consecuencias lo llevarían a buscar una muy baja tasa de falla, digamos una vez en 50000 años en cualquiera de las bombas. (Que esto sea alcanzable o no es otro problema.)
- Función 3: parar la bomba a solicitud del cliente o cuando el tanque de combustible del cliente esté lleno. Esta función también puede fallar de tres maneras diferentes, como sigue:
  - Falla funcional A: falla en parar a solicitud del cliente: Si la bomba continúa bombeando después que el cliente soltó la manija, la contrapresión al llenarse el tanque activará el interruptor de presión y la bomba parará. Como resultado, el cliente terminará con mucho más combustible en su tanque de lo que él o ella deseaban. Esto seguramente lleve a una discusión con el cliente sobre cuánto debe pagar y posiblemente a la pérdida del cliente. Como resultado el dueño de la estación probablemente requiera una tasa de falla baja, digamos una vez en 1000 años en cualquier bomba.
  - Falla funcional B: falla en parar cuando el tanque está lleno: Muchos clientes confían en el interruptor de presión para indicarles que el tanque está lleno. Si falla en hacer eso, la bomba parará cuando el cliente suelte la manija. Sin embargo, es probable que el tanque se desborde sobre los zapatos del cliente antes que él o ella sean capaces de reaccionar, llevando a un montón de molestias y tal vez hasta una demanda por compensaciones. Esto llevará al dueño de la estación a desear una tasa de falla baja – digamos también una vez en 1000 años para cualquier bomba.
  - Falla funcional C: ambos interruptores son incapaces de parar la bomba: Si el interruptor de presión y la manija ambos fallan en parar la bomba, seguirá bombeando gasolina en todo el piso hasta que alguien corte la corriente en el

interruptor principal del tablero. Esto creará un peligroso riesgo de incendio, por lo cual el dueño de la estación deseará una tasa de falla muy baja – digamos una vez en 1000000 de años. (Esto es alcanzable si cada interruptor alcanza 1 en 1000 independientemente.)

- Función 4: contención: Cuando se le pregunte por esta función, el dueño de la estación podría decir algo así como "tuvimos una fuga de combustible en el sistema de gasolina en los últimos diez años – y eso fue suficiente." Aquí el usuario está midiendo la efectividad en términos de tasa de falla. Cuando se le plantee, podría aceptar una tasa de (digamos) una vez en 500 años para una "pequeña" fuga, que él podría elegir definir tan pequeña como 5 litros por hora. (Es altamente improbable que alguien mida contención en términos de disponibilidad, porque (digamos) 99% de disponibilidad significa que el sistema podría estar fugando 1% del tiempo – del orden de 800 horas en diez años. Inclusive 99,9% aún significa que podría fugar 80 horas. Claramente esto no tiene sentido.)
- Función 5: almacenar entre 2000 y 48000 litro de gasolina. Esta función también puede fallar de tres maneras diferentes, cada una de las cuales debe ser considerada también en forma separada, como sigue:
  - Falla funcional A: el nivel cae debajo de 2000 litros: Basado en patrones normales de demanda, se realizan nuevos pedidos de gasolina cuando el nivel del tanque alcanza 5000 litros, y nos han informado que prácticamente siempre entregan antes que el nivel alcance los 2000 litros. Si el nivel del tanque desciende por debajo de los 2000 litros, existen grandes posibilidades que el tanque se vacíe, provocando la pérdida de ventas para la estación. Como resultado, el gerente de la estación apura la entrega si el nivel cae de 2000 litros (como indicado por la alarma de bajo nivel). El gerente dijo que debe apurar entregas una vez al año, lo cual es lo "apenas aceptable". Aquí él está juzgando la efectividad en términos de tasa de falla. (Notar que este estado de falla es causado por el aumento de la demanda y/o la entrega lenta. No tiene nada que ver con el departamento de mantenimiento en el sentido clásico. Sin embargo, el manejarse con esta falla puede ser visto como "mantenimiento" porque estamos "causando que el negocio continúe".)
  - Falla funcional B: el nivel sube sobre los 48000 litros: El nivel del tanque solo podría subir sobre los 48000 litros si el conductor del camión de gasolina no esta prestando atención al indicador de nivel del tanque mientras llena el tanque o si el indicador de nivel ha fallado. En ambos casos la lámpara de aviso se encenderá al alcanzar los 48500 litros. Nos han dicho que esto sucede "una vez cada seis meses" – otra tasa de falla que la gente involucrada dice que aceptaría.
  - Falla funcional C: el tanque contiene algo distinto de la gasolina: El tanque solo puede contener algo distinto que gasolina si fue cargado con algo distinto – (digamos) diesel. Si esto pasa, los clientes podrían llenar sus tanques con el combustible equivocado y causar serios daños a sus motores. El dueño de la estación considera que el resultado de la mala publicidad y los reclamos por daños podrían sacarlo del negocio, por lo que él desearía que esto no pasara en absoluto. Cuando se le recordó que "nunca" es un ideal inalcanzable, el decidió que aceptaría una tasa de falla de (digamos) una vez en 100000 años.

- Función 6: encender una luz local de aviso si el nivel cae a 5000 litros. El gerente de la estación usualmente controla el nivel en todos los tanques de combustible en forma diaria para dar seguimiento al consumo, y ordena más combustible cuando el nivel alcanza los 5000 litros. La luz de aviso de bajo nivel sirve de recordatorio por si el indicador de nivel falla o si hay un pronunciado aumento de demanda entre lecturas del nivel. Esta luz se necesita aproximadamente una vez cada dos años (M_{GIDO}=2 años). Si no trabaja cuando se lo solicita, la alarma de bajo nivel sonará cuando el nivel caiga hasta los 2000 litros. Si un pedido inicial es efectuado en esta etapa tardía, el tanque muy probablemente quede vacío y la estación quedará sin combustible por varias horas. El dueño dice que aceptará un tiempo medio entre ocurrencias de esta falla múltiple (M_{FM}) de 400 años. A la luz de ésta expectativa la fórmula en la página 120 nos dice que la máxima indisponibilidad que la estación puede tolerar para la luz de aviso de bajo nivel es M_{GIDO}/M_{FM} = 2/400 = 0,5%. Esto significa que la luz de aviso de bajo nivel está siendo mantenida efectivamente si su disponibilidad permanece sobre 99,5%.
- Función 7: encender una luz local de aviso si el nivel sube hasta 48500 litros. La luz de aviso de alto nivel tiene el respaldo de una alarma sonora, por lo tanto siguiendo una lógica similar al ejemplo anterior, el dueño llegaría a la conclusión que sería aceptable una disponibilidad de 97,5% para esta luz de aviso.
- Función 8: sonar una alarma si el nivel del tanque cae debajo de 2000 litros. Si el nivel del tanque cae hasta los 2000 litros y la alarma de bajo nivel no suena, el pedido no es apurado. Nos han dicho que en estas circunstancias, existe un 50% de posibilidades que el tanque se quede vacío antes que el camión cisterna de combustible llegue, y la estación estará sin gasolina por aproximadamente una hora en promedio en dichas circunstancias. Esto llevará al dueño de la estación a no aceptar esta falla múltiple (el nivel baja hasta 2000 litros cuando la alarma de bajo nivel falló) más de "una vez en cien años" (M_{FM} = 100 años). Como fue discutido antes, M_{GIDO} es un año, por lo tanto la estación puede tolerar una indisponibilidad máxima de la alarma de bajo nivel de M_{GIDO}/M_{FM} = 1/100 = 1%. A la luz de este objetivo, la alarma de bajo nivel está siendo mantenida efectivamente si su disponibilidad permanece sobre 99%.

Función	Falla Funcional	Medida de Efectividad		Comentarios
		Disponibilidad	TMEF	
1	A	≥ 95%		Cada bomba
	B	≥ 99.8%		Cada bomba
	C		≥ 50 años	Cada bomba
2	A		≥ 1 000 años	Cada bomba
	B		≥ 50 000 años	Cada bomba
3	A		≥ 1 000 años	Cada bomba
	B		≥ 1 000 años	Cada bomba
	C		≥ 1 000 000 años	Cada bomba
4	A		≥ 500 años	Todo el sistema
5	A		≥ 1 años	Tanque
	B		≥ 6 meses	Tanque
	C		≥ 100 000 años	Tanque
6	A	≥ 99.5%		Luz de aviso de bajo nivel
7	A	≥ 97.5%		Luz de aviso de bajo nivel
8	A	≥ 99%		Alarma de bajo nivel

Una lógica similar puede ser utilizada para determinar las disponibilidades de las funciones 9, 10 y 11 en el ejemplo anterior. También podría ser usada para determinar la medida de efectividad de las funciones de este sistema no incluidas en la lista anterior. Sin embargo, para las funciones discutidas, las expectativas de efectividad del dueño de la estación de gasolina pueden ser resumidas como sigue:

El ejemplo ilustra diversos puntos importantes sobre la medida de la efectividad del mantenimiento, como sigue:

- cuando estamos midiendo desempeño del mantenimiento, no estamos midiendo efectividad de *equipamientos* – estamos midiendo efectividad *funcional*. La distinción es importante, porque cambiando el énfasis desde los equipos a sus funciones se ayuda a las personas – mantenedores en particular - a focalizarse en lo que el equipo *hace* más que en lo que el equipo *es*.
- Hasta los activos más simples tienen una sorprendente gran cantidad de funciones. Cada una de estas funciones tiene un único conjunto de expectativas de desempeño. Antes de que sea posible desarrollar un sistema de reporte de efectividad del mantenimiento completo e integral, necesitamos saber cuales son estas funciones, y debemos estar preparados a establecer que piensan *los usuarios* que es aceptable o no en cada caso.

  Esto significa que no es posible listar una sola afirmación de continuidad para un activo completo, tal como "fallar no más de una vez cada dos años" ó "durar al menos once años". Necesitamos ser específicos sobre qué funciones deben no ser perdidas más de una vez en dos años, o cuál falla funcional no debe ocurrir antes de once años.
- Hay muy seguido una tendencia a focalizarse muy fuertemente en las funciones primarias cuando se evalúa la efectividad del mantenimiento. Esto es un error, porque en la práctica funciones secundarias aparentemente triviales muy frecuentemente encierran amenazas más grandes para la organización en caso de falla que las funciones primarias. Como resultado, *cada* función debe ser considerada al establecer medidas y objetivos de efectividad del mantenimiento.

  Por ejemplo, las funciones primarias listadas para el sistema de gasolina son bombear y almacenar combustible (Funciones 1 y 5 respectivamente). Sin embargo, dos de las más altas expectativas del dueño están centradas alrededor de dos fallas funcionales secundarias – 2-B (una falla que podría ponerlo fuera del negocio) y 3-C (una falla con serias implicaciones de seguridad).

Estándares de Desempeño Múltiples y el EGE

Si una función incluye múltiples estándares de desempeño, es tentador intentar desarrollar una única medida compuesta de efectividad para toda la función. Por ejemplo, la función primaria de una máquina desempeñando

una operación de conversión en una instalación de manufactura usualmente incorpora tres estándares de desempeño, como sigue:

- debe trabajar
- debe trabajar al ritmo correcto
- debe producir la calidad requerida.

La efectividad con que continúe alcanzando cada una de estas expectativas es medida por la disponibilidad, la eficiencia y el rendimiento. Esto sugiere que una medida compuesta de la efectividad con que esta máquina está satisfaciendo su función primaria en forma continua puede ser determinada multiplicando estas tres variables, como sigue:

efectividad global = disponibilidad x eficiencia x rendimiento

Por ejemplo, la función primaria de una máquina herramienta podría ser:

- Mecanizar 101 ± 1 piezas por hora a una profundidad de 11 ± 0,1 mm.

Si esta máquina está fuera de servicio por (digamos) 5% del tiempo, su disponibilidad es 95%. Si solo es capaz de producir 96 piezas por hora cuando está operando, su eficiencia es 96%. Si 2% de su producción son rechazos, su rendimiento es 98%. Aplicando la fórmula anterior da una efectividad global de 0,95x0,98x0,96 = 0,894 ó 89,4%.

Esta particular medida compuesta es generalmente mencionada como "efectividad global de equipos" o EGE. Medidas compuestas de esta clase son populares pues permiten a los usuarios evaluar la efectividad del mantenimiento de una vez. Ellas también parecen ofrecer una base de comparación para desempeños de activos similares (el llamado "benchmarking"). Sin embargo, estas medidas realmente sufren de numerosas desventajas, como sigue:

- el uso de tres variables en la misma ecuación implica que las tres tienen el mismo peso. Esto puede no ser el caso en la práctica.

Por ejemplo, en el ejemplo de la máquina herramienta anterior, las piezas pueden tener un valor de trabajo en proceso de $200 en ese punto del proceso. La organización podría estar logrando un beneficio bruto de $100 sobre el precio del producto final de (digamos) $500. Esto significa que 1% de tiempo de parada ó 1% de pérdida de eficiencia le cuesta a la compañía una venta por hora – una pérdida de beneficios de $100 por hora. Por otro lado, 1% de rechazo significa que la organización debe descartar 1 pieza por hora, representando $200 (valor del trabajo en proceso) sumado a la pérdida de beneficio de $100, lo que implica una pérdida total de $300 por hora. Consecuentemente, la máquina en el ejemplo anterior está perdiendo:

(5x100) + (2x100) + (2x300) = $1500 por hora

debido a tiempo de parada, operación lenta y rechazos. Sin embargo, una máquina idéntica produciendo el mismo producto podría sufrir de 4% de tiempo de parada, operar a 98% de su velocidad establecida y producir 4% de rechazos. En este caso la

"efectividad global" sería 0,96x0,98x0,96 = 0,903 ó 90,3%. Esto es aparentemente un mejor desempeño que la primera máquina. Sin embargo esta máquina está perdiendo:

(4x100) + (2x100) + (4x300) = $1800 por hora

que es realmente un desempeño significativamente peor que la primera máquina!

- Es posible para muchos activos operar muy rápido tanto como muy lento. Sobrepasar la velocidad de un activo podría aumentar la EGE tal como se la definió antes, lo que significa que es posible obtener una aparente mejora del desempeño "global" forzando el activo a operar en un estado de falla.

  Por ejemplo, un estándar de funcionamiento primario de la máquina herramienta era que debería producir 101±1 piezas por hora. El "+1" significa que si la máquina produce más de 102 unidades por hora, está en un estado de falla (tal vez porque comienza a ir más rápido que un proceso de ensamble que es cuello de botella, llevando a la aparición de un stock de productos en proceso, o porque yendo muy rápido provoca que la herramienta de corte se sobrecaliente y dañe las piezas, o porque lleve a un desgaste excesivo de la herramienta.) Sin embargo, si opera a 103 piezas por hora, la aparente "eficiencia" es 102%. Esto aumenta la "efectividad global de equipo" tal como fue definida antes, al tiempo que la máquina está realmente en un estado de falla. Esto es claramente un sinsentido.
- la EGE tal como se la definió antes solo es aplicable a la función primaria de cualquier activo. Esto conduce a error, porque como en el caso del sistema de almacenaje de gasolina, cada activo – máquinas herramientas incluidas – tienen muchas más funciones que la función primaria, y cada una de ellas tendrá su única expectativa de desempeño. Consecuentemente, el EGE no es una medida de la efectividad "global" en absoluto, sino sólo una medida de la efectividad con que la función primaria del activo está siendo realizada.
- Finalmente, por las razones discutidas antes, empresas con mantenimiento realmente orientado al usuario necesitan cambiar su atención de efectividad de "equipos" a efectividad de funciones. Por lo tanto si medidas de este tipo deben ser usadas, es mucho más preciso referirse a ellas como medidas de "efectividad de funciones primarias" (EFP) más que "efectividad global de equipos".

Conclusión

Las dos más importantes conclusiones que surgen de la parte 2 de este capítulo son:

- cuando se evalúa la contribución que el mantenimiento está haciendo al desempeño de cualquier activo, la efectividad con que cada función está siendo realizada debe ser medida en forma continua. Esto requiere una clara comprensión de todas las funciones del activo, junto con una clara comprensión de que significa cuando se dice que está "fallado".
- el último árbitro de la efectividad es el usuario (cuyas expectativas deben ser realistas). Lo que los usuarios esperan variará – bastante legítimamente – de función a función y de activo a activo, dependiendo del contexto operativo.

14.3 Eficiencia del Mantenimiento

Como se mencionó al comienzo de este capítulo, la eficiencia del mantenimiento mide cuan bien la función mantenimiento está usando los recursos a su disposición. El gran número de formas en que esto puede ser hecho es generalmente bien entendido, por lo que sólo serán discutidos brevemente en esta parte de este capítulo para presentar el tema completo.

Las medidas de eficiencia pueden ser agrupadas en cuatro categorías. Ellas son: *costos de mantenimiento, mano de obra, repuestos y materiales, planificación y control.*

Costos de mantenimiento

Los costos referidos en esta parte de este capítulo son los costos directos de mantenimiento: mano de obra, materiales y contratistas, como opuestos a los costos indirectos asociados con un pobre desempeño de los activos. Los últimos aspectos serán discutidos en la Parte 3 de este capítulo.

En muchas industrias, el costo directo de mantenimiento es hoy el tercer elemento más alto de los costos operativos, atrás de materias primas y mano de obra de producción o energía. En algunos casos ha subido hasta segundo e incluso primer lugar. Como resultado, el control de estos costos se ha convertido en una prioridad principal.

Algunas industrias dan oportunidad para reducciones substanciales de los costos directos de mantenimiento, especialmente aquellas cuyos procesos incluyen tecnologías estables o maduras y/o que tienen un gran legado de pensamiento de segunda generación incluido en sus prácticas de mantenimiento. Sin embargo, en otras industrias, especialmente aquellas que están recientemente mecanizando o automatizando sus procesos a un ritmo significativo, el volumen de trabajo de mantenimiento a ser hecho está frecuentemente aumentando a tal ritmo que los costos de mantenimiento probablemente *aumenten* en términos absolutos en los próximos diez años. Como resultado, se debe tener cuidado de evaluar el ritmo y la dirección del cambio tecnológico antes de comprometerse a substanciales reducciones de costos totales de mantenimiento en el largo plazo.

Las formas más comunes en que los costos de mantenimiento son medidos y analizados son como sigue:

- Costo total de mantenimiento (real y presupuestado)
  - para la planta entera
  - para cada unidad de negocios
  - para cada activo o sistema
- Costos de mantenimiento por unidad de producción
- Tasa de gastos de materiales versus mano de obra.

Mano de obra

Los costos de mano de obra de mantenimiento típicamente son entre un tercio y dos tercios del total de los costos de mantenimiento, dependiendo de la industria y los niveles de beneficios sociales en el país considerado. En este contexto, los costos de mano de obra de mantenimiento deben incluir gastos de mano de obra contratada (la cual es frecuentemente—erróneamente—agrupada bajo "repuestos y materiales" porque es externa). Cuando se considera la mano de obra de mantenimiento, es también importante no cometer el error común de tratar el trabajo de mantenimiento realizado por operadores como un costo cero "porque los operadores están allí de todos modos". Al usar operadores para estas tareas, la organización igualmente está dedicando recursos al mantenimiento, y los costos deben ser registrados de acuerdo a ello.

Algunas formas comunes de medir y analizar la eficiencia de la mano de obra de mantenimiento son las siguientes:

- Costos de mano de obra de mantenimiento (total y por unidad de producción)
- Productividad del tiempo (relación del tiempo desarrollando tareas específicas al tiempo total por el cual se paga expresado como porcentaje)
- Horas extras (horas extras totales y como porcentaje de las horas normales)
- Cantidad de horas totales y en porcentaje dedicadas a diferentes categorías de trabajos (tareas proactivas, acciones a falta de y modificaciones, y subconjuntos de estas categorías)
- Lista de espera (por número de órdenes de trabajo y por horas estimadas de tareas pendientes)
- Relación de gastos en contratistas de mantenimiento a gastos de mano de obra propia de mantenimiento.

Repuestos y materiales

Repuestos y materiales normalmente incluye la porción de gastos de mantenimiento que no va bajo el encabezado de "mano de obra". Cuan bien son gestionados se mide y analiza usualmente de las siguientes maneras:

- Gastos totales en repuestos y materiales (totales y por unidad de producción)
- Valor total de repuestos en almacén
- Rotación de inventarios (valor total de repuestos y materiales en almacén dividido por el gasto anual en estos ítems)
- Nivel de servicio (porcentaje de los ítems en inventario que están en almacén cuando llega una solicitud)
- Valores absolutos y relativos de diferentes tipos de inventario (consumibles, repuestos activos, repuestos "de seguridad", inventario muerto).

Planificación y control

Cuan bien se planifican y controlan las actividades de mantenimiento afecta todos los otros aspectos de la efectividad y eficiencia del mantenimiento, desde la utilización global de mano de obra de mantenimiento hasta la duración de las paradas individuales. Medidas típicas incluyen:

- Horas totales de tareas de mantenimiento predictivo / preventivo / búsqueda de fallas programadas por período
- Las horas anteriores como porcentaje de las horas totales
- Porcentaje de las tareas anteriores completadas según lo planeado
- Horas trabajadas según plan versus horas trabajadas no planeadas
- Porcentaje de trabajos para los que fueron estimadas duraciones
- Precisión de las estimaciones (horas estimadas versus horas reales para los trabajos que fueron estimados).

Algunas de estas medidas de eficiencia son útiles para tomar decisiones inmediatas o iniciar acciones de gestión de corto plazo (gastos contra presupuestos, productividad del tiempo, índices de cumplimiento de programa, lista de espera). Otras son muy útiles para analizar tendencias y comparar desempeños con plantas similares de modo de planificar acciones correctivas de largo plazo (costos de mantenimiento por unidad de producción, niveles de servicio e índices en general). Juntas, ellas son de gran ayuda para focalizar la atención en que debe ser hecho para asegurar que los recursos de mantenimiento sean usados lo mas eficientemente posible.

La eficiencia de mantenimiento es también muy fácil de medir. Los aspectos a los que se refiere están usualmente bajo el control directo de los gerentes de mantenimiento. Por estas dos razones, hay con frecuencia una tendencia en estos gerentes a prestar mucha más atención en la eficiencia y no suficiente en la efectividad del mantenimiento. Esto es muy desafortunado, porque los aspectos discutidos bajo el encabezado de efectividad del

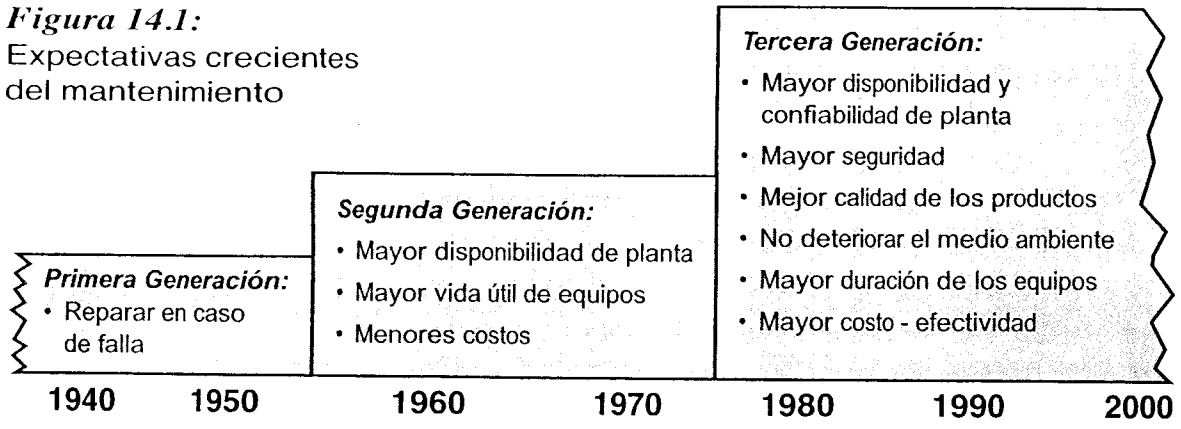


Figura 14.1:
Expectativas crecientes del mantenimiento

mantenimiento usualmente tienen un impacto mucho mayor en el estado global físico y financiero de la organización que los discutidos bajo la eficiencia de mantenimiento. Los gerentes de mantenimiento verdaderamente orientados al "cliente", deben estar atentos a esto. Como la Parte 4 de este capítulo explica, la mayor fortaleza del RCM es el alcance con que los ayuda a realizar esto.

14.4 Qué logramos con RCM

La figura 1.1 en el Capítulo 1, reproducida como Figura 14.1, muestra como las expectativas de la función mantenimiento fueron evolucionando en los últimos cincuenta años.

El uso de RCM ayuda a satisfacer todas las expectativas de la Tercera Generación. El alcance con que realiza esto esta resumido en los siguientes párrafos, comenzando con la seguridad y la integridad ambiental.

Mayor Seguridad e Integridad Ambiental

RCM contribuye a la mayor seguridad y protección ambiental de las siguientes formas:

- *la sistemática revisión de las implicancias de seguridad y ambientales de cada falla evidente antes de considerar los aspectos operacionales* significa que la seguridad y la integridad ambiental se convierten – y son vistas en consecuencia – en prioridades principales del mantenimiento.
- desde el punto de vista técnico, *el proceso de decisión dicta que las fallas que pueden afectar la seguridad o el ambiente* ***deben*** *ser manejadas* de algún modo – simplemente no se tolera la inacción. Como resultado, las tareas son seleccionadas y pensadas para reducir todos los riesgos de seguridad y ambientales del equipo a un nivel aceptable, o eliminarlos completamente. El hecho que estos dos aspectos sean manejados en grupos que incluyen tanto expertos técnicos como representantes de las "víctimas probables" significa que son también tratados en forma realista.
- el enfoque estructurado de los sistemas de protección, especialmente el concepto de función oculta y el ordenado enfoque de la búsqueda de fallas, lleva a substanciales mejoras en el mantenimiento de dispositivos de protección. Esto *reduce significativamente la probabilidad de fallas múltiples* que tienen serias consecuencias. (Esto es tal vez la más poderosa característica del RCM. Usándola correctamente se reduce significativamente el riesgo de hacer negocios.)
- involucrando grupos de operadores y mantenedores directamente en el análisis los hace más sensibles a los riesgos reales asociados con sus

activos. Esto los hace *menos propensos a cometer errores peligrosos*, y *más proclives a tomar las decisiones correctas cuando las cosas realmente van mal.*

- La *reducción global en el número y frecuencia de las tareas cíclicas* (especialmente tareas invasivas que perturban sistemas básicamente estables) reduce el riesgo de fallas críticas que ocurren tanto cuando el mantenimiento se está realizando como inmediatamente después de la puesta en marcha.

Este aspecto es particularmente importante si consideramos que el mantenimiento preventivo jugó un rol en dos de los tres peores accidentes en la historia industrial (Bhopal, Chernobyl y Piper Alpha). Uno fue causado directamente por una intervención de mantenimiento preventivo que estaba siendo realizada en ese momento (limpiando un tanque lleno de metil-isocianato en Bhopal). En Piper Alpha, una infortunada serie de incidentes y descuidos podría no haberse convertido en una catástrofe si una válvula de seguridad crucial no hubiera sido removida para mantenimiento preventivo en ese momento.

Como se mencionó en la Parte 2 de este capítulo, la forma más común de seguir el desempeño en áreas de seguridad e integridad ambiental es registrar el número de incidentes que ocurren, típicamente registrando el número de accidentes con pérdida de días por millón de horas hombre en el caso de la seguridad, y el número de excursiones (incidentes donde una norma o reglamento es superada) por año en el caso ambiental. Al tiempo que el objetivo final en ambos casos es usualmente cero, el objetivo de corto plazo es siempre mejorar el registro previo.

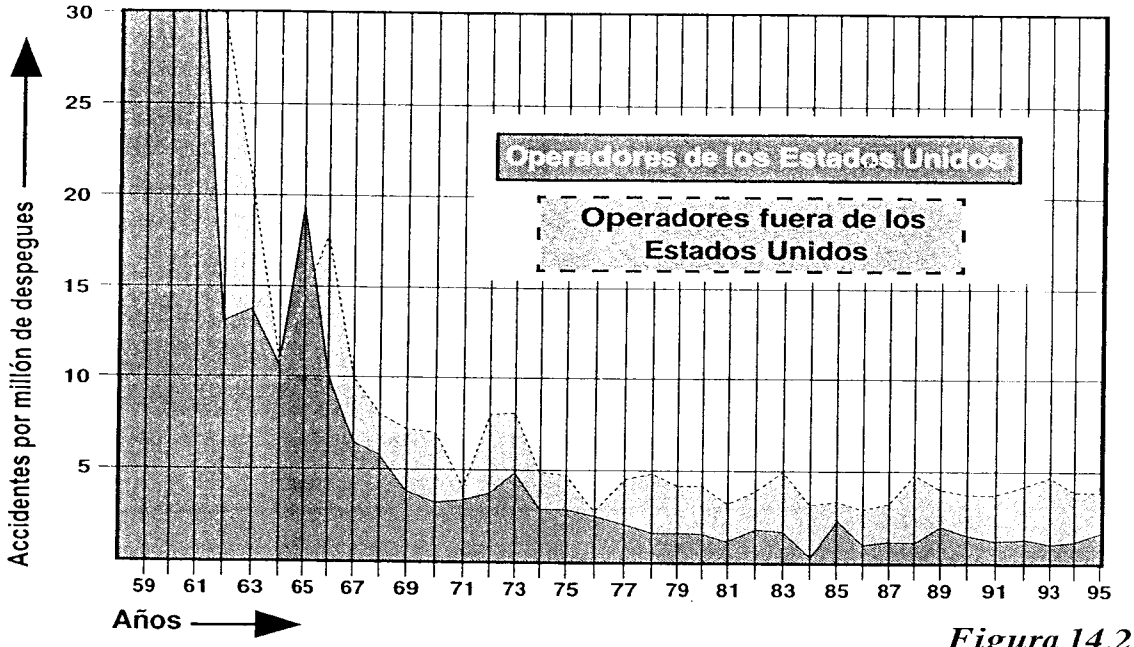


Figura 14.2:
Seguridad en la industria de la aviación civil Fuente: C A Shifrin: "La Seguridad en la Aviación Toma el Escenario Central en Todo el Mundo" Semana de la Aviación y la Tecnología Espacial: Vol 145 N° 19: páginas 46 – 48

Para suministrar una indicación de lo que ha alcanzado RCM en el campo de la seguridad, la Figura 14.2 muestra el número de accidentes por millón de despegues registrados cada año en la industria de aviación civil comercial durante el período de desarrollo de la filosofía RCM (excluyendo accidentes causado por sabotaje, acción militar o turbulencia). El porcentaje de estos accidentes que fueron causados por falla de equipo también decayó. Muchas de la mejoras de confiabilidad son por supuesto debidas al uso de mejores materiales y mayor redundancia, pero la mayoría de esa mejoras fueron desarrolladas al darse cuenta que el mantenimiento por si solo no podía obtener el nivel de desempeño requerido del activo tal como estaba configurado entonces. Como se explicó en el Capítulo 12, esto cambió la atención de una fuerte confianza en los mantenimientos de tiempo fijo en los 1960's a hacer todo lo necesario para evitar o eliminar las consecuencias de las fallas, sean estos mantenimientos o rediseños (la piedra angular de la filosofía RCM). También redujo el número de accidentes que hubieran podido ser causados por intervenciones de mantenimiento inapropiadas.

Mayor Disponibilidad y Confiabilidad de Planta

El alcance de la mejora de desempeño claramente depende del nivel de desempeño inicial. Por ejemplo, un proceso que está alcanzando 95% de disponibilidad, tiene menos potencial de mejora que otro que está actualmente alcanzando solo 85%. Sin embargo, si se aplica correctamente, el RCM alcanza mejoras significativas sin importar el punto de partida.

Por ejemplo, la aplicación de RCM ha contribuido a lo siguiente:

- un 16% de aumento en la producción total de los activos existentes en una planta procesadora de lácteos que trabaja 24 horas al día, 7 días a la semana. Esta mejora fue alcanzada en 6 meses, y la mayoría del mismo fue atribuido a la exhaustiva revisión RCM realizada durante este periodo.
- una draga lineal móvil de 300 Ton en una mina de carbón de rajo abierto, cuya disponibilidad creció del 86% al 92% en seis meses.
- un horno de gran capacidad en una acería que alcanzó 98% de disponibilidad en sus primeros dieciocho meses de operación contra una expectativa de 95%.

El desempeño de la planta se mejora reduciendo el número y la severidad de las fallas no anticipadas que tengan consecuencias operacionales.
El proceso RCM ayuda a conseguir esto de la siguiente forma:

- *la revisión sistemática de las consecuencias operacionales de cada falla* que no haya sido tratada ya como riesgo de seguridad, junto con el criterio estricto usado para evaluar la efectividad de las tareas, aseguran que solo las tareas mas efectivas son seleccionadas para manejar cada modo de falla.
- el énfasis puesto en las tareas a condición ayuda a asegurar que *las fallas potenciales sean detectadas antes que se conviertan en fallas funcionales*. Esto ayuda a reducir las consecuencias operacionales de tres formas:
  - los problemas pueden ser corregidos en un momento en que la parada de la máquina no tenga efecto para las operaciones

- es posible asegurar que todos los recursos necesarios para reparar la falla estarán disponibles con anterioridad, lo que acorta la parada
- la corrección sólo se lleva a cabo cuando el activo realmente la necesita, lo cual extiende el intervalo entre intervenciones correctivas. Esto por tanto significa que el activo deberá ser sacado de servicio menos seguido.

Por ejemplo, el ejemplo referente a neumáticos de la página 134 muestra que los neumáticos necesitan ser sacados de servicio 20% menos seguido para recapado si se usa el mantenimiento a condición en lugar del reacondicionamiento cíclico. En este caso el efecto sobre la disponibilidad del vehículo sería marginal, pues sacar un neumático y reemplazarlo por uno nuevo puede ser hecho muy rápidamente. Sin embargo, en casos donde las acciones correctivas requieran excesivo tiempo de parada, la mejora en disponibilidad podría ser sustancial.

- relacionando cada modo de falla a la falla funcional correspondiente, la hoja de información provee una herramienta para *diagnósticos de falla rápidos*, que nos lleva a *tiempos de reparación más cortos*.
- El ejemplo previo sugiere que el mayor énfasis en el mantenimiento a condición *reduce la frecuencia de las grandes paradas*, con el correspondiente incremento a largo plazo de la disponibilidad. En suma, una lista completa de todos los modos de falla que son razonablemente probables junto con un desapasionado estudio de la relación entre edad y falla, muestran que generalmente *no hay ninguna razón para desarrollar paradas de rutina a ninguna frecuencia*. Esto nos conduce a una reducción en los tiempos de paradas programadas previamente, sin un correspondiente aumento de los tiempos de paradas no programadas.

Por ejemplo, el RCM permitió a una gran planta integrada de producción de aceros eliminar todas las paradas a tiempo fijo de su división de fabricación de acero. En otro caso, los intervalos entre grandes paradas de una turbina de gas estacionaria en una plataforma petrolera fueron aumentados de 25000 a 40000 horas sin sacrificar confiabilidad.

- a pesar de los comentarios antes señalados, puede ser necesario planificar una parada por una de las siguientes razones:
  - para prevenir una falla que es genuinamente dependiente de la edad
  - para corregir una falla potencial
  - para corregir un falla oculta
  - para realizar una modificación.

  En estos casos, la disciplinada revisión de la necesidad de acciones preventivas ó correctivas que es parte del proceso RCM lleva a listas de trabajos con detención más cortas, lo cual nos lleva a *paradas más cortas*. Paradas más cortas son más fáciles de gestionar y por lo tanto más probables de completar según lo planeado.

- listas de trabajos de parada más cortas también nos llevan a *menor cantidad de problemas de mortalidad infantil* cuando la planta sea puesta en marcha de nuevo después de la parada, porque no ha sido perturbada demasiado. Esto nos conduce a un aumento global de la confiabilidad.
- como se explicó en la página 272, el RCM brinda una oportunidad para los participantes en el proceso de *aprender rápida y sistemáticamente como operar y mantener plantas nuevas*. Esto les permite evitar muchos de los errores que de otro modo hubieran cometido como resultado del proceso de aprendizaje, y les asegura que la planta sea mantenida correctamente desde el comienzo.

  Al menos cuatro organizaciones con quienes el autor ha trabajado en el Reino Unido y los Estados Unidos alcanzaron lo que describieron como "la más rápida y suave puesta en marcha en la historia de la compañía" después de aplicar RCM a instalaciones nuevas. En cada caso, RCM fue aplicado en las etapas finales de la puesta en marcha. Las compañías referidas son de los sectores de automóviles, acero, papel y caramelos.
- la *eliminación de plantas superfluas* y por lo tanto de fallas superfluas. Como se mencionó en el Capítulo 2, no es inusual encontrar que entre 5% y 20% de los componentes de plantas complejas son totalmente superfluos, pero pueden todavía interrumpir la planta cuando fallan. La eliminación de estos componentes nos lleva al correspondiente aumento de confiabilidad.
- mediante la utilización del grupo de personas que mejor conocen el equipo para desarrollar un análisis sistemático de los modos de falla, resulta posible *identificar y eliminar las fallas crónicas* que de otro modo no serían detectadas, y tomar una acción adecuada.

Mejor Calidad del Producto

Concentrándose directamente en los aspectos de calidad del producto como se muestra en las páginas 52 y 53, el RCM hace mucho para mejorar los rendimientos de procesos automatizados.

Por ejemplo, una operación de montaje de electrónica usó RCM para reducir la tasa de descarte de 4% (4000 partes por millón) a 50 ppm.

Mayor Eficiencia del Mantenimiento (Costo-efectividad)

El RCM ayuda reducir, ó al menos a controlar el ritmo de crecimiento de los costos de mantenimiento de la siguiente forma:

Menos mantenimiento de rutina:
Cualquier activo que tuviera un sistema de mantenimiento preventivo completamente desarrollado y que se le haya aplicado RCM correctamente, sufre una reducción de entre el 40% y el 70% en la carga de trabajo programada de mantenimiento de rutina. Esta reducción es parcialmente

debida a la reducción del número de tareas, pero principalmente debida a un incremento global en los intervalos entre tareas. También sugiere que si se usa RCM para desarrollar programas de mantenimiento para equipos nuevos ó para equipos que actualmente no están sujetos a un programa formal de mantenimiento preventivo, la carga de trabajo de rutina podría ser 40% - 70% menor que si el programa de mantenimiento hubiera sido desarrollado por cualquier otro medio.

Notar que en este contexto, mantenimiento de "rutina" ó "programado" significa cualquier trabajo realizado cíclicamente, sea este el registro diario de una lectura en un manómetro, una lectura de vibración mensual, un chequeo funcional anual de un interruptor de temperatura ó una parada de tiempo fijo cada cinco años. En otras palabras, cubre tareas a condición programadas, tareas de reacondicionamiento programadas, tareas de sustitución programadas y búsqueda de fallas programadas.

Por ejemplo, el RCM ha llevado a las siguientes reducciones de carga de trabajo de mantenimiento de rutina cuando se lo aplicó a sistemas existentes:

- una reducción del 50% en la carga de trabajo de mantenimiento de rutina de una planta de caramelos.
- una reducción de un 50% en los requerimientos de mantenimiento de rutina de un transformador de 11kV en un sistema de distribución eléctrica.
- una reducción del 85% en los requerimientos de mantenimiento de rutina de un gran sistema hidráulico de una plataforma de petróleo.
- una reducción del 62% en el número de tareas de baja frecuencia que necesitaban ser hechas en una línea de mecanizado en una planta de motores de autos.

Notar que las reducciones mencionadas antes son sólo reducciones en los requerimientos de mantenimiento de rutina programados. En muchos sistemas MP, menos de la mitad de las tareas programadas por la oficina de planificación son realmente completadas. Este número es frecuentemente tan bajo como 30%, y a veces hasta más bajo. En estos casos, una reducción del 70% en la carga de trabajo de rutina sólo traerá lo que está programado a la misma línea de lo que está siendo hecho realmente, lo que significa que no habrá reducción en la carga de trabajo real.

Irónicamente, la razón de porqué tantos sistemas MP tradicionales sufren de tasas tan bajas de cumplimiento de lo programado es porque mucha de la carga de trabajo de rutina es percibida – correctamente – como innecesaria. Sin embargo, si sólo un tercio del trabajo prescripto está siendo hecho en cualquier sistema, el sistema está totalmente fuera de control. Una revisión RCM base cero ayuda mucho a poner nuevamente bajo control situaciones como esta.

Mejor contratación de servicios de mantenimiento

Aplicar el RCM a los contratos de mantenimiento lleva a ahorros en dos áreas.

Primero, una clara comprensión de las consecuencias de la falla permite a los compradores especificar tiempos de respuesta más precisamente – inclusive a especificar diferentes tiempos de respuesta para diferentes tipos de falla ó diferentes tipos de equipos. Dado que las respuestas rápidas son con frecuencia el más costoso aspecto de los contratos de mantenimiento, un juicioso ajuste fino en ésta área puede llevarnos a ahorros substanciales.

Segundo, el análisis detallado de las tareas preventivas permite a los compradores reducir tanto el contenido como la frecuencia de la porción rutinaria de los contratos de mantenimiento, usualmente por la misma cantidad (40% - 70%) que cualquier otro programa que haya sido preparado sobre una base tradicional. Esto lleva a los correspondientes ahorros en los costos de contratación.

Menor necesidad de usar expertos caros

Si participan de las reuniones RCM técnicos de campo empleados del proveedor de los equipos, como se sugiere en la página 273, el intercambio de conocimiento que tendrá lugar lleva a un salto cuántico en la habilidad de los mantenedores empleados por el usuario para resolver problemas difíciles por si mismos. Esto lleva a una dramática caída en la necesidad de solicitar ayuda (cara) de allí en adelante.

Especificaciones más claras para la adquisición de nueva tecnología de mantenimiento

El criterio usado para decidir si una tarea proactiva es técnicamente factible y merece la pena aplica directamente a la adquisición de equipos de monitoreo de la condición. Si este criterio fuera aplicado desapasionadamente a esas adquisiciones, un número de errores caros podrían ser evitados.

Muchos de los ítems listados bajo "mejor desempeño operacional"

Muchos de los ítems listados en la sección previa de éste capítulo también mejoran la costo-efectividad del mantenimiento. Cómo hacen eso lo resumimos a continuación:

- *diagnóstico de falla más rápido* significa que menos tiempo se dedica a cada reparación.
- *detectar fallas potenciales antes que se conviertan en fallas funcionales* no sólo significa que las reparaciones pueden ser planificadas adecuadamente y por lo tanto llevadas adelante más eficientemente, sino que también reduce la posibilidad de daños secundarios caros que podrían ser ocasionados por la falla funcional.

- *la reducción ó eliminación de las grandes paradas* junto con *las listas de trabajos más cortas para aquellas paradas que si son necesarias* puede llevarnos a un muy substancial ahorro en gastos de repuestos y mano de obra (usualmente mano de obra contratada)
- *la eliminación de plantas superfluas* también significa la eliminación de la necesidad tanto de prevenirlas de fallar en una forma que interfiera con la producción, ó de repararlas cuando hallan fallado de ese modo
- *aprender cómo la planta debe ser operada* junto con *la identificación de fallas crónicas* lleva a la reducción en el número y la severidad de las fallas, lo cual conduce a la reducción en la cantidad de dinero que debe ser gastado en su reparación.

  El caso más espectacular de este fenómeno encontrado por el autor se refiere a un sólo modo de falla causado por ajuste incorrecto de la máquina (error del operador) en una gran planta de proceso. Fue identificado durante las revisión RCM y se calculó que habría costado a la organización que usa el activo apenas por debajo de U$S 1 millón en costos de reparación solamente en un período de ocho años. Fue eliminado solicitándole a los operadores ajustar la máquina en una forma ligeramente diferente.

Vida Útil más Larga de Ítems Caros

Asegurando que cada activo reciba el mínimo básico de mantenimiento esencial – en otras palabras, la cantidad de mantenimiento necesaria para asegurar que lo que puede hacer se mantenga por encima de lo que los usuarios quieren que haga – el proceso RCM ayuda mucho para asegurar que casi cualquier activo puede hacerse durar tanto como su estructura básica de soporte se mantenga intacta y halla repuestos disponibles.

Como se mencionó en varias ocasiones, el RCM también ayuda a los usuarios a aprovechar la máxima vida útil de cada componente individual al seleccionar mantenimiento a condición con preferencia a cualquier otra técnica cuando sea posible.

Mayor motivación de los individuos

El RCM ayuda a mejorar la motivación de las personas que están involucradas en el proceso de revisión de muchas maneras. Primero, una más clara comprensión de las funciones del activo y de lo que deben hacer para mantenerlo trabajando, aumenta en gran forma sus competencias y por lo tanto su confianza.

Segundo, una clara comprensión de los aspectos que están más allá del control de cada individuo – en otras palabras, fuera de los límites que ellos pueden razonablemente tener expectativas de alcanzar – les permite trabajar más cómodos dentro de ésos límites. (Por ejemplo, nunca más los supervisores de mantenimiento serán automáticamente responsabilizados por todas

las fallas, como ocurre tan seguido en la práctica. Esto les permite – y a aquellos que están con ellos – manejar las fallas mas calmada y racionalmente de lo que podría de otro modo ser el caso.)

Tercero, el saber que cada miembro de grupo jugó un rol en la formulación de objetivos, en la toma de decisión de qué debe ser hecho para alcanzarlos y en la toma de decisión de quién debe hacerlo lleva a un fuerte sentido de propiedad. Esta combinación de competencias, confianza, comodidad y propiedad implica que la gente involucrada será mucho más propensa a querer hacer el trabajo correcto en forma correcta la primera vez.

Mejor Trabajo en Equipo

En una forma curiosa, el trabajo en equipo parece haberse convertido en un medio para un fin y en un fin en si mismo para muchas organizaciones. La manera en que el enfoque altamente estructurado del RCM hacia el análisis y toma de decisión en los problemas de mantenimiento contribuye al trabajo en equipo fue resumido en la página 272. No sólo este enfoque alimenta el trabajo en equipo dentro de los propios grupos de revisión, sino que también mejora la comunicación y la cooperación entre:

- producción ó el departamento de operaciones y la función mantenimiento
- gerentes, supervisores, técnicos y operarios
- diseñadores de equipos, proveedores, usuarios y mantenedores

Una Base de Datos de Mantenimiento

Las Hojas de Información y de Decisión de RCM proveen un número adicional de beneficios, como ser:

- ***adaptación para circunstancias cambiantes:*** la base de datos de RCM hace posible dar trazabilidad a las razones para cada tarea de mantenimiento hasta llegar a las funciones y al contexto operativo del activo. Como resultado, si cualquier aspecto del contexto operativo cambia, es fácil identificar las tareas que son afectadas y revisarlas en consecuencia. (Ejemplos típicos de dichos cambios son nuevas reglamentaciones ambientales, cambios en la estructura de costos operacionales que afectan la evaluación de las consecuencias operacionales, o la introducción de nueva tecnología de proceso). A la inversa son igualmente fáciles de identificar las tareas que no son afectadas por esos cambios, lo que significa que no se perderá tiempo en revisar dichas tareas.

  En el caso de sistemas de mantenimiento tradicionales, dichos cambios con frecuencia significan que todo el programa de mantenimiento debe ser revisado completamente. Frecuentemente, esto es visto como un trabajo muy grande, por lo que el sistema como un todo cae gradualmente en desuso.

- ***un registro de auditoría:*** la Parte 3 del Capítulo 5 menciona que más que prescribir tareas específicas a frecuencias específicas, más y más la legislación moderna de seguridad está demandando que el usuario de activos físicos sea capaz de producir evidencia documentada que sus programas de mantenimiento son construidos sobre bases racionales y defendibles. Las Hojas de Trabajo de RCM suministran esta evidencia – la prueba de auditoría – en una forma coherente, lógica y fácilmente comprensible.
- ***dibujos y manuales más precisos:*** el proceso RCM usualmente significa que los manuales y dibujos son leídos en una forma completamente nueva. La gente comienza a preguntar "¿qué hace?" en lugar de "¿que es?". Esto lleva a detectar una sorprendente cantidad de errores que podrían haber pasado desapercibidos en los dibujos tal cual construcción (as-built) (especialmente en dibujos de proceso e instrumentación). Esto ocurre más frecuentemente si los operadores y mantenedores que trabajan con el activo son incluidos en los grupos de revisión.
- ***reduce los efectos de la rotación de personal:*** todas las organizaciones sufren cuando gente con experiencia se va ó se retira y se lleva su conocimiento y experiencia consigo. Registrando esta información en la base de datos de RCM, la organización se hace mucho menos vulnerable a estos cambios.

  Por ejemplo, un importante fabricante de automóviles se enfrentó a una situación en la cual una planta debía ser reubicada y la mayoría de los trabajadores habían elegido no mudarse con los equipos al nuevo lugar. Sin embargo, usando RCM para analizar los equipos antes de la reubicación, la compañía fue capaz de transferir mucho del conocimiento y la experiencia de los trabajadores que se iban hacia la gente que fue reclutada para operar y mantener los equipos en la nueva ubicación.
- ***la introducción de sistemas expertos:*** la información en la Hoja de Información provee en particular una excelente base para un sistema experto. De hecho, muchos usuarios miran esta hoja de trabajo como un simple sistema experto en si mismo, especialmente si la información es guardada y ordenada adecuadamente en una base de datos computarizada.

Un Marco de Referencia Integrador

Como se mencionó en el Capítulo 1, todos los aspectos discutidos antes son parte de la corriente principal de la gestión del mantenimiento, y muchos son realmente el objetivo de programas de mejora. Un elemento clave del RCM es que provee un efectivo marco de referencia paso a paso para atacarlos a *todos* ellos de una vez, y para involucrar a todos los que tengan algo que ver con los equipos en el proceso.

15 Una Breve Historia de RCM

15.1 La Experiencia de Las Líneas Aéreas

En 1974, el Departamento de Defensa de los Estados Unidos comisionó a United Airlines para preparar un informe sobre los procesos usados por la industria de la aviación civil para elaborar programas de mantenimiento para los aviones. El informe resultante fue titulado *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*.

Antes de revisar la aplicación de RCM en otros sectores, los párrafos siguientes resumen la historia de RCM hasta el momento de la publicación del informe de Nowlan y Heap[1978]. Los párrafos en bastardillas citan extractos de su informe.

El Enfoque tradicional del Mantenimiento Preventivo

El enfoque tradicional de los planes de mantenimiento programado se basa en el concepto de que cada ítem que forma parte de un equipo complejo tiene "una edad cierta" a la cual es necesario un reemplazo completo para asegurar la confiabilidad en seguridad y operatividad. Sin embargo, a través de los años, se descubrió que muchos tipos de fallas no podrían ser prevenidas o reducidas en forma efectiva por tales actividades de mantenimiento, sin importar cuán intensamente fueran realizadas. En respuesta a este problema, los diseñadores de aviones comenzaron a desarrollar características de diseño que redujeran las consecuencias de fallas- es decir, aprendieron como diseñar aviones que fueran "tolerantes a las fallas". Prácticas tales como la duplicación de sistemas, el uso de varios motores y el diseño de estructuras resistentes a los daños, redujeron sensiblemente la relación entre seguridad y confiabilidad, aunque la misma no haya sido eliminada del todo.

Sin embargo, todavía quedaba una pregunta concerniente a la relación entre mantenimiento preventivo y confiabilidad. A fines de los '50, el tamaño de las líneas aéreas comerciales había crecido a un punto tal, que existían datos suficientes para estudiar y el costo de las actividades de mantenimiento era lo suficientemente alto como para justificar una investigación de los resultados reales de las prácticas existentes. Al mismo tiempo la Agencia Federal de Aviación (AFA), que era responsable de regular las prácticas de

mantenimiento de las aerolíneas, estaba decepcionada por las experiencias que mostraban que no era posible controlar la tasa de fallas de ciertos tipos de máquinas no confiables por medio de cambios en el contenido o frecuencia de los reemplazos programados. Como resultado, en 1960 se formó un grupo de trabajo que incluía representantes de la Agencia Federal de Aviación y de las aerolíneas, para investigar las capacidades del mantenimiento preventivo

El trabajo de este grupo condujo al establecimiento del ***Programa de Confiabilidad de AFA / Industria,*** *descrito en la introducción del documento autorizante tal como sigue:*

> *"El desarrollo de este programa tiende al control de la confiabilidad a través de un análisis de los factores que afectan la misma y provee un sistema de acciones para mejorar, cuando existan, los bajos niveles de confiabilidad. En el pasado, se puso gran énfasis en el control de los períodos de reemplazos para proveer un nivel satisfactorio de confiabilidad. Luego de un estudio cuidadoso, el Comité está convencido que la confiabilidad y el control de los tiempos de reemplazos no son necesariamente indicativos de tópicos asociados..."*

Este enfoque fue un desafío directo al concepto tradicional de que el tiempo transcurrido entre reemplazos sucesivos de un ítem era un factor importante para controlar su tasa de fallas. El grupo de trabajo desarrolló un programa de confiabilidad para un sistema de propulsión y entonces, cada aerolínea integrante del grupo fue autorizada a desarrollar e implementar programas de confiabilidad en el área de mantenimiento que se mostrara más interesada. Durante este proceso, se aprendió mucho acerca de las condiciones que deben existir para que el mantenimiento programado sea efectivo. Dos descubrimientos fueron especialmente sorprendentes:

- ***El reemplazo programado tiene poco efecto en la confiabilidad total de un ítem complejo a menos que el mismo tenga un modo de falla dominante.***
- ***Hay muchos ítems para los cuales no existe una forma efectiva de mantenimiento programado.***

La Historia del Análisis RCM

El paso siguiente fue un intento de organizar lo que se aprendió de los diversos programas de confiabilidad para desarrollar un enfoque lógico y de aplicación general para el diseño de programas de mantenimiento preventivo. En 1965, se ideó una técnica rudimentaria del diagrama de

decisión y en 1967 se presentó un informe sobre su aplicación en el Encuentro de AIAA para el Diseño y Operaciones de la Aviación Comercial. Refinamientos posteriores de la técnica fueron englobados en un manual de desarrollo y evaluación de programas de mantenimiento, delineados por un grupo guía de mantenimiento formado para dirigir el desarrollo del programa inicial del nuevo avión Boeing 747. Este documento, conocido como MSG-1, fue usado por equipos especiales de personal de la industria y de la AFA para desarrollar el primer plan de mantenimiento programado basado en los principios de RCM. El programa de mantenimiento del Boeing 747 fue un éxito.

El uso de la técnica del diagrama de decisión llevó a mejoramientos posteriores, que fueron incorporados dos años más tarde en un segundo documento, MSG-2: Documento de los Fabricantes de Aviones para el Planeamiento de un Programa de Mantenimiento.

El MSG-2 fue usado para desarrollar el mantenimiento programado de los aviones Lockheed 1011 y Douglas DC 10. Estos programas también fueron exitosos. El MSG-2 también se aplicó a la aviación táctica militar; las primeras aplicaciones fueron aparatos tales como los Lockheed S-3 y P-3 y el McDonnell F4J. Un documento similar preparado en Europa fue la base para los programas iniciales de los aviones Airbus A-300 y Concorde.

El objetivo de las técnicas delineadas en MSG-1 y MSG-2 fue desarrollar un programa de mantenimiento cíclico que asegurara la máxima seguridad y confiabilidad de la que fuera capaz el equipo y con el menor costo. Como un ejemplo de los beneficios económicos logrados con este enfoque, bajo las políticas tradicionales de mantenimiento el programa inicial para el avión Douglas DC-8 requería el reemplazo de 339 ítems, en contraste con siete de tales ítems para el programa del DC-10. Uno de los ítems que ya no está sujeto a los límites de reemplazo fue el motor de la turbina de propulsión. La eliminación de los reemplazos programados para los motores condujo a importantes reducciones en los costos de materiales y mano de obra, como también del inventario de repuestos requeridos para cubrir el taller de mantenimiento en más del 50 %. Dado que los motores para los grandes aviones costaban más de 1 millón de U$S cada uno, éste era un ahorro considerable.

Otro ejemplo; bajo el programa MSG-1 para el Boeing 747, United Airlines sólo gastó 66000 horas hombre en inspecciones estructurales extensas antes de alcanzar un intervalo básico de 20000 horas para las primeras inspecciones de gran escala de este avión. Bajo las políticas tradicionales de mantenimiento se insumían más de 4 millones de horas hombre para llegar al mismo intervalo de inspección estructural del Douglas DC-8 que es más pequeño y menos complejo. Las reducciones de costo de esta magnitud son obviamente importantes para cualquier organización respon-

sable del mantenimiento de grandes flotas de equipos complejos. Más importante:

- ***Tales reducciones de costo son obtenidas sin disminución de la confiabilidad. Por el contrario, una mejor comprensión del proceso de falla en equipos complejos ha mejorado sensiblemente la confiabilidad al hacer posible direccionar las tareas preventivas hacia evidencias específicas de fallas potenciales.***

Aunque los documentos MSG-1 y MSG-2 revolucionaron los procedimientos seguidos para desarrollar programas de mantenimiento para el transporte aéreo, su aplicación a otros tipos de equipos estuvo limitado por su enfoque sumamente conciso y muy especializado. Además, la formulación de ciertos conceptos era incompleta. Por ejemplo, la lógica de la decisión comenzaba con una evaluación de las tareas propuestas, en lugar de una evaluación de las consecuencias de la falla que determinan dónde son necesarias, y si así fuera, su propósito real. El problema de determinar los intervalos de tareas no fue establecido, el rol de las fallas de las funciones ocultas no estaba claro, y el tratamiento del mantenimiento estructural era inadecuado. Tampoco había una guía de cómo usar la información operativa para depurar o modificar el programa inicial luego de que el equipo entrara en servicio, o los sistemas de información necesarios para el gerenciamiento efectivo del programa en curso.

Todas estas imperfecciones, tanto como la necesidad de clarificar muchos de los principios subyacentes condujeron a procedimientos analíticos de visión más amplia y su cristalización en la disciplina lógica conocida como Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM).

15.2 La Evolución de RCM2

El autor y sus asociados comenzaron a trabajar con la aplicación de RCM en los sectores de la minería y manufacturas a comienzo de los 1980. Usaron una versión levemente modificada del diagrama de Nowlan y Heap entre 1983 y 1990. Durante este período, el medio ambiente se convirtió en algo más que un tema de discusión. En los comienzos, se les aconsejó a los Facilitadores que trataran del mismo modo los riesgos al medio ambiente como a los de seguridad. Sin embargo, esto significaba en la práctica que muchos problemas ambientales que no significaran una amenaza inmediata y directa a la seguridad fueran dejados de lado. El medio ambiente puede ser también un tema altamente conflictivo que no se presta a una evaluación subjetiva tal como pudiera serlo para la seguridad.

Como resultado, en 1988 el autor comenzó a trabajar con algunas organizaciones multinacionales para desarrollar un enfoque más preciso respecto

a fallas con consecuencias sobre el medio ambiente. Esto culminó con el agregado de la pregunta E en el diagrama de decisión en 1990. El uso de estándares y regulaciones como base para esta decisión eliminó el elemento de subjetividad. Sin embargo, al tema completo se le asignó la misma prioridad que a la seguridad en reconocimiento a la alta y creciente importancia que le concede la sociedad al tema ambiental, tal como se trata extensamente en la Parte 3 del Capítulo 5. El agregado de esta sola pregunta modificó el diagrama de decisión de manera tal que mereció cambiar su nombre por el de RCM2.

Otros cambios incorporados a RCM2

Cuando RCM2 fue presentado en Septiembre de 1990, fueron incorporados al proceso de decisión un cierto número de cambios que estuvieron en desarrollo durante varios años. Estos fueron los siguientes:

- los términos "técnicamente factible" y "merecer la pena"sustituyeron a "apropiado" y "eficaz".
- los pocos pero significativos casos donde la búsqueda de fallas era imposible o impracticable condujo al agregado de criterios explícitos para la selección de estas tareas. También impulsó la inclusión del proceso secundario de decisión para funciones ocultas explicado en la página 190.
- la pregunta H fue reformulada para eliminar ciertas ambigüedades.
- la pregunta S también fue modificada para evitar algunas imprecisiones alrededor de la palabra "seguridad".
- la ampliación en bastardillas a la pregunta O fue agregada dado que muchos usuarios tendían a interpretarla muy limitadamente.
- las preguntas H1, S1, O1, N1 fueron modificadas para facilitar su comprensión.
- el término "reacondicionamiento cíclico" sustituyó a "retrabajo programado"en las preguntas H2, S2, O2, N2 porque "retrabajo" tiene distinto significado en las empresas manufactureras. Esto frecuentemente causaba confusión. ("reacondicionamiento programado" se usa ahora también en el diagrama de decisión MSG3).
- las preguntas en el diagrama de decisión corregido fueron recodificadas.

Con la posible excepción de la pregunta concerniente a las consecuencias ambientales, ninguno de estos cambios representan una desviación significativa de la filosofía implícita en el diagrama de decisión original de

Nowlan y Heap.

El efecto neto de estos cambios ha sido hacer aún más sólida una técnica que ya era extraordinariamente robusta en el nivel teórico, y hacer que sea más rápido y fácil utilizarla para reducir costos.

Dónde ha sido aplicado RCM2

RCM2 ha sido aplicado en más de 1000 plantas en 41 países. El rango de los proyectos va desde el entrenamiento en planta para la concientización de gerentes senior de operaciones y mantenimiento hasta la aplicación sin restricciones a todos los equipos de una planta. Las empresas en los que se han llevado a cabo proyectos cubren todas las actividades importantes del esfuerzo humano organizado. Estos incluyen minería, manufacturas, petroquímicas, servicios (electricidad, gas y agua), transporte masivo (en especial ferrocarriles), edificios y sus servicios y empresas militares (ejércitos, marinas y fuerzas aéreas).

El espacio que tomaría realizar una descripción detallada del trabajo realizado en cada caso no permite su incorporación en este libro. Sin embargo, el Capítulo 14 provee un resumen general de los resultados logrados a la fecha junto con una breve reseña de algunos de los más destacables.

15.3 Otras Versiones de RCM y el Estándar SAE

El resto de este capítulo provee un resumen de la evolución de RCM en general. Los párrafos en bastardillas se han extraído directamente de un artículo titulado "El Nuevo Estándar RCM de SAE", siendo su autor Netherton (2000).

En 1980, ATA (la Asociación del Transporte Aéreo de América) produjo el MSG-3, Documento para el Desarrollo de un Programa de Mantenimiento para Fabricantes / Aerolíneas. El MSG-3 estuvo influenciado por el libro de 1978 de Nowlan y Heap, pero fue un intento por continuar la tradición comenzada por los anteriores documentos MSG. El MSG-3 es el documento que hoy guía el desarrollo de los programas iniciales de mantenimiento programado para los nuevos aviones comerciales.

Sin embargo la línea de pensamiento de Nowlan y Heap siguió su propio camino. Ambos fueron comisionados para escribir su libro por el Departamento de Defensa de USA (DoD), que estaba observando a la industria comercial para encontrar caminos que hicieran menos costosos sus propios programas de mantenimiento. El DoD supo que la aviación comercial había encontrado un enfoque revolucionario para el mantenimiento programado, y esperaba beneficiarse con esa experiencia. Una vez que el DoD publicó el

libro de Nowlan y Heap, las Fuerzas Armadas de USA emprendieron el desarrollo del proceso RCM para uso propio: uno para el Ejército, uno para la Fuerza Aérea y dos para la Armada- puesto que sus comunidades navales embarcadas y de la aviación insistían en que un proceso RCM que podría funcionar para uno, quizá no pudiera servir para el otro. Los contratistas y proveedores de equipos aprendieron a usar estos procesos cuando le vendieron nuevos equipos a las fuerzas de USA. Los procesos fueron publicados en las Especificaciones y Estándares Militares (que nunca fueron actualizados) a mediados de los 1980.

En un trabajo paralelo pero independiente a comienzos de los 1980, en el Instituto de Investigación de la Energía Eléctrica (EPRI), un grupo de investigación industrial de las empresas de energía eléctrica llevaron a cabo dos trabajos piloto de RCM en la industria de energía nuclear de USA. Su interés surgió de la creencia de que esta industria estaba logrando niveles adecuados de seguridad y confiabilidad, pero que sus equipos estaban muy excedidos de mantenimiento. Como resultado, su objetivo principal fue simplemente reducir costos de mantenimiento, antes que mejorar la confiabilidad, modificando en concordancia los procesos RCM. (Hasta tal grado, en realidad, que guarda poco parecido con el proceso RCM original descripto por Nowlan y Heap; sería más adecuado calificar este trabajo como una optimización del mantenimiento planificado, PMO, que como RCM). Este proceso modificado fue ampliamente adoptado en 1987 por la industria de energía nuclear de USA. Posteriormente otras instalaciones nucleares adoptaron variaciones de este enfoque, como también otras ramas de la industria de la generación y distribución eléctrica y partes de la industria petrolera.

Al mismo tiempo, ciertos especialistas en la formulación de estrategias de mantenimiento se sintieron interesados en la aplicación de RCM en otras industrias aparte de la aeronáutica. Entre los primeros de estos se encontraban John Moubray y sus asociados. Este grupo trabajó inicialmente con RCM en industrias mineras y manufactureras de Sud África bajo la tutela de Stan Nowlan, y posteriormente se establecieron en el Reino Unido. A partir de allí sus actividades se expandieron en casi todo sector industrial abarcando más de 40 países. Hicieron agregados al trabajo de Nowlan aún cuando mantuvieron el criterio original con respecto a la seguridad y confiabilidad de los equipos. Por ejemplo, incorporaron temas de medio ambiente en los procesos de decisión, clarificaron la manera en las que debían definirse las funciones de los equipos, desarrollaron reglas más precisas para elegir las tareas e intervalos de mantenimiento, e incorporaron criterios cuantitativos de riesgo aplicables directamente a la fijación de los intervalos de tareas de búsqueda de fallas. Su versión mejorada de RCM se conoce ahora como RCM2.

La Necesidad de un Estándar: la década de los '90s.

Desde principios de 1990 muchas organizaciones más desarrollaron variaciones del proceso RCM. Algunos, como el del Comando Aéreo de la Armada con su "Principios para el Proceso de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad de la Aviación Naval (NAVAIR 00-25-403)", y el de la Marina Real Británica con su Estándar de Ingeniería Naval (NES45) orientado a RCM, han permanecido fieles al proceso originalmente expuesto por Nowlan y Heap. Sin embargo, dado el éxito que ha comenzado a tener el RCM, ha surgido una colección totalmente nueva de procesos que sus promotores llaman RCM y que guardan muy poca relación con el proceso original meticulosamente investigado, altamente estructurado y completamente probado desarrollado por Nowlan y Heap. Como resultado, una organización que requiere ayuda para usar o aprender RCM, no puede estar segura del proceso que pudiera ofrecérsele.

Por cierto, cuando la Marina de USA, al construir un nuevo tipo de barco, le requirió a los proveedores del equipo que usaran RCM, una compañía de USA ofreció un proceso estrechamente relacionado con el MSG-2 de 1970. Defendió su oferta puntualizando que su proceso utilizaba un diagrama lógico de decisión. Puesto que RCM usa un diagrama de decisión, la compañía argumentó que el suyo también era un proceso RCM.

La Marina de USA no tuvo respuesta a este argumento, porque en 1994 William Perry, el Secretario de la Defensa de USA, había establecido una nueva política sobre las especificaciones y estándares militares de USA, que decía que las fuerzas armadas de USA, en adelante, no requerirían a sus proveedores industriales el uso de procesos militares estándar o específicos. En lugar de ello, fijaría requisitos de desempeño y les permitiría a los proveedores usar cualquier tipo de proceso en equipos que pudieran satisfacer tales requerimientos.

Esto anuló los estándares y especificaciones militares que definían RCM. El estándar de la Fuerza Aérea de USA fue cancelado en 1995. La Marina de USA no pudo invocar sus estándares y especificaciones en sus contratos con los proveedores de equipos (aunque continúa usándolos en trabajos internos), como tampoco pudo hacerlo con la compañía que quería usar el MSG-2.

Este desarrollo coincidió con el repentino interés en RCM por parte del mundo industrial. Durante la década del '90, las revistas y conferencias dedicados al mantenimiento de equipos se habían multiplicado, y la información sobre RCM surgida de ellos se hizo más numerosa. Esto demostró como procesos muy diferentes recibían el mismo nombre de RCM. Esto llevó a que la industria militar y comercial de USA viera la necesidad de definir que es un proceso RCM.

En su memorando de 1994, Perry dijo, "Yo alenté al Subsecretario de Defensa (Adquisición y Tecnología) a actuar conjuntamente con las asociaciones industriales para desarrollar estándares no gubernamentales para reemplazar, donde fuera posible, los estándares militares". Por cierto, el Comité de Estándares Técnicos de SAE tuvo una larga y estrecha relación con la comunidad de estándares de las fuerzas armadas, y ha trabajado durante varios años para ayudar a que los estándares comerciales reemplacen las especificaciones y estándares militares, donde fuera necesario o no existieran estándares.

De modo que en 1996 la SAE comenzó a trabajar en un estándar relacionado con RCM, al invitar a un grupo de representantes de los cuadros de la Flota y la Aviación Naval usuarios de RCM, y así ayudarlos a desarrollar un estándar para los Planes de Mantenimiento Programado. Estos representantes de la Marina se habían estado reuniendo durante casi un año en un esfuerzo para desarrollar procesos que fueran comunes a la flota y la aviación, de modo que ya se había producido una considerable cantidad de trabajo cuando comenzaron a encontrarse bajo la guía de SAE. A fin de 1997, habiendo incorporado miembros de la industria comercial, el grupo se dio cuenta que lo mejor era concentrarse directamente en RCM. En 1998, el grupo definió el mejor enfoque para su estándar, en 1999 completó el proyecto del mismo y SAE lo aprobó y publicó.

Luego de una breve discusión acerca de las dificultades prácticas asociadas al intento de desarrollar un estándar universal de esta naturaleza, Netherton sigue diciendo:

El estándar aprobado por SAE no presenta un proceso [RCM] estándar. Su título es: "Criterios de Evaluación para Procesos de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) (SAE JA 1011)". Este estándar muestra criterios con los cuales se puede comparar un proceso. Si el proceso satisface dichos criterios, se lo considera un "proceso RCM", caso contrario no lo es. (Esto no significa necesariamente que los procesos que no cumplan con el estándar SAE RCM no resulten válidos par la formulación de estrategias de mantenimiento. Sólo quiere decir que no se le debe aplicar el término RCM a los mismos.)

Como se mencionó en el Capítulo 1, el proceso RCM descripto desde el Capítulo 2 al 10 de este libro cumple totalmente con el Estándar SAE.

APÉNDICE 1:Jerarquía de los Activos y Diagramas Funcionales de Bloque

Registros de Planta y Jerarquía de los Activos

La mayoría de las plantas tienen, o al menos usan, cientos y hasta miles de activos físicos. Estos activos van desde pequeñas bombas hasta plantas laminadoras de acero, portaaviones o edificios de oficinas. Pueden estar concentrados en un lugar pequeño o dispersos en miles de kilómetros cuadrados. Algunos de estos activos serán móviles y otros estarán fijos.
Antes que cualquier organización pueda aplicar RCM –proceso usado para determinar qué debe hacerse para asegurar que *cualquier activo físico* continúe haciendo lo que el usuario desea que haga – debe saber qué activos son y donde están. Aún en las instalaciones más pequeñas y simples, esto significa que debe prepararse un listado de toda la planta, equipos y edificios propios o usados por la organización, y que requieren mantenimiento de cualquier tipo. Esta lista se conoce como *registro de planta*.

El registro debe ser diseñado de manera tal que haga posible realizar un seguimiento de los activos que hayan sido analizados usando RCM, los que todavía no lo han sido y los que no se analizarán. (El registro de planta también es necesario para otros aspectos del gerenciamiento del mantenimiento, tales como el planeamiento y la programación de tareas rutinarias o no rutinarias, los registros históricos y la asignación de costos de mantenimiento. Como resultado, estos registros y los sistemas numéricos asociados deben prepararse y diseñarse de manera tal que puedan usarse para todos estos propósitos).

En el Capítulo 4 se explicó que RCM puede aplicarse a casi cualquier nivel en la jerarquía. También se sugirió que el nivel más apropiado es aquel que nos conduce a un número razonablemente manejable de modos de falla por función. Los niveles «apropiados» resultan ser mucho más fáciles de identificar si el registro de planta está preparado como una jerarquía que hace posible identificar cualquier sistema o activo, en cualquier nivel de detalle, hasta o incluyendo componentes individuales (ítems de línea reemplazables) o aún piezas de repuesto.

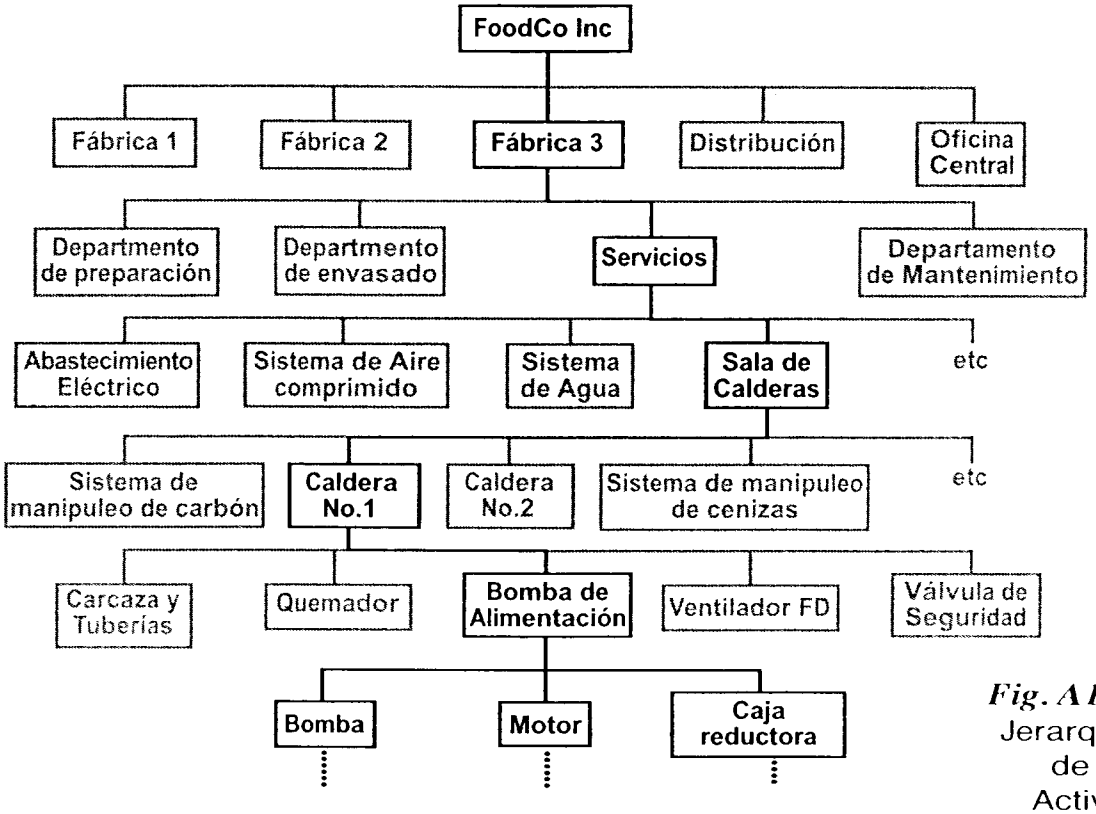


Fig. A1.1: Jerarquía de los Activos

El camión de la página 85 provee un ejemplo de tal jerarquía. La figura A1.1 muestra otro ejemplo que comprende una sala de calderas de una fábrica de alimentos.

Un listado de los activos en esta jerarquía, junto con un sistema de numeración jerárquico para cada activo, puede quedar como se muestra en la Figura A1.2

Figura. A1.2: Registro de Planta y Sistema Jerárquico de Numeración

Número	Activo
-	FoodCo Inc
01	**Fábrica 1**
02	**Fábrica 2**
03	**Fábrica 3**
0301	*Departamento de preparación*
0302	*Departamento de envasado*
0303	*Servicios*
030301	Abastecimiento Eléctrico
030302	Sistema de Aire comprimido
030303	Sistema de Agua
030304	Sala de Calderas
03030401	Sistema de refrigeración
03030402	Caldera 1
0303040201	Carcaza y Tuberías
0303040202	Quemador
0303040203	Bomba de alimentación
030304020301	Bomba
030304020302	Motor
030304020303	Caja reductora
0303040204	Ventilador FD
03030403	Caldera 2
03030404	Sistema de manejo de cenizas
0304	*Departamento de mantenimiento*
04	**Distribución**
05	**Oficina Central**

Jerarquías y diagramas funcionales de bloque

Es posible desarrollar una jerarquía mostrando las funciones primarias de cada uno de los activos incluidos en la misma. La Figura A1.3 muestra como puede hacerse para la jerarquía del activo visto en la Figura A1.1.

Las variaciones de la jerarquía funcional de la figura A1.3 se usan para mostrar las relaciones entre funciones del mismo nivel. Estos generalmente se conocen como «diagramas funcionales de bloque», y pueden ser usados para describir las relaciones en distinta variedad de formas. Por ejemplo, Smith [1993] define un diagrama funcional de bloque como «una representación en el nivel más alto de las funciones principales que realiza el sistema». Por otra parte, Blanchard y Fabrycky [1990], quienes prefieren el término «diagrama funcional de flujo», sugieren que estos diagramas pueden ser preparados en muchos diferentes niveles. Smith tiende a usar los diagramas para mostrar los movimientos de materiales, energía y señales de control a través y entre los distintos elementos del sistema, mientras que Blanchard y Fabrycky los usan para describir los distintos movimientos de un activo en las distintas tareas de su misión (tales como en un avión moviéndose desde el carreteo, el despegue, la ascensión, el vuelo, el descenso, el aterrizaje, etc.).

El diagrama funcional de bloque para la sala de calderas de la Figura A1.1 muestra que el carbón fluye desde el sistema de manipuleo hasta las dos calderas, y que el residuo va a la planta de manipuleo de cenizas. También muestra que los materiales y servicios fluyen por entre los límites del sistema. Esto se ilustra en la Figura A1.4 de la página 336, que continúa mostrando, un diagrama funcional de bloque para una de las calderas más detallado. Podría usarse una versión más compleja de estos diagramas para mostrar qué señales de control e indicación se desplazan entre los límites del sistema.

Las jerarquías y los diagramas de bloque funcionales son una parte importante del proceso de *diseño* del equipo, ya que el diseño comienza con una lista de las funciones deseadas y los diseñadores tienen que especificar una entidad (activo o sistema) que sea capaz de cumplir con cada requerimiento funcional.

Como se mencionó en el Capítulo 2, los diagramas funcionales de bloque pueden también ser útiles cuando se aplica RCM en instalaciones donde los procesos o las relaciones entre ellos no son intuitivamente obvias. Por lo general dichas instalaciones tienden a ser grandes, de accesibilidad pobre, muy complejas, de estructuras monolíticas tales como navíos, aeronaves de combate y partes poco accesibles de instalaciones nucleares.

Sin embargo, en la mayoría de las demás aplicaciones industriales (tales como usinas térmicas, plantas elaboradoras de productos alimenticios o automotrices, plataformas marinas de extracción de petróleo, plantas petroquímicas o farmacéuticas y flotas de vehículos), generalmente no existe la necesidad de pensar en delinear los diagramas funcionales de bloque antes de comenzar un proyecto RCM dado que:

QUÉ ES ...

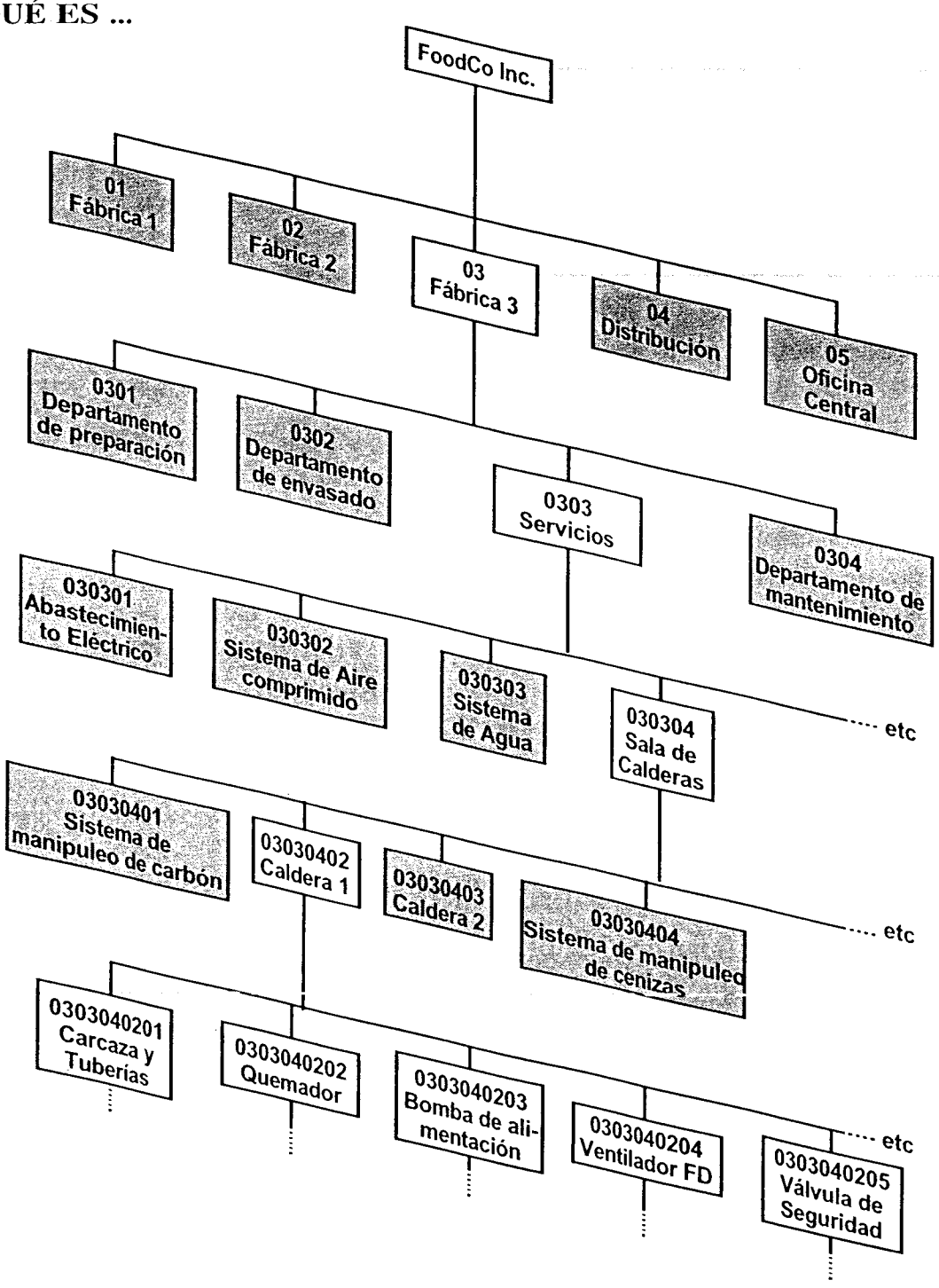


Figura A1.3
Jerarquía del Activo...

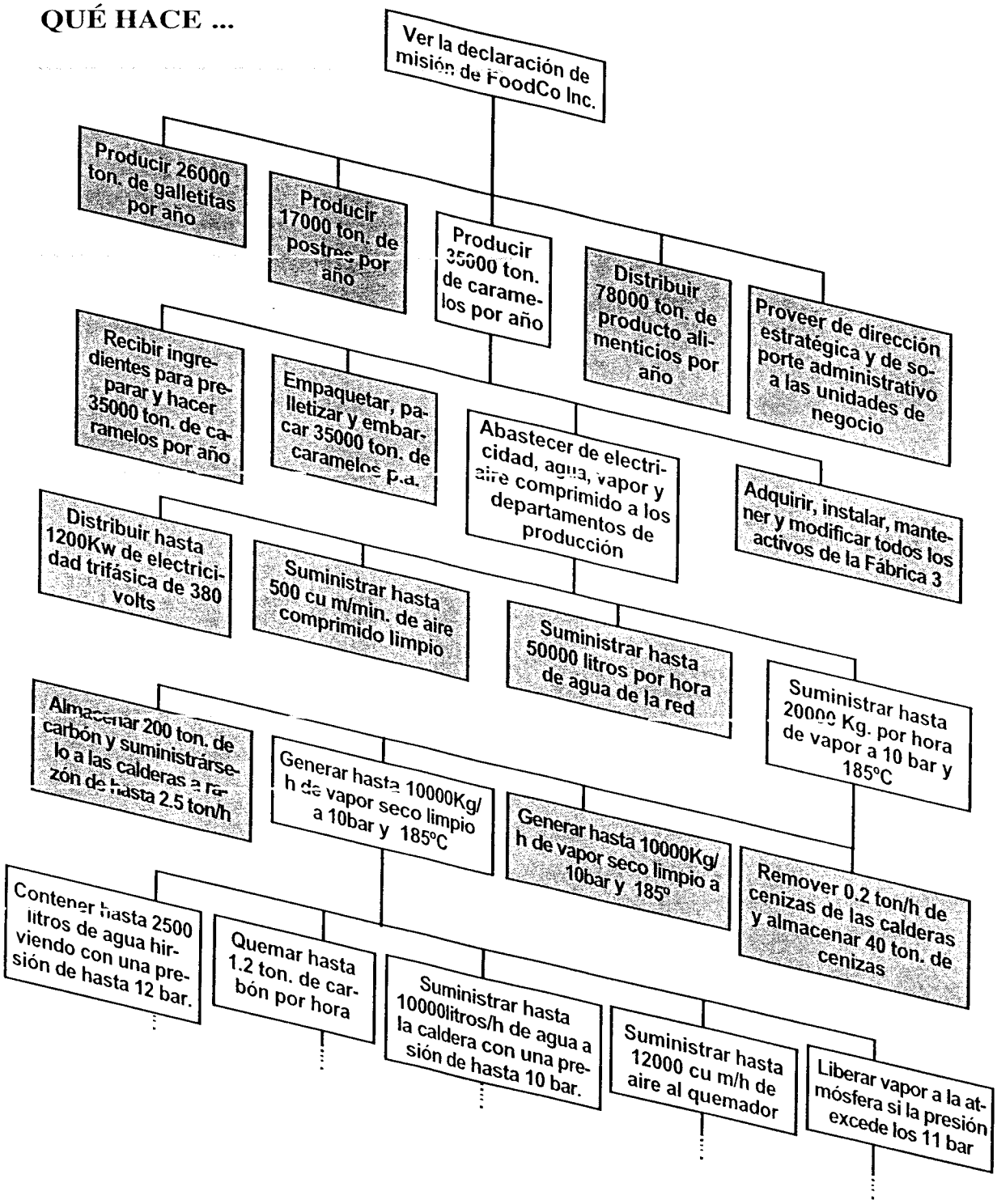


Figura A1.3 (continuación)
... con la Correspondiente Jerarquía Funcional

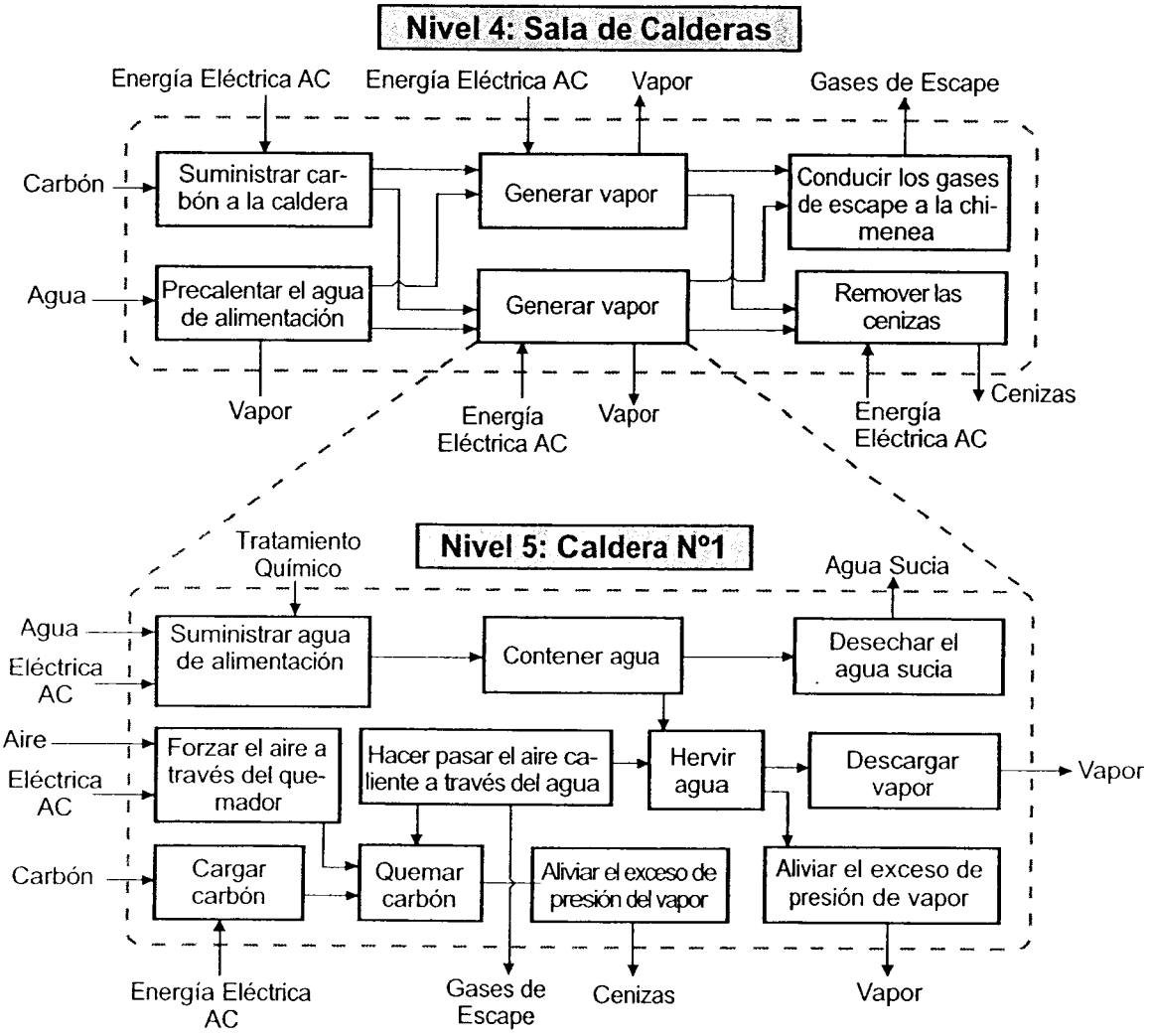


Figura A 1.4: Diagramas Funcionales de Bloque

- en la mayoría de las industrias, generalmente los participantes de los grupos RCM comprenden bien las relaciones entre los diferentes procesos por lo que estos diagramas son innecesarios.

Por ejemplo, los operadores y el personal de mantenimiento de la sala de calderas son totalmente conscientes del hecho de que el carbón, el agua y el aire ingresan por un extremo de la caldera y que el vapor, el gas de combustión y las cenizas (y en ocasiones agua sucia) salen por el otro extremo. La mayoría de ellos probablemente considerarían que sería una pérdida de tiempo registrar estos hechos simples en un diagrama. Como se discutió extensamente en el Capítulo 2, el verdadero desafío generalmente no es identificar las relaciones sencillas y obvias entre los procesos, sino el definir el desempeño deseado con relación a la capacidad inicial de todos los elementos clave de cada sistema, y definir entonces qué debe hacerse para asegurar que el sistema continúe operando con el rendimiento deseado.

En casos de incertidumbre, generalmente los equipos son lo suficientemente accesibles como para que sea fácil ir a ver y observar qué sucede. Si no fuese así, la información requerida puede ser tomada de los procesos y registros de los instrumentos de medición. En realidad, un juego apropiado de P/I generalmente elimina por completo la necesidad de los diagramas funcionales de bloque previo a la aplicación de RCM. En esos casos, los diagramas de bloque aumentan el tiempo, el esfuerzo y el costo del proceso RCM en forma significativa sin agregarle ningún valor.

- los diagramas funcionales de bloque identifican solamente las funciones primarias de cada nivel, de modo que cuentan sólo una parte de la historia. (Por ejemplo, casi todos los activos del cuarto nivel y de los niveles inferiores de la Figura A 1.1 contienen funciones secundarias. Esto no puede mostrarse en un diagrama de bloque sin hacerlo inmanejablemente engorroso).
- Como se explicó en la Parte 3 del Capítulo 2, las funciones principales de los activos que están en una jerarquía superior al nivel elegido para el análisis, deben incluirse adecuadamente en la redacción del contexto operacional. Estas exposiciones se redactan sólo para aquellos activos que son relevantes para el análisis en cuestión. Como resultado, no se pierde el tiempo definiendo las funciones de activos que no son aplicables al activo considerado. (Si se analiza un cierto número de activos, estos contextos generales se convierten en jerarquías funcionales de hecho para toda la organización –es mucho más detallado que un diagrama por activo incompleto y simplificado).
- Los activos en y bajo el nivel elegido para el análisis se tratan como parte del proceso RCM normal. La parte 7 del Capítulo 4 mostró que las funciones de los activos de menor nivel se enumeran como funciones secundarias en el análisis principal, o se tratan como modos de falla, o bien en el caso de subsistemas excepcionalmente complejos, se subdividen para analizarlos por separado.

  Por ejemplo, el caso del camión visto en la Figura 4.11 del Capítulo 4 demostró como un bloqueo en la alimentación de combustible podría ser tratado simplemente como un modo de falla ya sea del motor o del sistema de transmisión, sin necesidad de establecer una función por separado para el sistema o el ramal de alimentación.

(La experiencia del autor dicta que los diagramas funcionales de bloque tienden a ser de mayor valor para analistas externos que buscan aplicar RCM a pedido de usuarios de equipos. Dado que son externos, necesitan estos diagramas – generalmente preparados a costa de los propietarios de los activos – para mejorar su propio conocimiento de los procesos que deben analizar. La mejor manera de evitar este gasto es no emplear analistas externos como primer medida, sino entrenar como Facilitadores al personal que tenga un conocimiento razonable de primera mano del trabajo de la planta).

Los límites del sistema

Cuando se aplica RCM a cualquier activo o sistema, es importante definir claramente donde comienza o termina "el sistema" que se va a analizar. Si se ha diseñado una jerarquía comprensiva del activo y tomado la decisión de analizarlo en un nivel especificado, entonces «el sistema» incluye generalmente en forma automática todos los activos que se encuentran por debajo de ese sistema en la jerarquía del activo. Las solas excepciones son aquellos subsistemas que se entiende son tan insignificantes que no serán analizados, o aquellos tan complejos que se analizarán por separado.

Deberá tenerse cuidado con los lazos de control que consisten de un sensor en un sistema que envía una señal a un procesador en un segundo sistema, que a su vez activa un mecanismo en un tercero. En el Capítulo 4 se explicó que este tema puede ser tratado realizando el análisis a un nivel lo suficientemente alto como para asegurar que "el sistema" incluya todo el lazo, o analizando los sistemas de control por separado (luego de haber analizado los sistemas controlados). Sin embargo, en ocasiones esto es poco práctico, en cuyo caso debe decidirse qué sistema comprenderá el lazo de control en toda su amplitud.

Es necesario tener cuidado de asegurarse que los activos o componentes que están justo en los límites no queden fuera del análisis. Esto se aplica especialmente a ítems tales como válvulas y bridas.

Es bueno no ser demasiado rígidos acerca de las definiciones de límites, dado que a medida que el conocimiento crece durante el proceso RCM, las percepciones sobre que debería ser incorporado o no al análisis frecuentemente cambian. Esto significa que los límites pueden extenderse para incorporar algunos subsistemas, otros pueden descartarse y aún otros que están inicialmente incluidos pueden analizarse con posterioridad.

(Nuevamente, los mayores exponentes de las definiciones rígidas de los límites son los contratistas externos que buscan aplicar RCM a pedido de los usuarios, porque los límites de los sistemas deben ser precisamente definidos a fin de determinar el ámbito comercial de los contratos. El hecho de que el análisis es el sujeto del contrato formal significa que los límites deben ser definidos con mucha mayor precisión – y mucha más rigidez – que la necesaria desde el punto de vista puramente técnico. Los contratos de este tipo, entonces, tienen que ser renegociados cada vez que los límites necesiten modificarse, ya que de lo contrario, resultará en un análisis deficiente. El mejor camino para evitar el tiempo y costo asociado con estas maniobras comerciales es no contratar en absolute este aspecto de la formulación de políticas de mantenimiento.)

Apéndice 2: Error Humano

En el Capítulo 4 se mencionó que una gran parte de las fallas de los equipos es causada por 'error humano'. También se dijo que si un error humano puntual es considerado una razón creíble por la cual puede ocurrir una falla funcional, entonces ese error debe ser incluido en el AMFE. No obstante, el error humano es un tema tan importante que merece ser considerado aparte. El propósito de este anexo es proveer un breve resumen de las categorías principales de error humano, y sugerir como debieran ser tratados en el marco del RCM.

Categorías principales del Error Humano

Cuando se considera la interacción entre personas y máquinas, Blanchard et al[1995] agrupa los principales factores bajo cuatro encabezamientos:

- factores antropométricos
- factores sensoriales
- factores fisiológicos
- factores psicológicos

Casi todo "error humano" que lleva a una falla o problema, se debe a por lo menos una de estas cuatro áreas. Como resultado, en esta primer parte del apéndice revisamos brevemente las cuatro y luego veremos en mayor detalle la cuarta categoría.

Factores antropométricos

Los factores antropométricos son aquellos que se relacionan con el tamaño y/o fuerza del operador o técnico de mantenimiento. Los errores ocurren porque la persona (o parte de ella, como una mano o brazo):

- simplemente no puede entrar en el espacio disponible para hacer algo
- no puede alcanzar algo
- no es suficientemente fuerte para levantar o mover algo

Si ocurre una falla, o es razonablemente probable que ocurra, por cualquiera de estas razones, es altamente improbable que se encuentre una tarea de mantenimiento proactivo para tratarla. Observe también que si un error humano ocurre por una de estas razones, el error humano no es la causa raíz del problema. En realidad el modo de falla es "un diseño pobre" y el efecto de falla resultante es "el error humano".

Si las consecuencias al respecto de una falla que está ocurriendo por razones antropométricas, son tales que debe hacerse algo, es probable que lo único que pueda hacerse sea rediseñar. Casi siempre implicará reconfigurar el activo de algún modo por el cual se vuelva más accesible o más fácil de mover. En este contexto, la Figura A2.1 muestra algunas dimensiones que son consideradas adecuadas por la Armada de EEUU para un acceso humano razonable a espacios reducidos.

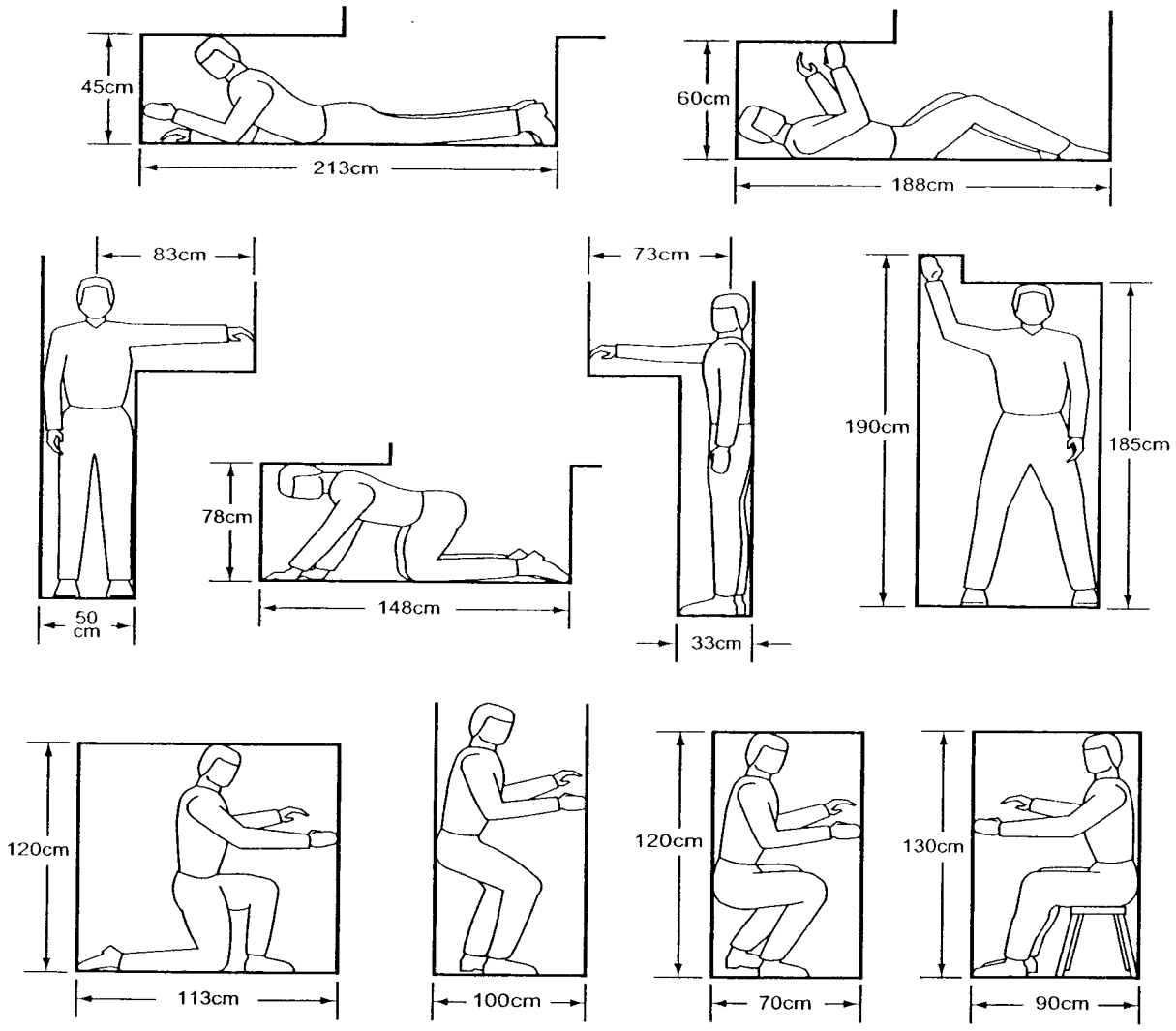


Figura A2.1:
Dónde caben las personas (De NAVSHIPS 94234, Manual de Criterios para el Diseño de Mantenibilidad para Diseñadores de Equipamientos Electrónicos a Bordo. US Navy, Washington DC)

Factores sensoriales humanos

Los factores sensoriales humanos consideran a la facilidad con la que las personas pueden ver, oír, sentir y hasta oler lo que está sucediendo a su alrededor. En el caso de operadores, esto tiende a aplicarse a la visibilidad y legibilidad de los instrumentos y consolas de control. Para los mantenedores, se relaciona con la visibilidad de los componentes en los recovecos y ranuras de sistemas complejos. El volumen y variabilidad de ruido de fondo también afecta la habilidad de ambos, operadores y mantenedores, para discernir qué le está sucediendo a su equipo.

Observe nuevamente que si los errores ocurren o se piensa que es probable que ocurran por estas razones, el error humano no es la causa raíz, pero es el efecto de alguna otra falla. Los remedios generalmente implican rediseñar el activo (haciendo las cosas más fáciles de percibir, reduciendo los niveles de ruido).

Factores fisiológicos

El término 'factores fisiológicos' se refiere al estrés ambiental que afecta al desempeño humano. Los tipos de estrés incluyen temperaturas altas o bajas, ruidos fuertes o irritantes, humedad excesiva, altas vibraciones, exposición a químicos tóxicos o radiación, o simplemente trabajo prolongado – especialmente en una tarea de alta demanda física o mental – sin el descanso adecuado.

La exposición continua a estos tipos de estrés llevan a reducir la capacidad sensorial, respuestas motrices más lentas y reducción de la alerta mental. Todas estas son manifestaciones de fatiga (humana), y todas aumentan la probabilidad de que las personas afectadas tengan un desliz, omisión o equivocación. (Estos tres términos son definidos en la próxima sección de este apéndice.)

Si los errores ocurren o se piensa que es probable que ocurran por alguna de estas razones, una vez más la persona no es la causa raíz, sino que el error es un efecto de alguna otra falla. Una vez más, si las consecuencias lo justifican, es probable que el remedio sea alguna variante de cambio 'de una sola vez'. El diseño del entorno físico puede ser cambiado de tal forma que se reduzcan los errores inducidos por el estrés (por ejemplo, reduciendo la temperatura o proveyendo protectores auditivos), al igual que pueden cambiarse los procedimientos para dar a las personas sobreestresadas una oportunidad de recuperarse.

Otro factor de estrés ambiental es un clima organizacional despiadadamente hostil o adverso. Mientras que esto no necesariamente tiene un efecto fisiológico, puede llevar a un incremento en la predisposición hacia errores psicológicos. En muchos casos, se origina en un estilo de liderazgo de alta carga de tareas/baja relación. Desafortunadamente, RCM no puede hacer mucho sobre este problema.

Sin embargo, lo que puede hacer RCM es aliviar – cuando no eliminar – la relación hostil que tan a menudo existe entre las personas de operaciones y mantenimiento, como se explicó en la página 272. Esto hace que las personas sean menos propensas a culparse mutuamente por errores, y más abiertas a encontrar soluciones.

Factores psicológicos

Los tres grupos de factores tratados hasta el momento, se relacionan todos con fenómenos externos que causan que la persona cometa un error. Como resultado, son relativamente fáciles de identificar y tratar (aunque algunas veces sea costoso hacerlo). Una categoría de errores mucho más compleja y desafiante son aquellas que encuentran sus raíces en la psiquis de los propios humanos. En consecuencia, estos factores psicológicos se discuten con más detalle en la próxima sección de este apéndice.

Errores psicológicos

Reason[1991] divide las categorías psicológicas de errores humanos en aquellos que son no intencionales y aquellos que son intencionales. Un error no intencional es uno que ocurre cuando alguien hace la tarea que debe hacer, pero la hace incorrectamente ("hace la tarea mal"). Un error intencional ocurre cuando alguien deliberadamente establece hacer algo, pero lo que hace es inapropiado ("hace la tarea equivocada"). Reason subdivide estas dos categorías de la siguiente manera:

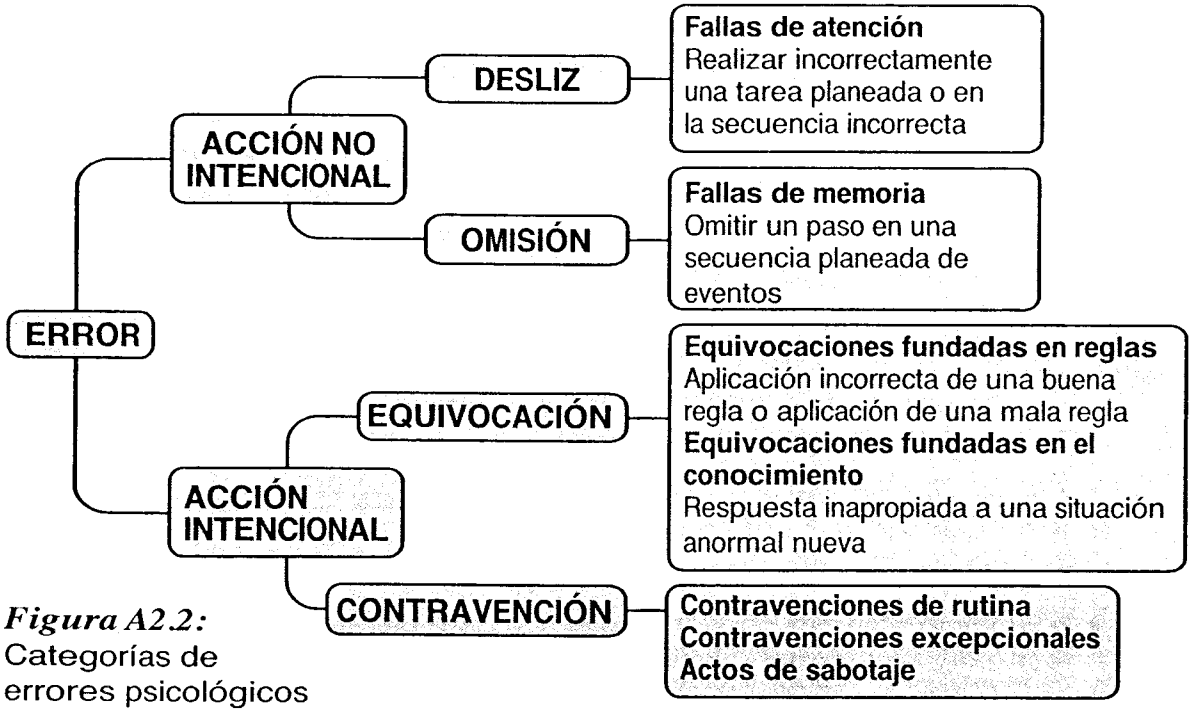


Figura A2.2: Categorías de errores psicológicos

- los errores no intencionales se subdividen en deslices y omisiones
- los errores intencionales se subdividen en equivocaciones y contravenciones.

Estas categorías son ilustradas en la figura A2.2 y se explican brevemente en los próximos párrafos.

Deslices y omisiones

Los deslices y omisiones también se conocen como errores *basados en la habilidad*. Ocurren cuando alguien que está totalmente capacitado para hacer un trabajo – y quien pudo haberlo hecho muchas veces en el pasado – hace incorrectamente el trabajo. Los *deslices* ocurren cuando alguien hace algo incorrectamente (por ejemplo, si un electricista conecta un motor incorrectamente, causando que marche en sentido inverso). Las *omisiones* ocurren cuando alguien saltea un paso clave en una secuencia de actividades (por ejemplo, si un mecánico olvida una herramienta luego de trabajar en una máquina u olvida colocar un componente clave cuando la arma.)

La mayoría de estos errores pasan porque la persona en cuestión fue distraída, estaba preocupada o simplemente estaba 'ausente mentalmente'. Como resultado son impredecibles, aunque la probabilidad aumenta si la persona está trabajando en un ambiente físicamente hostil, o si la tarea es muy compleja. Sin embargo, si el ambiente es razonablemente benigno y la tarea es relativamente simple, tal vez esta categoría sea la única donde es justo describir el error humano como la causa raíz de la falla.

Se puede reducir la probabilidad de una gran cantidad de deslices y descuidos si los operadores y mantenedores son involucrados directamente en el proceso RCM (especialmente el AMFE). Esto les da una comprensión mucho más amplia y profunda de los efectos y consecuencias de sus acciones, lo que resulta en una mayor motivación para hacer el trabajo 'bien la primera vez'. Esto se aplica especialmente a tareas donde es probable que las consecuencias de la falla sean severas.

Otra forma de ver a los deslices que ocurren durante el armado está basado en la presunción de que si algo puede montarse mal, se montará mal. El remedio es volver al 'tablero de dibujo' y:

- rediseñar los sistemas de tal modo que puedan ensamblarse solamente en la secuencia correcta
- rediseñar componentes individuales de tal modo que sólo puedan instalarse en el sentido correcto y en el lugar correcto.

Esta es la esencia del concepto japonés *poka yoke* ('a prueba de error'). Idealmente esta filosofía debe aplicarse a diseños originales más que a mejorar los activos existentes, porque por lo general es más económico construir inicialmente bajo buenas prácticas que modificar una mala práctica más tarde.

Equivocaciones 1: equivocación fundada en la regla

Las equivocaciones fundadas en la regla ocurren cuando las personas creen que están siguiendo el curso de acción correcto al hacer la tarea (en otras palabras, aplicando una 'regla'), pero en realidad el curso de acción es inapropiado. Las equivocaciones fundadas en la regla se subdividen en: *mala aplicación de una buena regla* y *aplicación de una mala regla*.

En el primer caso, bajo un conjunto de condiciones dadas, una persona selecciona un curso de acción que parece apropiado, generalmente porque ha sido exitoso resolviendo condiciones similares en el pasado – de allí el término 'buena regla'. Sin embargo, la existencia de ciertas variaciones sutiles en esta ocasión significa que el curso de acción, emprendido deliberadamente, es incorrecto.

Por ejemplo, un sistema protegido puede estar diseñado de tal modo que la presión excesiva cause que se active una alarma y se encienda una luz de advertencia. Sin embargo, puede surgir un problema cuando la alarma está averiada, la presión aumenta y la luz se enciende. La ausencia de la alarma puede llevar al operador a creer que la luz de advertencia por sí sola es una falsa alarma, especialmente si tiene una historia de fallas ficticias. En este caso, el operador pudo elegir no tomar acción hasta que la luz fuera reparada – un curso de acción que ha sido apropiado en el pasado. En esta ocasión sin embargo, hacer esto no es lo correcto.

El ejemplo descripto indica la aplicación de una mala norma. El curso de acción elegido es lisa y llanamente incorrecto.

Un ejemplo clásico de una mala norma es un programa de mantenimiento que programa tareas de reparaciones a intervalos fijos para tratar modos de falla que se ajustan a los patrones de falla E o F (ver figura 1.5 o 12.1). Especialmente en el caso del patrón F, una acción que es proyectada para mejorar la confiabilidad en realidad lo empeora, alterando un sistema estable e induciendo mortalidad infantil.

En estos casos, 'la causa raíz' de la falla es la regla en sí o el proceso por el cual se selecciona. Si la regla es establecida o seleccionada por alguien distinto a la persona que hace la tarea – en otras palabras, si la persona que hace la tarea sólo sigue órdenes – entonces la equivocación fundada en la regla es en realidad el efecto de otra falla.

El proceso RCM ayuda a *reducir la posibilidad de aplicar reglas incorrectas* de dos maneras:

- el análisis minucioso de los efectos de falla, especialmente de lo que puede suceder si una función oculta se encuentra en estado de falla cuando se la requiere, hace que las personas sean menos propensas a precipitarse a conclusiones inapropiadas cuando surge la situación (especialmente si han sido involucrados en el proceso RCM)
- mediante la concentración en las funciones y mantenimiento de los dispositivos de protección, el proceso RCM reduce significativamente la probabilidad que estos dispositivos se encuentren en estado de falla.

También se reduce la probabilidad de desarrollar malos hábitos si se tiene el cuidado de identificar modos de falla que dan lugar a alarmas ficticias durante el AMFE, y en consecuencia tomar medidas para reducirlas a un mínimo. (En los casos donde la frecuencia y/o las posibles consecuencias de una falsa alarma lo justifican, generalmente el remedio más apropiado implica rediseño.)

RCM ayuda a reducir la posibilidad de aplicar reglas incorrectas porque todo el proceso RCM se trata sobre definir las 'reglas' más adecuadas para mantener un activo.

Por supuesto, debe tenerse cuidado para asegurar que las reglas del mismo RCM no sean mal aplicadas. Esto se hace del mejor modo asegurando que todos los involucrados en la aplicación de RCM son adecuadamente formados en los principios fundamentales.

Equivocaciones 2: Equivocaciones fundadas en el conocimiento

Las equivocaciones fundadas en el conocimiento ocurren cuando una persona enfrenta una situación que no ha ocurrido antes y que no ha sido anticipada (en otras palabras, una para la cual no hay 'reglas'). En situaciones como estas, la persona tiene que tomar una decisión sobre el curso de acción apropiado, y si la decisión es incorrecta ocurre la equivocación.

En la práctica, el autor ha encontrado un problema común que ocurre en este contexto: la creencia de parte de los jefes e ingenieros que "yo sé, por lo tanto mi compañía sabe". En realidad, si ocurre una crisis a altas horas de la noche donde todo el personal superior esta fuera del lugar de trabajo, el conocimiento que se tiene es inútil si no está en la mente de la persona que tiene que tomar las primeras medidas para encargarse de la crisis.

Esto sugiere que el primer modo y más obvio de evitar las equivocaciones fundadas en el conocimiento es mejorar el conocimiento *de las personas que tienen que tomar las decisiones*. En la mayoría de los casos, estas personas son los operadores y mantenedores. Es probable que los operadores y mantenedores tomen decisiones apropiadas más a menudo si comprenden claramente cómo funciona el sistema (sus funciones), qué puede andar mal (fallas funcionales y modos de falla), y los síntomas de cada falla (efectos de falla). Como se mencionó varias veces en los capítulos 2, 13 y 14, esta comprensión se mejora significativamente si los operadores y mantenedores son involucrados directamente en el proceso RCM. Los hallazgos más importantes pueden ser diseminados subsecuentemente a las personas que no participaron en el análisis mediante la incorporación de los hallazgos en programas de formación.

Si fuera necesario, la posibilidad de equivocaciones fundadas en el conocimiento también puede reducirse mediante el diseño (o rediseño) de sistemas de manera que:

- minimicen la complejidad y por lo tanto haya menos que saber
- minimicen la novedad, ya que las tecnologías nuevas y extrañas colocan a las personas en el piso de la curva de aprendizaje, donde es más probable que ocurran las equivocaciones
- evitar uniones ajustadas. Esto significa diseñar sistemas de modo tal que si ocurriesen las fallas, las consecuencias se desarrollen paulatinamente como para dar tiempo a las personas a pensar y por lo tanto tener una mayor oportunidad para tomar decisiones correctas.

Contravenciones

Una contravención ocurre cuando alguien comete un error deliberadamente. Las contravenciones se dividen en tres categorías:

- *contravención rutinaria*. Por ejemplo, cuando las personas tienen el hábito de no usar indumentaria de protección (tal como cascos) a pesar de que las reglas establecen claramente que lo deben usar
- *contravenciones excepcionales*. Por ejemplo, si alguien que sabe que debe usar el casco y que generalmente lo usa sale deprisa sin él "porque no lo pudieron encontrar y no tuvieron tiempo de buscarlo"
- *sabotaje*. Esto ocurre cuando alguien maliciosamente causa la falla.

El remedio para las contravenciones rutinarias o excepcionales generalmente consiste en que los superiores hagan cumplir las reglas. Sin embargo, una vez más, el involucrar a las personas en el proceso RCM les da una clara comprensión de la necesidad de respetar los procedimientos de seguridad y de los riesgos que están corriendo si los trasgreden. El control del sabotaje está más allá del alcance de este libro.

Conclusión

Las conclusiones más importantes a obtener de este apéndice son que:

- no todos los errores humanos son necesariamente culpa de la persona que comete el error. En muchos casos, el error es forzado por circunstancias externas o por reglas inapropiadas. Por lo tanto si se tiene que adjudicar la culpa por algún error, se debe tener cuidado de identificar el verdadero origen.
- el error humano es por lo menos una razón tan común como el deterioro (o más) por la cual fallan los equipos en hacer lo que los usuarios quieren que haga. Por lo tanto, debe tratarse como parte del proceso RCM, considerándolo como un *modo de falla* cuando es una causa raíz, o como un *efecto de falla* cuando consiste en respuestas inadecuadas a otras fallas
- en el contexto industrial, sólo es posible dominar el error humano si las personas involucradas en cometer los errores son involucradas directamente en la identificación de los mismos y en el desarrollo de soluciones adecuadas.

Apéndice 3:
Una Función Continua de Riesgo

En el Capítulo 5 sugerimos la posibilidad de formar un cuadro de riesgos tolerables que combine riesgos de seguridad y riesgos económicos en una función continua. Esto podría hacerse combinando de alguna manera las Figuras 5.2 y 5.14.

La Figura 5.14, que se repite a continuación como la Figura A3.1, muestra lo que una organización debe decidir que puede tolerar para *un* evento que solamente tiene consecuencias económicas.

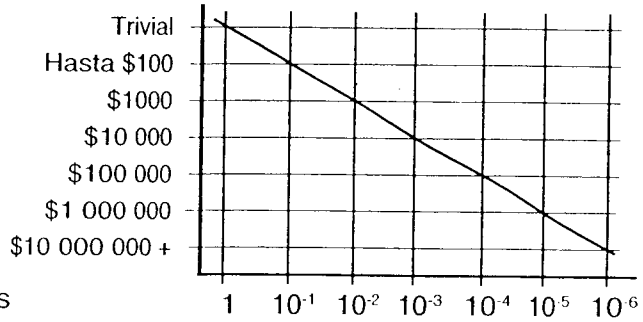


Figura A3.1:
Tolerabilidad de riesgos económicos

En la Figura 5.2 se representa lo que un individuo podría estar preparado a tolerar en una situación específica para *cualquier* evento que podría resultar fatal en dicha situación, como se resume en la Figura A3.1.

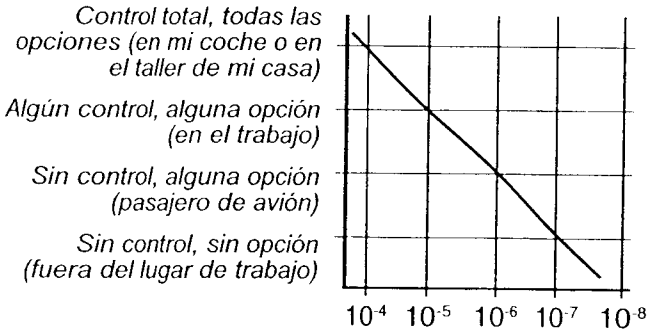


Figura A3.2:
Tolerabilidad de riesgo fatal

En realidad, estos dos gráficos no pueden ser combinados de manera directa, ya que la Figura A3.1 está basada en la probabilidad de un solo evento mientras que la Figura A3.2 grafica lo que un individuo debe considerar tolerable para cualquier evento. Sin embargo, respecto a lo último, la parte 3 del Capítulo 5 muestra que es posible usar lo que un individuo tolera para *cualquier* evento en una situación dada como base para decidir que probabilidades se aplican a cada evento que pueda situarlo en esa situación de riesgo:

El primer paso es convertir lo que una persona tolera como guarismo general para todo el lugar de trabajo en su conjunto. En otras palabras, si acepto una probabilidad de 1 en 100 000 (10^{-5}) de resultar muerto durante el trabajo en cualquier año y tengo

1 000 compañeros que todos comparten el mismo punto de vista, luego todos nosotros toleramos que en promedio 1 persona en nuestro lugar de trabajo resultara muerta en cualquier año cada 100 años - y esa persona puedo ser yo, y puede ocurrir este año.

El próximo paso es traducir la probabilidad que yo mismo y mis compañeros estamos dispuestos a tolerar que cualquiera de nosotros pueda resultar muerto por *cualquier* evento durante el trabajo, en una probabilidad tolerable para cada evento particular (modo de falla o falla múltiple) que pueda matar a alguien.

Por ejemplo, siguiendo la lógica del ejemplo anterior, la probabilidad de que cualquiera de mis 1.000 compañeros resulte muerto en cualquier año es 1 en 100 (asumiendo que todos enfrentan aproximadamente los mismos peligros en su lugar de trabajo). Más aún, si las actividades realizadas en el lugar manifiestan (digamos) 10.000 eventos que pueden matar a alguien, entonces la probabilidad promedio de que cada evento individual pueda matar a alguien, debe ser reducida a 10^{-6}. Esto significa que la probabilidad de que un evento que pueda aniquilar diez personas debe reducirse a 10^{-7}, mientras que la probabilidad de que un evento que tiene una posibilidad de 1 en 10 de aniquilar a una persona debe ser reducida a 10^{-5}. En un lugar que está dividido en varias áreas y donde a su vez cada área está subdividida en varios sectores, el proceso de subdividir probabilidades de riesgo tolerables puede llevarse a cabo por niveles, como se ve en la Figura A3.3.

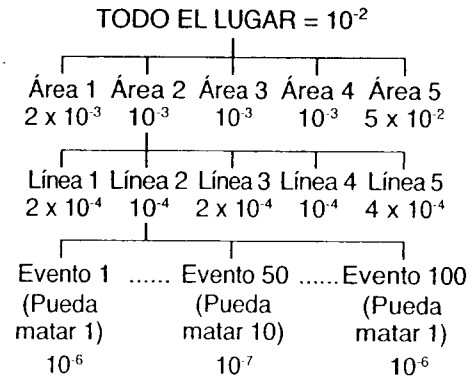


Figura A3.3: Desde todo el lugar a un evento

En el ejemplo, un evento puede ser:

- *un solo modo de falla* (como está definido en el AMFE) que en sí mismo tiene consecuencias fatales. La probabilidad asignada a este tipo de evento define el 'nivel tolerable' al cual se refiere el proceso RCM cuando hace la pregunta "¿Reduce esta tarea la probabilidad de falla a un nivel tolerable?". Ver página 106.
- una *falla múltiple* donde un sistema falla y el dispositivo de seguridad que debería haber hecho al sistema no letal, también está en estado de falla. La probabilidad asignada a este tipo de evento define el 'nivel tolerable' al cual se refiere el proceso RCM cuando pregunta "¿Reduce esta tarea la probabilidad de la falla múltiple a un nivel tolerable?". Ver página 126. También es la probabilidad utilizada para establecer M_{FM} cuando se establecen los intervalos de búsqueda de fallas. Ver página 183.

En sistemas complejos, es posible utilizar una aproximación similar a un

análisis de árbol de fallas para asignar probabilidades (ver Andrew y Moss[1993]). Sin embargo, en este caso, trabajamos *hacia abajo* desde una probabilidad de un evento superior (la probabilidad de un accidente fatal en cualquier lugar del sitio) para establecer los objetivos para cada tarea proactiva orientada a la seguridad y para determinar intervalos de búsqueda de fallas, más que *hacia arriba* donde, para determinar la probabilidad del evento superior, nos basamos en el programa de mantenimiento existente.

El examen detallado de los árboles de falla está fuera del alcance de este libro. El propósito de este Anexo es solamente sugerir como sería posible convertir los riesgos que los miembros individuales de la sociedad estarían preparados a tolerar (otra manifestación de 'función deseada') en información totalmente válida que pueda ser usada para establecer un programa de

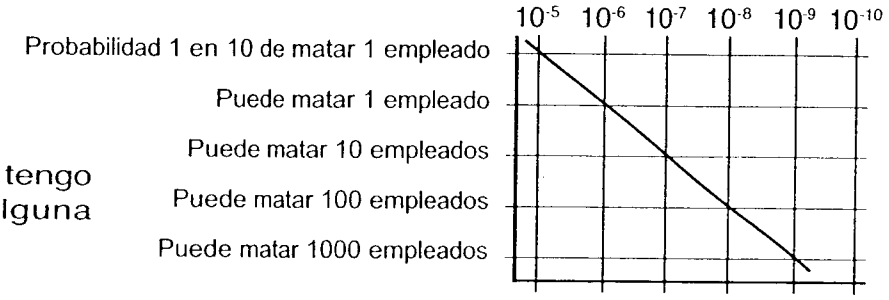


Figura A3.4:
Tolerabilidad de un evento fatal donde tengo algún control y alguna opción

mantenimiento diseñado para suministrar esa función.
El proceso descripto anteriormente puede ser utilizado para hacer un gráfico que muestre la probabilidad de que un evento fatal individual en el lugar de trabajo que se deduce desde los riesgos que un individuo está dispuesto a tolerar, asumiendo que su juicio es aceptado por todos los demás en el lugar. Esto se ilustra en la Figura A3.4. Note que en los próximos cuatro gráficos, el eje X representa la probabilidad de que ocurra cualquier evento en cualquier año, (o más precisamente, la tasa de falla anual.)

El mismo proceso puede ser aplicado a la situación donde las posibles víctimas no tienen control pero sí alguna elección de exponerse al riesgo. El ejemplo de la Figura A3.2 sugiere que un pasajero de aerolínea puede ser un ejemplo típico de alguien en esta situación. Desde punto de vista del

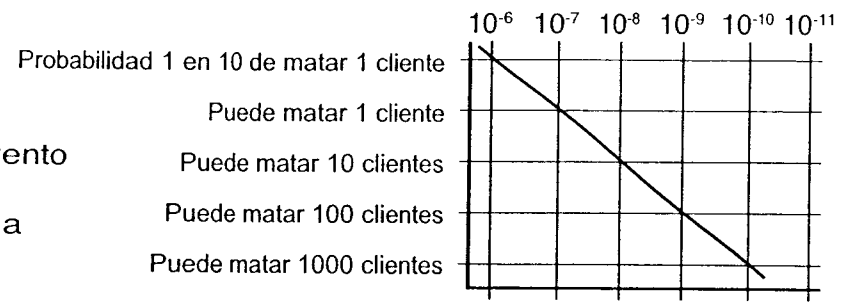


Figura A3.5:
Tolerabilidad de un evento fatal donde no tengo ningún control y alguna opción

mantenimiento, es factible que esa gente sea usuaria de sistemas de transporte masivos, o gente visitando grandes edificaciones (shoppings, oficinas, estadios deportivos, teatros y demás). En general, podríamos definir a esta gente como 'clientes'.
En este caso, si todos ellos toleran el mismo riesgo que el individual definido en la Figura A3.2 (y existe la misma cantidad de eventos potenciales inherentes al sistema que amenacen la vida), el proceso para fraccionar el riesgo mostrado en la Figura A3.3 puede llevar a las probabilidades de un evento individual mostrado en la Figura A3.5.

Un razonamiento similar aplicado al escenario sin control/sin opción debe

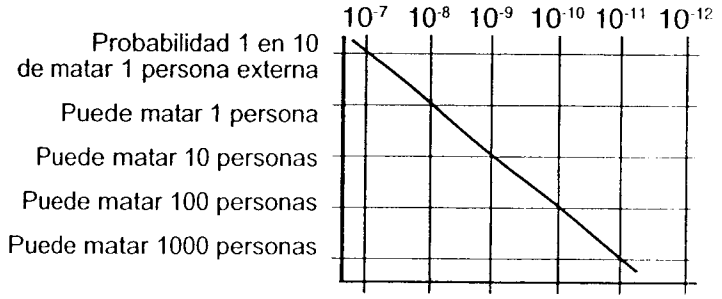


Figura A3.6: Tolerabilidad de un evento fatal donde no tengo ningún control y ninguna opción

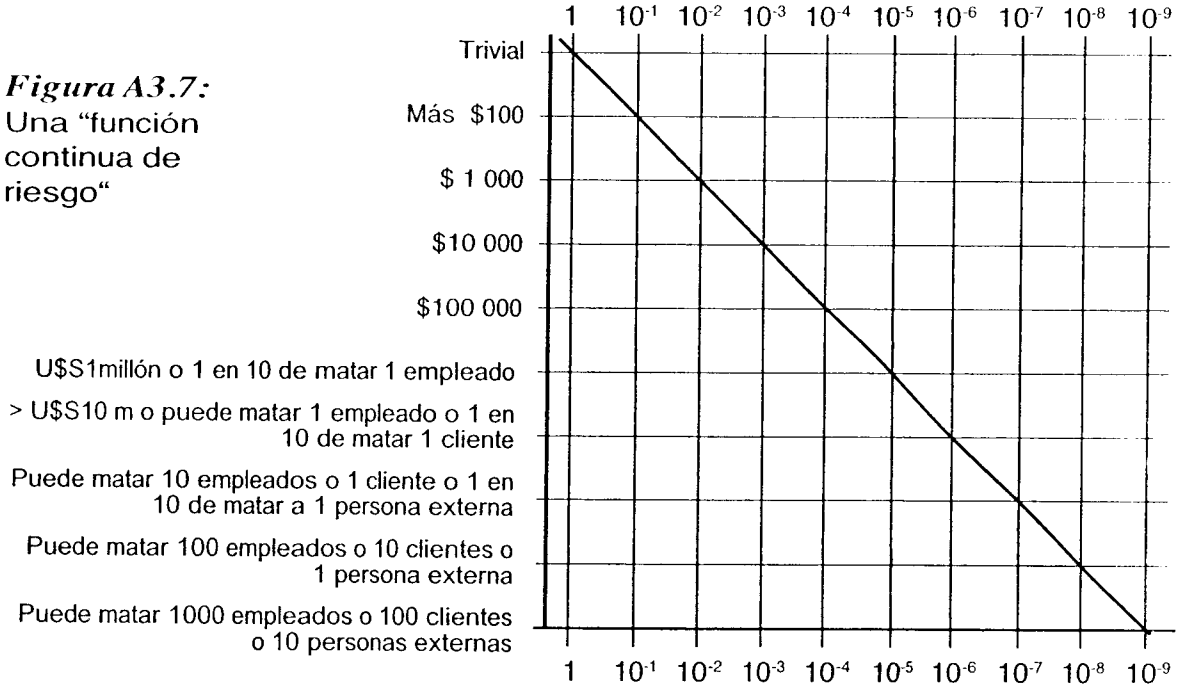


Figura A3.7: Una "función continua de riesgo"

resultar en las probabilidades de un solo evento mostrado en la figura A3.6. (En la práctica, la mayoría de los individuos están propensos a tolerar una probabilidad menor de resultar muertos por esta razón que lo representado en la Figura A3.2 - el llamado factor 'pánico'. Sin embargo, en la mayoría de las

plantas, existen pocos eventos que pueden tener consecuencias externas, por lo tanto la probabilidad por cada evento debería terminar casi igual.)

Una vez que las probabilidades tolerables han sido determinadas para eventos individuales como se ve en la Figura A3.1, A3.4, A3.5 y A3.6, es posible combinarlas en una única 'función continua de riesgo', como se ve en la Figura A3.7.

Por favor note una vez más que estos valores no son prescriptivos y tampoco reflejan necesariamente el punto de vista del autor u otra organización o individuo de qué es lo que debería o no debería ser tolerable.

La Figura A3.7 tampoco intenta insinuar que 1 empleado vale U$S 10 millones. Ese número representa un punto donde coinciden dos sistemas de valoración diferentes. Los riesgos financieros que *su* organización desea tolerar y los riesgos personales que *sus* empleados y clientes (y la sociedad entera en el caso de peligros sin control/sin opción) están dispuestos a tolerar, puede conducirlos a un grupo de valores completamente distintos en su contexto operacional.

El punto clave es que el criterio sobre el que se basa toda la filosofía RCM, es en lo que es *tolerable*, no lo que es practicable o lo que es norma común en la industria (aunque puedan coincidir). La Parte 3 del Capítulo 5 sugiere que la gente que moralmente y prácticamente está en la mejor posición para decidir lo que es tolerable, son las posibles víctimas. Dichas personas son los accionistas y sus representantes en el caso de riesgos financieros, y empleados, clientes y los superiores que tienen que dar explicaciones posteriormente (y cargar con la responsabilidad) en el caso de riesgos personales. Como se mencionó anteriormente, este apéndice muestra una manera con la cual podría ser posible transformar los consensos formados sobre riesgos tolerables, en un marco de trabajo para definir las metas de los programas de mantenimiento diseñados para cumplirlas.

Para finalizar, por favor tenga en cuenta que la metodología explicada en este apéndice no intenta ser prescriptiva. Si usted tiene acceso a otro marco de trabajo que satisfaga a todas las partes involucradas, entonces utilícelo sin dudarlo.

Apéndice 4: Técnicas de Monitoreo de Condición

1 Introducción

En el Capítulo 7 se explicó extensamente que la mayoría de los fallos dan alguna advertencia de que están ocurriendo o a punto de ocurrir. Esta advertencia se llama fallo potencial, y se define como: una condición física identificable que indica que un fallo funcional está a punto de ocurrir o está en proceso de ocurrir. Por otro lado, un fallo funcional se define como: la incapacidad de un elemento físico de desempeñar las prestaciones deseadas.

Las técnicas para detectar los fallos potenciales se conocen como tareas de mantenimiento a condición, porque los elementos se chequean y dejan en servicio a condición de que desempeñen las prestaciones deseadas. La frecuencia de estos chequeos está determinada por el intervalo P-F, que es el intervalo entre el surgimiento del fallo potencial y su deterioro a un fallo funcional.

Las técnicas de mantenimiento básicas "a condición" han existido desde siempre, en la forma del sentido humano (vista, oído, tacto y olfato). Como se explica en el Capítulo 7, la ventaja de usar a las personas para esto, es que pueden detectar una amplia gama de condiciones de fallos potenciales usando estos cuatro sentidos. Sin embargo, las desventajas son que los chequeos hechos por los humanos son relativamente imprecisos y los intervalos P-F son normalmente muy cortos.

Cuanto antes pueda detectarse el fallo potencial, más largo será el intervalo P-F. Los intervalos P-F largos también significan que los chequeos se tienen que realizar con menor frecuencia y/o que habrá más tiempo para tomar la acción necesaria para evitar las consecuencias del fallo. Por ello, se ha empleado un gran esfuerzo en tratar de definir las condiciones de los fallos potenciales y desarrollar las técnicas de detección que den los intervalos P-F más largos posibles.

No obstante, la Figura A4.1 muestra que un intervalo P-F más largo significa que el fallo potencial debe ser detectado en un punto más alto de la curva P-F. Pero cuanto más alto nos movamos en dicha curva, tendremos menores desviaciones respecto de la condición "normal", especialmente si en sus últimas fases el deterioro no es lineal. Cuanto menor sea la desviación, más sensible debe ser la técnica de monitoreo designada para determinar el fallo potencial.

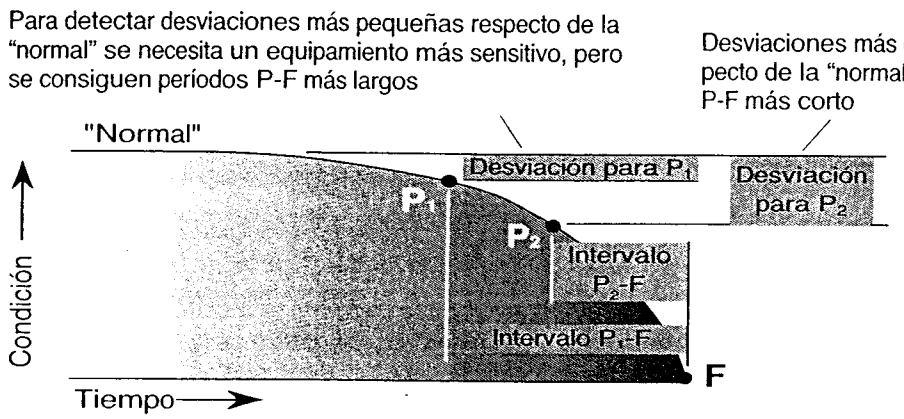


Figura A4.1: Intervalos P-F y desviaciones de las condiciones "normales"

2 Categorización de las técnicas de Monitoreo de Condición

La mayoría de las pequeñas desviaciones tienden a estar más allá del rango sensitivo humano y sólo pueden ser detectadas por instrumentos especiales. En otras palabras, se utiliza un equipo para monitorear la condición en la que se encuentra otro equipo, por esto este tipo de técnicas se llama monitoreo de condición. Este nombre las distingue de otros tipos de mantenimiento "a condición" (monitoreo de performance, variaciones de calidad y los sentidos humanos).

Como se ha mencionado en el Capítulo 7, las técnicas de monitoreo de condición no son más que versiones altamente sensibles de los sentidos humanos. Reaccionan a los síntomas de un fallo potencial (ruido, olor, etc.) de la misma manera que los sentidos humanos, con lo que las técnicas de monitoreo de condición son diseñadas para detectar síntomas específicos (vibración, temperatura, etc.). Buscando la simplicidad, estas técnicas son clasificadas de acuerdo a los síntomas que monitorea (o efectos del fallo potencial), como se muestra a continuación:

- *Efectos dinámicos:* El monitoreo dinámico detecta los fallos potenciales (especialmente aquellos que están asociados con equipos rotativos) que causan cantidades anormales de energía que se emite en la forma de ondas tales como vibración, pulsaciones y efectos acústicos.
- *Efectos de partícula:* El monitoreo de partículas detecta los fallos potenciales que causan que se desprendan al ambiente partículas de diferentes tamaños y formas
- *Efectos químicos:* El monitoreo químico detecta fallos potenciales que causan que se desprendan cantidades mensurables de elementos químicos al ambiente
- *Efectos físicos:* Los efectos de los fallos físicos abarcan cambios en la apariencia física o estructura del equipo que se pueden detectar directamente. Las técnicas de monitorización asociadas detectan los fallos potenciales en forma de grietas, roturas, efectos visibles del desgaste y los cambios de dimensiones

- *Efectos de temperatura:* Las técnicas de monitoreo de temperatura buscan fallos potenciales que causan un aumento de la temperatura del equipo en sí (en lugar de un aumento en la temperatura del material que se está procesando con el equipo)
- *Efectos eléctricos:* Las técnicas de monitoreo eléctrico buscan cambios en la resistencia, conductividad, tensión y resistencia dieléctrica.

Se han desarrollado una variedad enorme de técnicas y constantemente están apareciendo más, por lo que resulta imposible producir una lista exhaustiva de todas las técnicas disponibles que esté totalmente actualizada. Este apéndice provee un sumario muy breve de 96 de las técnicas actualmente disponibles. Algunas de éstas son muy conocidas y están fuertemente establecidas, mientras que otras están en su infancia o todavía en la etapa de desarrollo.

De cualquier modo, debe evaluarse con el mismo rigor que cualquier otra tarea a condición, si en el contexto operacional dado, cualquiera de éstas técnicas es posible de realizar y si vale la pena o no hacerse. Para ayudar en este proceso, este apéndice lista lo siguiente para cada técnica:

- Las condiciones de fallo potencial con la técnica diseñada para detectarlo (monitoreo de condiciones)
- Para qué está diseñado el equipo (las aplicaciones)
- Los intervalos P-F que por lo general están asociados con la técnica (intervalo P-F) – por razones obvias esto sólo será una aproximación para tener cierta referencia.
- Cómo funciona (funcionamiento)
- El entrenamiento y/o el nivel de destreza necesario para aplicar la técnica (destreza)
- Las ventajas de la técnica (ventajas)
- Las desventajas de la técnica (desventajas)

Finalmente, antes de considerar cualquier técnica específica, vale la pena notar que hoy día se le está prestando gran atención al Monitoreo de Condición. A causa de su novedad y complejidad, muchas veces se lo pondera como si estuviera completamente separado de cualquier otro aspecto del mantenimiento programado. Sin embargo, no debemos perder de vista el hecho que el Monitoreo de Condición es solamente una forma de mantenimiento Proactivo. Cuando se aplica, siempre que sea posible debe ser incorporado a los programas de rutina y a los sistemas de planificación normales, evitando costosos sistemas paralelos.

3 Monitoreo Dinámico

Un Comentario Preliminar sobre Análisis de Vibraciones

Un equipamiento que contiene partes móviles, vibra bajo una gran variedad de frecuencias. Dichas frecuencias son gobernadas por la naturaleza de las fuentes de vibración y pueden variar dentro de un rango o espectro muy amplio. Por ejemplo, las frecuencias de vibración asociadas a una caja reductora incluyen las frecuencias

primarias (y sus armónicas) causadas por la rotación de los ejes, las frecuencias del contacto entre los dientes de los diferentes juegos de engranajes, las frecuencias de la rodadura de las bolillas de los engranajes, etc. Si alguno de estos componentes comienza a fallar, cambia su vibración característica, por lo que un análisis de vibración consiste en detectar y analizar dichos cambios.

Esto se hace midiendo cuánto vibra el ítem como un todo, y luego usando técnicas de análisis de espectro para identificar la frecuencia de vibración de cada componente individual para poder distinguir cuando algo está cambiando.

Sin embargo, la situación es complicada por el hecho que es posible medir tres características diferentes de la vibración. Estas son: amplitud, velocidad y aceleración. Entonces el primer paso será decidir cuáles de estas características se medirá (y qué elemento de medición se utilizará) y luego como segundo paso decidir qué técnica se usará para analizar la señal generada por el elemento de medición (o sensor). En general, los sensores de amplitud (o desplazamiento) son más sensitivos a bajas frecuencias, los de velocidad a rangos medios y los acelerómetros a altas frecuencias. Para cualquier frecuencia la potencia de la señal también es influenciada por la proximidad entre la fuente de la señal, a esa frecuencia, y donde están montados los sensores.

Otra característica importante de las vibraciones es la "fase". La "fase" se refiere a la "posición de un componente que se encuentra vibrando en un instante dado, con referencia a un punto fijo o a otro componente que esté vibrando". Como regla, normalmente no se toman las mediciones de fase durante la rutina de medición de vibraciones, pero cuando se ha detectado un problema podría proveer información valiosa (como ser desequilibrio, ejes doblados, desalineación, juegos mecánicos, fuerzas alternativas, y poleas y engranajes excéntricos).

El "análisis de Fourier", también juega un papel importante en el análisis de vibraciones. Fourier descubrió que toda curva de vibración compleja (nivel en función del tiempo) puede ser descompuesta como un conjunto de curvas sinusoidales simples (cada una con su propia frecuencia y amplitud). Por lo tanto haciendo un "análisis de Fourier", una onda compleja puede ser descompuesta en diversos niveles (amplitudes) dentro de una variedad de frecuencias. En efecto, la variación de nivel en función del tiempo se transforma en una representación de amplitud constantemente cambiante en función de la frecuencia. El proceso por el cual se hace esto se llama actualmente "Transformada Rápida de Fourier" (Fast Fourier Transform – FFT).

El rol de los sistemas expertos en análisis de vibraciones están perdiendo vigencia rápidamente. Ahora algunos sistemas pueden encontrar y diagnosticar problemas tan consistentemente como los sistemas más experimentados de análisis de vibraciones. Estos sistemas ahorran mucho tiempo y también permiten a los usuarios comparar las lecturas con la información completa de mediciones previas.

El resto de esta parte del capítulo muestra con mayor profundidad los análisis de vibraciones.

3.1 Análisis de Vibración de Banda Ancha

Condiciones observadas: Cambios en las frecuencias causados por desgaste, fatiga, desbalanceo, desalineación, aflojamiento mecánico, turbulencia, etc.

Aplicaciones: Ejes, cajas reductoras, correas de transmisión, compresores, motores, rodamientos, motores eléctricos, bombas, turbinas, etc.

Intervalo P-F: Advertencia limitada de fallo

Funcionamiento: Un sistema de análisis de vibraciones de banda ancha básicamente consiste de dos partes: un sensor que se monta en el lugar donde se realiza la medición para convertir las vibraciones mecánicas en una señal eléctrica y un elemento de medición y visualización que se llama medidor de vibración, el que es calibrado en unidades vibracionales. Monitorea la vibración del equipo en conjunto y provee una información básica para chequear o dirigir el monitoreo. Es un valor simple y en principio se ajusta más a una onda sinusoidal simple que a una onda compleja. Tales instrumentos medidores tienen una respuesta de frecuencia constante por encima de la frecuencia de 20Hz a 1000HZ.

Destreza: Para usar el equipo y registrar la vibración: un operario semi especializado.

Ventajas: Puede ser muy efectivo detectando desbalanceos considerables en equipos rotativos. Lo puede usar personal que no tenga experiencia. Es barato y compacto. Puede ser portátil o estar instalado permanentemente. Mínima entrada de datos en el sistema. La interpretación y evaluación puede basarse en publicaciones sobre criterios de aceptación de la condición tal como la VDI 2056 de Alemania.

Desventajas: El análisis de vibraciones de banda ancha da poca información de la naturaleza del fallo. Los picos producidos por el fallo potencial en los espectros iniciales son muy bajos y afectan muy poco a la vibración de todo el equipo. Cuando dichos picos son significativos, normalmente el equipo se encuentra en un estado de deterioro avanzado. Es difícil fijar los niveles de alarma. Carece de sensibilidad.

3.2 Análisis de la Banda Octava

Condiciones observadas y aplicaciones: Como para la vibración de banda ancha

Intervalo P-F: De días a semanas dependiendo de la aplicación

Funcionamiento: Se divide el espectro de la frecuencia en series de bandas de interés utilizando filtros contiguos fijos de octava y fraccionarios; dichas frecuencias tienen una anchura constante cuando se trazan de forma logarítmica. La media de las salidas resultantes de cada filtro se mide sucesivamente, y los valores se representan visualmente en un aparato medidor o se trazan en un registrador.

Destreza: Para operar el equipo e interpretar los resultados: un técnico debidamente entrenado.

Ventajas: Fácil de usar cuando los parámetros de medición han sido determinados previamente por un ingeniero: Portátil: Relativamente económico: Tiene buenas capacidades de detección utilizando filtros de octava: El registrador provee un registro permanente.

Desventajas: Da una información limitada para realizar diagnósticos: La habilidad del diagnóstico también está limitada por la escala de frecuencia logarítmica: Tiempo para el análisis relativamente largo.

3.3 Análisis de Ancho de Banda Constante

Condiciones observadas: Cambios en las características de vibración causados por desgaste, fatiga, desbalanceo, desalineación, aflojamiento mecánico, turbulencia, etc. y para identificar armónicas múltiples y bandas laterales.

Aplicaciones: Ejes, cajas reductoras, correas de transmisión, compresores, motores, rodamientos, motores eléctricos, bombas, turbinas y para el trabajo de desarrollo, diagnóstico, y experimental (especialmente en cajas reductoras).

Intervalo P-F: Normalmente de varias semanas a meses.

Funcionamiento: Un acelerómetro detecta la vibración y la convierte en una señal eléctrica que es amplificada, pasado por un filtro de banda ancha para luego alimentar un analizador. Las bandas tienen un ancho constante entre 3,16 Hz y 100HZ, y una gama de frecuencia de entre 2Hz y 200Hz. Pueden seleccionarse barridos de frecuencias lineales y logarítmicas, pero para identificar armónicas se opta por los lineales. Para analizar más detalladamente las crestas, se pueden cambiar los anchos de banda y las gamas de frecuencia para adaptarlos a los requerimientos.

Destreza: Para operar el equipo: un técnico entrenado de forma apropiada. Para interpretar los resultados: un técnico experimentado.

Ventajas: Fácil de usar cuando los parámetros de medición han sido fijados. Bueno para un amplio rango de frecuencias y para investigaciones detalladas a altas frecuencias. Identifica armónicas múltiples y bandas laterales que ocurren a intervalos de frecuencia constante. Portátil.

Desventajas: Tiempo de análisis relativamente largo. Requiere el análisis de resultados para comprender profundamente las armónicas múltiples y bandas laterales de la máquina.

3.4 Análisis de Ancho de Banda de Porcentaje Constante

Condiciones observadas: Impacto y vibración

Aplicaciones: Ejes, cajas reductoras, correas de transmisión, compresores, motores, rodamientos, motores eléctricos, bombas, turbinas, etc.

Intervalo P-F: Normalmente de varias semanas a meses

Funcionamiento: Se realiza el análisis de la frecuencia de anchura de banda estrecha de alta resolución por medio del barrido a través de la gama de frecuencia deseada (2 Hz a 20kHz) utilizando un filtro de ancho de banda de porcentaje constante (1%, 3%, 6%, 12%, 23%) que separa las frecuencias de armónicas muy próximas entre sí. Un filtro de ancho de banda de porcentaje constante tan estrecha como del 1 % permite que se hagan análisis de resolución muy precisa. Pueden hacerse barridos continuos a través de la gama de frecuencia en tiempo real.

Destreza: Para operar el equipo: un técnico entrenado de forma apropiada. Para interpretar los resultados: un técnico experimentado.

Ventajas: El análisis puede hacerse en "tiempo real" y por consiguiente en más rápido que el análisis de la FFT sin sufrir ciertos tipos de inconvenientes causados por trabajar en lote, como ser la pérdida de datos. El espectro del Análisis de Ancho de Banda de Porcentaje Constante es muy bueno para detectar fallos de manera rápida.

Desventajas: Se requiere de mucha experiencia para interpretar los resultados

3.5 Análisis en Tiempo Real

Condiciones observadas: Señales vibracionales y acústicas: Medición y análisis de choque y señales de perturbación transitoria.

Aplicaciones: Máquinas rotativas, ejes, cajas reductoras, etc.

Intervalo P-F: De varias semanas a meses

Funcionamiento: Se graba una señal en una cinta magnética y se la pasa a través de un aparato analizador de tiempo real. La señal se muestrea y se transforma dentro del dominio frecuencias. Se produce un espectro de ancho de banda constante, medida a 400 intervalos de frecuencia igualmente espaciada a través de una gama de frecuencia seleccionable desde 0-10Hz a 0-20kHz. Se puede seleccionar un modo de alta resolución, y el escaneado también se puede ajustar para que dé un análisis de "movimiento lento", permitiendo observar cualquier cambio ocurrido en el espectro de la banda base a medida que la ventana va pasando.

Destreza: Para hacer funcionar el aparato e interpretar los resultados: un ingeniero experimentado.

Ventajas: Analiza todas las bandas de frecuencia por encima de la gama completa del análisis de forma simultánea: La representación visual instantánea del espectro analizado se actualiza continuamente: No se necesita esperar para las lecturas del registrador de nivel: Adecuado para análisis de señales de corta duración tales como la vibración de perturbación transitoria y las ondas de choque: Los registradores X-Y proveen un registro permanente.

Desventajas: El equipo no es portátil y es muy costoso. Necesita un alto nivel de destreza: Monitoreo fuera de línea.

3.6 Análisis de Forma Temporal de Onda

Condiciones observadas: dientes de engranajes picados, quebrados o rotos, cavitación de bombas, desalineaciones, desajustes mecánicos, excentricidad, etc.

Aplicaciones: Cajas reductoras, bombas, rodamientos a bolilla, etc.

Intervalo P – F: Generalmente de varias semanas a meses

Funcionamiento: Se conecta un osciloscopio a un analizador de vibraciones estándar o a un analizador en tiempo real. Se aplica una señal vibratoria al ingreso vertical del osciloscopio. En el CRT (tubo de rayos catódicos) el eje vertical es

puesto en escala de amplitud y el eje horizontal en escala de temporal como ser segundos o milisegundos. El aumento vertical del osciloscopio se ajusta hasta que coincida el valor máximo o el valor entre picos de la onda mostrados en el CRT con la amplitud que se lee en el medidor de vibración. Cuando una máquina está produciendo una frecuencia simple, la forma de la onda en el tiempo es simplemente una onda senoidal con una tasa de repetición proporcional a la velocidad del equipo. Cuando el equipo genera más de una frecuencia, se genera un gráfico complejo correspondiente a una onda compuesta. Se pueden generar adicionalmente otras frecuencias en forma de pulso, transitorias, golpeteos, moduladoras, etc. las cuales agregan complejidad a la forma de la onda. Para reducir la complejidad de onda, es útil y a veces necesario usar filtros variables de alta, baja o de paso.

Destreza: Se necesita práctica y experiencia considerables para interpretar las formas de onda complejas.

Ventajas: Muy buena para observar desbalanceos, golpeteos lentos, pulsaciones, desalineaciones, ondas senoidales, amplitud modulada, frecuencia modulada, inestabilidades, etc. Muchas veces provee más información que el sólo análisis de frecuencias. La forma de la onda puede usarse para distinguir entre los resultados espectrales de impactos y de ruidos aleatorios.

Desventajas: Por lo general las máquinas que generan frecuencias múltiples también generan ruido, el cual hace que las formas de las ondas en el tiempo resultan ser tan complejas y confusas que dificultan su descomposición en las diferentes partes que las componen. Para examinar una forma de onda que podría tener golpeteos lentos, requiere tomar información durante un período de tiempo extenso.

3.7 Análisis de Promedios de Tiempos Sincrónicos

Condiciones observadas: Desgaste, fatiga, ondas de tensión emitidas como resultado de impacto entre partes metálicas, micro soldaduras, etc.

Aplicaciones: Cajas reductoras, dientes de engranajes, rodamientos a bolilla, ejes, bancos de sopladores, bobinas en una máquina papelera, máquinas rotativas.

Intervalo P – F: Generalmente de varias semanas a meses

Funcionamiento: La mayoría de los sistemas mecánicos rotativos producen una señal levemente variada con cada rotación. (Estadísticamente estas se denominan "estocásticas", en comparación con otras señales que se repiten idénticamente las cuales son "determinísticas"). Cuanto más ajustadas son las tolerancias entre las partes deslizantes y rodantes, menor es la variación, no obstante la variación siempre existe. En muchos sistemas, esta variación puede ser tan grande que enmascare cualquier cambio por fallos que se estén desarrollando. La presencia de ruidos aleatorios puede también confundir la señal. Estos problemas pueden ser superados realizado un control de nivel usando un tacómetro que emita una señal de inicio de captura de datos en el colector de información, exactamente en la misma parte del ciclo de rotación. Se promedian al mismo tiempo un gran número de ciclos o de datos recolectados en un período de tiempo. Aquellas señales que no están

relacionadas con las RPM del eje son descartadas, dejando una onda en tiempo real muy clara de los componentes relacionados solamente con la velocidad de rotación. La forma de la onda promediada puede ser examinada directamente o puede generarse un espectro de la misma. Ésta está libre de ruidos aleatorios y mostrará si una parte del ciclo está cambiando más que otra.

Destreza: Un técnico experimentado que esté entrenado adecuadamente. Se necesita práctica y experiencia considerables para interpretar los resultados.

Ventajas: Pueden analizarse en detalle cajas reductoras – específicamente cada uno de los engranajes individuales -. Muy usado para análisis de equipos que tienen gran cantidad de partes que rotan a casi la misma velocidad.

Desventajas: En máquinas con cojinetes de elementos rodantes debe tenerse cuidado ya que las ondas del cojinete no son sincrónicas con las RPM y serán descartadas.

3.8 Análisis de Frecuencia

Condiciones observadas: Cambios en las características de vibración causadas por fatiga, desgaste, desbalanceo, desalineación, desajuste mecánico, turbulencia, etc.

Aplicaciones: Ejes, cajas reductoras, cintas transportadoras, compresores, motores, rodamientos a bolilla, motores eléctricos, bombas, turbinas, etc.

Intervalo P – F: De varias semanas a meses

Funcionamiento: Se colecta la información proveniente de los puntos de medición en un intervalo de tiempo y se la transforma tanto en el colector de información mismo o en una computadora en una frecuencia característica usando el algoritmo de la Transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform – FFT). El rango de frecuencias de las mediciones requerido depende de la velocidad de la máquina. Cada máquina que tiene partes en movimiento producirá un espectro de frecuencias. Se comparará el espectro característico de una máquina que está en excelentes condiciones con el espectro actual de la misma máquina trabajando en idénticas condiciones de velocidad y carga. Cualquier incremento respecto del espectro característico en más de una desviación estándar en cualquier frecuencia aplicada puede indicar un problema potencial. Una característica del análisis de frecuencia es la "catarata" de las sintonías del FFT. Las cataratas son sintonías tomadas en un mismo punto a lo largo de un intervalo de tiempo, permitiendo determinar la tendencia de las mismas.

Destreza: Un técnico experimentado que esté entrenado adecuadamente. Se necesita práctica y experiencia considerables para interpretar los resultados

Ventajas: El equipamiento para recopilar información es portátil y fácil de usar. Los sistemas expertos de software hacen que la interpretación de la información sea sencilla. Utilizando gráficos en cascada, pueden detectarse con mucha anticipación, pequeños cambios en las condiciones de la máquina.

Desventajas: Los espectros resultantes de impactos y de ruidos al azar, podrían verse muy parecidos.

3.9 Cepstrum

Condiciones observadas: Armónicas y bandas laterales en el espectro de vibración causados por desgaste.

Aplicaciones: rodamientos, ejes, engranajes, engranes, cintas transportadoras, frecuencia de paso de álabes y aspas de bombas y ventiladores.

Intervalo P – F: De varias semanas a meses.

Funcionamiento: Cuando una máquina se desgasta, desarrolla desalineaciones que causan armónicas en las frecuencias de las fuerzas de primer orden, y aparecen frecuencias que se suman y restan de las bandas laterales del espectro de vibraciones. Cepstrum (se pronuncia "kepstrum") separa efectivamente las armónicas y bandas laterales que se presentan en el espectro con lo que pueden individualmente marcar una tendencia en función del tiempo. En pocas palabras cepstrum podría definirse como el FFT del espectro logarítmico que se obtiene del FFT "un espectro del espectro".

Destreza: Un entendimiento profundo del comportamiento de la máquina (armónicas y bandas laterales) y un software experto.

Ventajas: Pueden analizarse armónicas y bandas laterales que por lo general se solapan en máquinas bastante complejas. Las bandas laterales son fáciles de encontrar en el espectro de los rodamientos. Puede ser operada con algunos sistemas de software expertos.

Desventajas: Se necesita pericia y experiencia para interpretar las armónicas y bandas laterales.

3.10 Demodulación de la Amplitud

Condiciones observadas: tonos de rodadura enmascarados por ruidos, grietas en las pistas de los rodamientos, engranajes excéntricos o dañados, desajustes mecánicos.

Aplicaciones: Turbinas de vapor, rodamientos y cajas reductoras, componentes rodantes de baja velocidad de máquinas papeleras, máquinas alternativas, etc.

Intervalo P – F: De varias semanas a meses

Funcionamiento: La señal análoga de aceleración (en el tiempo de dominio) está sujeta a la filtración de paso de alta y luego a la demodulación de amplitud. Acá es dónde una frecuencia discreta en el espectro, generalmente llamada la "portadora", puede ser modulada por otra frecuencia llamada la moduladora. La señal resultante luego es sometida a un análisis de rango de baja frecuencia del espectro. La demodulación de la amplitud se lleva a cabo en el colector de información luego de haber sido digitalizada.

Destreza: Un técnico experimentado que esté entrenado adecuadamente.

Ventajas: Pueden identificarse fácilmente los problemas de rodamientos y cajas reductoras (específicamente rodamientos totalmente enmascarados por ruidos) en etapas tempranas. Trabaja bien en aplicaciones de baja velocidad como máquinas papeleras.

Desventajas: Se necesita mucha pericia y experiencia para interpretar y entender los resultados. Es difícil de implementar en rodamientos de baja velocidad dado que las ondas de tensión son eventos transitorios de corto término (menos de unos cuantos milisegundos), con lo que, cuando el pulso que sale del circuito de demodulación se pasa a través de la última etapa del acondicionamiento de la señal (el filtro de baja de anti-separación) queda filtrada gran parte de la onda de tensión, haciendo que sea menos probable la detección de fallas.

3.11 Análisis del valor máximo (Peak Vue)

Condiciones observadas: ondas de tensión causadas por el impacto entre metal y metal o despedazamiento de metal, fracturas o rasguños por tensión, astillamiento y desgaste abrasivo.

Aplicaciones: rodamientos anti fricción y ejes y sistemas de engranado de cajas reductoras.

Intervalo P – F: De varias semanas a meses dependiendo de la aplicación

Funcionamiento: Separa las fallas de baja energía como aquellos que ocurren en cojinetes anti fricción y en engranajes, y aumenta sus señales haciendo que las fallas estén cercanas al piso del ruido del espectro. Esto las hace más fáciles de reconocer. En el análisis del valor máximo, primero se separan las ondas de tensión de las vibraciones usando un filtro de alta. Luego se las acondiciona aumentando su amplitud y su ancho de pulso, haciéndolas analizables con FFT (Transformada rápida de Fourier). La forma de onda acondicionada es luego procesada usando la FFT para determinar la frecuencia a la cual ocurre la onda de tensión.

Destreza: Un técnico experimentado en vibraciones.

Ventajas: Revela ciertos fallos que pueden no haber sido detectados en su etapa temprana o que estén enterrados en el piso (punto más bajo) de ruido del espectro de vibración. Más consistente que la demodulación. El resultado es independiente de la velocidad de la máquina y de la configuración de la frecuencia máxima del instrumento. Aplicable a un amplio rango de frecuencias, desde rodamientos de muy baja velocidad hasta ruedas dentadas engranando a más de 1 kHz.

Desventajas: Se necesita mucha destreza y conocimientos para interpretar resultados.

3.12 Energía punzante (Spike Energy TM)

Condiciones observadas: bombas trabajando en vacío, cavitación, cambio de flujo, desalineación de cojinetes, desgaste de cojinetes causados por el contacto entre metal y metal, desperfectos en la superficie de los dientes de engranajes, flujo de vapor o aire a altas presiones, control de ruido de válvulas, pobre lubricación de cojinetes.

Aplicaciones: Bombas sin sello usadas en la industria química y petroquímica, cajas reductoras, soportes de elementos rotantes, etc.

Intervalo P – F: Varias semanas a meses.

Funcionamiento: Algunas fallas excitan la frecuencia natural de componentes y estructuras. La intensa energía que se genera por repetidos impactos mecánicos transitorios, causa la aparición de una señal de punciones periódicas de energía de alta frecuencia en un espectro que puede ser medido por un acelerómetro. Se utiliza un filtro de paso de banda de alta frecuencia para filtrar señales de vibraciones de baja frecuencia. Las señales de alta frecuencia pasan a través de un detector de pico a pico que detecta y guarda las amplitudes entre picos de la señal. Esto se llama enveloping (envoltura) y los resultados de las lecturas se expresan en unidades de "gSE". Los pulsos de gran amplitud y alta tasa de repetición producen en conjunto lecturas de gSE altas. La señal envuelta puede ser sometida a un análisis FFT exponiendo un Espectro de Energía Punzante. La frecuencia de la falla aparece en el espectro gSE con un inconfundible defecto en la frecuencia y sus armónicas.

Destreza: Un técnico experimentado que esté entrenado adecuadamente. Se necesita práctica y experiencia para interpretar los resultados.

Ventajas: Sensitivo a parámetros de medición de alta frecuencia adecuados a la detección de problemas en bombas sin sello que muchas veces son difíciles de detectar usando sensores de vibración convencionales como medidores de velocidad y acelerómetros.

Desventajas: Se necesita mucha destreza y conocimientos para interpretar resultados.

3.13 Análisis de Proximidad

Condiciones observadas: Desalineación, arremolinamientos en el aceite, roces, ejes doblados/ desbalanceados, resonancia, fuerzas alternativas, poleas y engranajes excéntricos, etc.

Aplicaciones: Ejes, juntas de motores, cajas reductoras, ventiladores, acoplamientos, etc.

Intervalo P-F: De días a semanas

Funcionamiento: Básicamente, la señal proveniente del sensor opera como ordenada para un gráfico en función del tiempo. Con un solo impulso, las curvas sinusoidales pueden indicar desbalanceo, ejes doblados, arremolamientos de aceite, desalineación, o lacas adheridas en los cojinetes. Dos señales producen un diagrama polar que provee más información característica que un diagrama X-Y. Se puede obtener mas información introduciendo una marca de indicación de fase en la representación visual de la onda de la pantalla del osciloscopio. Estas marcas se generan a razón de una por revolución por medio de un dispositivo sensor incorporado en el tacómetro de velocidad del eje.

Destreza: Un técnico adecuadamente entrenado y experimentado.

Ventajas: Indica con mucha precisión problemas específicos. Se puede usar para el *balanceo:* Equipo portátil: Muy fácil de usar.

Desventajas: Intervalos P-F cortos: Tiempo de análisis largo: Limitada habilidad de diagnóstico.

3.14 Monitoreo de Impulsos de Choque

Condiciones observadas: Deterioro de superficies y falta de lubricación que provocan ondas de choque. Analizando la tendencia de los datos puede identificarse instalaciones o reemplazos incorrectos de cojinetes, uso de lubricantes incorrectos, malas prácticas de lubricación, o instalación o mantenimiento incorrecto de sellos y empaquetaduras

Aplicaciones: Rodamientos, cojinetes anti-fricción, herramientas neumáticas de impacto, válvulas de motores de combustión interna.

Intervalo P-F: De semanas a varios meses.

Funcionamiento: Se ingresa en el analizador el tipo y el tamaño del cojinete. Un acelerómetro piezoeléctrico que se coloca en el cuerpo del cojinete detecta los impulsos mecánicos de los impulsos de choque, causados por el impacto de dos masas (como el contacto de rodadura entre las superficies de las bolillas o rodillos y la pista de un rodamiento). La magnitud de los pulsos de los impactos dependen de la condición en que se encuentra la superficie y de la velocidad periférica del rodamiento (RPM y tamaño). Los pulsos establecen una oscilación amortiguada en el transductor y en su frecuencia de resonancia. El transductor se regula a una frecuencia de resonancia de 32Khz de manera mecánica y eléctrica. La amplitud de los picos de esa oscilación es directamente proporcional a la velocidad de impacto. A medida que la condición del rodamiento se deteriora de buena a falla inminente, las mediciones de los pulsos de impacto pueden crecer hasta 1000 veces.

Destreza: Un técnico experimentado y entrenado adecuadamente.

Ventajas: Es relativamente fácil de usar. Portátil. Puede usarse prácticamente en cualquier clase de rodamiento. Analiza en segundos la condición y el estado de lubricación de un rodamiento. El impulso de los impactos prácticamente no es influenciado por vibraciones y ruidos de fondo.

Desventajas: Necesita información precisa del tamaño y velocidad del rodamiento antes de realizar las mediciones. Está acotado a usarse en rodamiento.

3.15 Análisis Ultrasónico

Condiciones observadas: Cambios en los patrones de sonidos (sintonía acústica) causados por fugas, desgaste, fatiga o deterioro.

Aplicaciones: Fugas en sistemas de presión y vacío (por ej. : calderas, intercambiadores de calor, condensadores, sistemas de enfriamiento, columnas de destilación, recipientes de vacío, sistemas de gas especializados): Desgaste o fatiga de cojinetes: trampas de vapor: desgaste de válvulas y de asientos de válvulas: cavitación de bombas: coronas de engranajes en cajas reductoras: descargas estáticas: la integridad de sellos y empaquetaduras de tanques, sistemas de tuberías y grandes cajas de entrada, fugas en tuberías y tanques bajo tierra.

Intervalo P – F: Muy variable dependiendo de la naturaleza del fallo.

Funcionamiento: La tecnología ultrasónica se ocupa de las ondas de sonido que están más allá de la percepción humana (20 Hz a 20 kHz) en el rango entre 20 kHz a 100 kHz. Las ondas de sonido de alta frecuencia son extremadamente cortas y tienden a ser bastante direccionales, con lo cual es fácil aislar estas señales de los ruidos del ambiente y detectar su localización exacta. Todo equipo en funcionamiento y la mayoría de los problemas de fugas producen un amplio rango de sonidos. Como con el deterioro comienzan a ocurrir cambios sutiles, la naturaleza del sonido ultrasónico transmitido por aire, permite que esas señales de alarma sean detectadas en etapas tempranas. El ultrasonido detectado por los instrumentos es convertido al rango audible en el traductor ultrasónico donde los usuarios usando auriculares pueden escucharlos y reconocerlos. El equipo de monitoreo ultrasónico filtra el sonido ambiente y otras frecuencias no deseadas. Las lecturas ultrasónicas pueden ser mostradas visualmente en un VDU o en un medidor de espira móvil, como una señal audible en un auricular o como imágenes en un monitor electrónico o computadora.

Destreza: Un técnico experimentado que esté entrenado adecuadamente.

Ventajas: Rápido y fácil. Puede utilizarse en áreas muy ruidosas (los auriculares filtran el ruido del ambiente). Los micrófonos orientan al operador con precisión permitiéndole detectar la fuente del ruido a largas distancias. Equipo portátil.

Desventajas: No indica el tamaño de la fuga. Los tanques enterrados sólo pueden ser testeados estando bajo vacío.

3.16 Kurtosis

Condiciones observadas: Impulsos de choque

Aplicaciones: Rodamientos, cojinetes anti-fricción

Intervalo P-F: De varias semanas a meses

Funcionamiento: Limitado a usarse casi exclusivamente en cojinetes y rodamientos en los que se examinan sólo ciertos rangos específicos de frecuencia (3-5kHz, 5-10kHz, 10-15Khz.). Kurtosis es un análisis estadístico de una señal en función del tiempo (dominio temporal) que observa la diferencia que existe entre el cuarto momento de amplitud espectral y el nivel medio. Una distribución normal tiene un valor de kurtosis (K) de 3.

Destreza: Un operario semi-especializado entrenado

Ventajas: Es aplicable a cualquier tipo de materiales que tengan superficies duras:
Equipo portátil: Muy fácil de usar.

Desventajas: Aplicación limitada

3.17 Emisión Acústica

Condiciones observadas: Deformación plástica y formación de grietas causadas por la fatiga, esfuerzo y desgaste.

Aplicaciones: Materiales de metal que se usan en estructuras, contenedores

presurizados, tuberías y excavaciones subterráneas de minería

Intervalo P-F: Varias semanas, dependiendo de la aplicación

Funcionamiento: Los materiales sujetos a carga emiten ondas audibles causadas por tensiones debidas a cambios cristalográficos. Estas ondas de tensión son censadas por un transductor y alimentan por medio de un amplificador a un analizador de impulsos, como ser un registrador X-Y o un osciloscopio. Puede entonces examinarse la señal exhibida.

Destreza: Un técnico adecuadamente entrenado y experimentado

Ventajas: Detección remota de defectos: Cubre todas las estructuras: El sistema de medición se alista muy rápidamente: Gran sensibilidad: Sólo requiere un acceso limitado para probar los objetos: Detecta defectos activos: Sólo requiere cargas relativamente bajas: Puede a veces usarse para pronosticar fallos por sobrecarga.

Desventajas: La estructura tiene que estar cargada: La actividad de E-A depende de los materiales: Ruidos eléctricos y mecánicos irrelevantes pueden interferir con las mediciones: Dan información limitada sobre el tipo de defecto: La interpretación de los resultados puede ser difícil.

4 Monitoreo de partícula

4.1 Ferrografía

Condiciones observadas: Partículas provenientes de desgaste, fatiga y corrosión.

Aplicaciones: Grasas: Aceites usados en motores diesel y nafteros, turbinas de gas, transmisiones, cajas reductoras, compresores y sistemas hidráulicos.

Intervalo P-F: Normalmente varios meses

Funcionamiento: Se diluye una muestra del lubricante con un solvente determinado (tetracloroetileno) y luego se lo hace pasar a través de una placa inclinada de vidrio bajo la influencia de un campo magnético graduado. Las partículas se distribuyen a lo largo de la placa según su tamaño. Las partículas grandes se depositan cerca de la entrada, mientras que las más finas se depositan cerca de la salida de la placa. La placa, conocida como ferrograma, tiene hecho un tratamiento para que las partículas se adhieran a ella cuando se haya removido el aceite. Las partículas ferrosas se separan magnéticamente y se distinguen según su posición respecto a las líneas del campo magnético, mientras que las no magnéticas y las no metálicas se distribuyen sobre toda la placa al azar. La densidad total de partículas y la proporción entre partículas grandes y pequeñas indica el tipo y extensión del desgaste. El análisis se hace por medio de una técnica que se conoce como examen microscópico bicromático. Éste usa tanto fuentes de luz reflejada como transmitida (las cuales pueden usarse de manera simultánea). También se usan filtros polarizados verde, rojo y polarizados para distinguir el tamaño, la composición, la forma y la textura de las partículas metálicas y no metálicas. Puede también usarse un microscopio electrónico para determinar la forma de las partículas y proveer indicaciones sobre la causa del fallo.

Destreza: Para extraer la muestra y hacer funcionar el ferrógrafo: Un operario semi-especializado debidamente entrenado. Para analizar el ferrograma: Un técnico experimentado

Ventajas: Más sensible que la espectrometría de emisión para desgaste incipiente: Mide las formas y los tamaños de las partículas: Provee un registro permanente.

Desventajas: No es una técnica en-línea: Mide sólo las partículas ferromagnéticas: Su realización toma mucho tiempo y se necesita un equipo de soporte analítico caro. Por lo general sólo mide partículas ferromagnéticas. Requiere un microscopio electrónico para realizar análisis más profundos.

4.2 Ferrografía Analítica

Condiciones observadas: Partículas de desgaste, corrosión y fatiga.

Aplicaciones: Grasas.: Aceites usados en motores diesel y nafteros, turbinas de gas, transmisiones, cajas reductoras, compresores y sistemas hidráulicos.

Intervalo P – F: Normalmente varios meses.

Funcionamiento: Una ferrografía analítica se usa para hacer un ferrograma como el descripto en el título Ferrografía. Después que se depositan las partículas sobre el ferrograma, se realiza un lavado para remover cualquier resto de aceite o lubricante de base acuosa. Una vez que se evapora la sustancia con la que se realizó el lavado, las partículas remanentes quedan permanentemente adheridas sobre el sustrato del ferrograma. Un tomógrafo ferrográfico escanea el ferrograma en menos de 20 segundos y genera los valores de salida estándar según el mecanismo desgastado correspondiente. Diversos tipos de partículas están clasificadas por su especie y forma y cada tipo revela problemas específicos. Por ejemplo, laminillas de metal (que tienen un aspecto como descascarado, largo y fino) por lo general indican problemas en los rodamientos. Óxidos rojos típicamente son corrosión (muy probablemente contaminación de agua). Luego un software reporta los niveles de desgaste y los cambios en las condiciones de los componentes.

Destreza: Para extraer la muestra y hacer funcionar el ferrógrafo: Un operario semi-especializado debidamente entrenado. Para analizar el ferrograma: un técnico experimentado.

Ventajas: Disponible en un amplio rango de sistemas en-línea. Evaluación con detenimiento, registros fotográficos y manejo de base de datos. Menos afectada por la opacidad del fluido y la contaminación del agua que muchas de las otras técnicas. El equipamiento es costosa.

Desventajas: Se necesita un operador muy experimentado. La preparación de la muestra y del análisis lleva mucho tiempo. La necesidad de lavar las muestras reduce la chance de que la muestra sea realmente representativa del desgaste existente.

4.3 Ferrografía de Lectura Directa (Direct Reading Ferrograph – DRF)

Condiciones observadas: Partículas de desgaste, corrosión y fatiga de máquinas.

Aplicaciones: Grasas.: Aceites usados en motores diesel y nafteros, turbinas de gas, transmisiones, cajas reductoras, compresores y sistemas hidráulicos.

Intervalo P – F: Normalmente varios meses.

Funcionamiento: Un DRF mide cuantitativamente la concentración de partículas ferrosas en una muestra de fluido mediante la precipitación de dichas partículas sobre el fondo de un tubo de vidrio que está sujeto a un fuerte campo magnético. Por medio de manojos de fibras ópticas se dirige luz a través del tubo de vidrio hacia las dos posiciones correspondientes a las ubicaciones en donde el campo magnético depositó las partículas grandes y las partículas pequeñas. La luz es atenuada de acuerdo con el número de partículas depositadas en el tubo de vidrio, y esta reducción es monitoreada y exhibida electrónicamente. Se obtienen dos juegos de lecturas, para las partículas grandes y para las pequeñas (de aprox. 5 micrones y de menos de 5 micrones) las cuales se muestran en un gráfico.

Destreza: Un operario semi-especializado debidamente entrenado.

Ventajas: Tecnología compacta, portátil, en-línea, fácil de operar. Menos afectada por la opacidad del fluido y la contaminación del agua que muchas de las otras técnicas.

Desventajas: Mide sólo partículas ferromagnéticas. Necesita un análisis ferrográfico analítico más profundo cuando las lecturas son altas.

4.4 Contador de Partículas por Obturación de Malla (Presión Diferencial)

Condiciones observadas: Partículas en aceites de sistemas lubricantes e hidráulicos causadas por desgaste, fatiga, corrosión y contaminantes.

Aplicaciones: Sistemas lubricantes e hidráulicos cerrados como motores, cajas reductoras, transmisiones, compresores, etc.

Intervalo P – F: Normalmente de varias semanas a meses.

Funcionamiento: Este instrumento mide la presión diferencial existente entre tres pantallas de alta precisión de 5, 15 y 25 micrones, cada una de las cuales tiene un número conocido de poros. A medida que el aceite pasa a través de cada una de estas pantallas, las partículas que son más grandes que los poros son atrapadas en la superficie de la malla, lo cual reduce el área abierta de la pantalla e incrementa la caída de presión entre lados de la malla. Unos sensores miden el cambio de presión, el cual se transforma para reflejar el número de partículas retenidas por la malla. Esto se convierte a los códigos de limpieza de la norma ISO 4406.

Destreza: Para operar la unidad portátil: un operario semi-especializado debidamente entrenado. Para interpretar los resultados: un técnico con experiencia y debidamente entrenado

Ventajas: No requiere la preparación de una pre-muestra. El equipo es portátil y puede ser usado en laboratorio y en campo. Una versión del equipo en línea puede usarse para un monitoreo continuo en tiempo real. Las contabilizaciones de partículas son calibradas según los códigos de limpieza de la norma ISO 4406. La mayoría de los aceites pueden ser analizados en cuestión de minutos. No es afectado por burbujas, emulsiones o aceites oscuros que limitan los análisis basados en láseres.

Desventajas: No provee información de la composición química de las partículas. Solamente se aplica a sistemas de aceite circulante. El equipo es moderadamente caro.

4.5 Técnica de Bloqueo de Poros (Decaimiento de Caudal)

Condiciones observadas: Partículas en aceites y lubricantes causadas por desgaste, fatiga, corrosión y contaminantes.

Aplicaciones: Aceites usados en motores diesel y nafteros, turbinas de gas, transmisiones, cajas reductoras, compresores y sistemas hidráulicos.

Intervalo P – F: Normalmente de varias semanas a meses.

Funcionamiento: Se presuriza una muestra de fluido entre 30 y 150 psi (puede llegar hasta 3000 psi) y se la deja fluir a través de malla con calibrado de precisión (5, 10, 15 micrones) seleccionada dependiendo de la viscosidad del aceite, y se le monta un sensor. Las partículas más grandes que la malla se comienzan a acumular, restringiendo el caudal. Las partículas más pequeñas se acumulan alrededor de las partículas más grandes restringiendo aún más el caudal. El resultado es una curva de decaimiento del caudal en función del tiempo. Usando una computadora de mano se convierte la curva de decaimiento del caudal en función del tiempo en una distribución de tamaño de partículas por medio de un programa matemático. Esto se usa para calcular un código de limpieza ISO.

Destreza: Para operar la unidad portátil: un operario especializado debidamente entrenado. Para interpretar los resultados: un técnico con experiencia y debidamente entrenado

Ventajas: No requiere la preparación de una pre-muestra. El equipo es portátil y puede ser usado en laboratorio y en campo. Una versión del equipo en línea puede usarse para un monitoreo continuo en tiempo real. Las contabilizaciones de partículas son calibradas según los códigos de limpieza de la norma ISO 4406. La mayoría de los aceites pueden ser analizados en cuestión de minutos.

Desventajas: No provee información de la composición química de las partículas. Solamente se aplica a sistemas de aceite circulante. El equipo es moderadamente caro.

4.6 Conteo de Partículas por Extinción Lumínica

Condiciones observadas: Partículas en aceites y lubricantes causadas por desgaste, fatiga, corrosión y contaminantes.

Aplicaciones: Aceites usados en motores diesel y nafteros, turbinas de gas, transmisiones, cajas reductoras, compresores y sistemas hidráulicos.

Intervalo P – F: Normalmente de varias semanas a meses.

Funcionamiento: El Conteo de Partículas por Extinción Lumínica consiste en una fuente de luz incandescente, una célula objeto y un photo detector. Se hace circular en condiciones controladas de caudal y volumen, una muestra del fluido a través de la célula objeto. Cuando pasan partículas opacas del fluido a través del rayo bloquean una cantidad de luz proporcional al tamaño de las mismas. El número y el tamaño de las partículas en la muestra de fluido determina cuánta luz es bloqueada o reflejada, y qué cantidad de luz pasa a través de foto diodo. El cambio resultante en la señal eléctrica en el foto diodo se analiza contra un estándar calibrado para calcular el número de partículas dentro de cada rango de tamaño predeterminado y muestra el conteo resultante. Con esta información se determina automáticamente el valor de limpieza ISO por lectura directa.

Destreza: Para operar la unidad portátil: un operario especializado debidamente entrenado.

Ventajas: Es considerablemente más rápido que la filtración escalonada visual. Los resultados están disponibles en minutos. Por lo general el test es muy preciso y reproducible.

Desventajas: Carece de la intensidad y consistencia del láser y no reacciona a muchas longitudes de onda lumínicas diferentes. La precisión depende de la opacidad del fluido, del número de partículas translúcidas, de las burbujas de aire y de la contaminación del agua. La cuenta y el tamaño también puede variar dependiendo de la orientación del largo, fino o inusualmente de la forma de las partículas en el haz de luz. La resolución está limitada al rango de partículas de 5 micrones. No brinda información de la composición química del contaminante.

4.7 Conteo de Partículas por Dispersión Lumínica

Condiciones observadas: Partículas en aceites y lubricantes causadas por desgaste, fatiga, corrosión y contaminantes.

Aplicaciones: Sistemas lubricantes e hidráulicos cerrados como motores, cajas reductoras, transmisiones, compresores, etc.

Intervalo P – F: Normalmente de varias semanas a meses.

Funcionamiento: El Conteo de Partículas por Dispersión Lumínica consiste de tres componentes primarios; una fuente de luz láser, una celda objeto y un foto diodo. Se hace circular una muestra del fluido en condiciones controladas de caudal y volumen a través de la célula objeto. Cuando pasan partículas opacas del fluido a través del rayo se mide la luz dispersa y se traduce en un conteo de partículas. Con esta información se determina automáticamente el valor de limpieza ISO por lectura directa.

Destreza: Un operario especializado debidamente entrenado.

Ventajas: Buena performance en escenarios de condiciones controladas. Alta precisión. Mide partículas tan pequeñas como 2 micrones. Es más rápido que la filtración escalonada visual – los resultados están disponibles en minutos. Por lo general el test es muy preciso y reproducible. Se puede realizar un monitoreo continuo.

Desventajas: La precisión depende de la opacidad del fluido, del número de partículas translúcidas, de las burbujas de aire y de la contaminación del agua. La cuenta y el tamaño también puede variar dependiendo de la orientación del largo, fino o inusualmente de la forma de las partículas en el haz de luz. No brinda información de la composición química del contaminante. Para grandes cantidades de partículas frecuentemente requiere de dilución para evitar errores casuales en los que se agrupan varias partículas y aparecen como una partícula grande.

4.8 Sensor Ferromagnético en Tiempo Real

Condiciones observadas: Partículas ferromagnéticas causadas por desgaste y fatiga.

Aplicaciones: Aceites usados en motores diesel y nafteros, turbinas de gas, transmisiones, cajas reductoras, compresores y sistemas hidráulicos.

Intervalo P – F: De semanas a meses.

Funcionamiento: Un sensor ferromagnético análogo usando o uno de los principios de inducción o de magnetismo mide la cantidad de partículas ferrosas que pasan por el sensor. El sensor atrae con un electroimán las partículas ferromagnéticas. Las partículas se acumulan alrededor de una bobina sensora causando un cambio en la frecuencia del oscilador. La frecuencia es calibrada para indicar la masa de partículas ferrosas acumulada. Después de realizar la medición, las partículas son liberadas. Las mediciones pueden graficarse en función del tiempo.

Destreza: Un operario/técnico calificado y con experiencia.

Ventajas: Técnica en-línea.

Desventajas: Limitada a acumular sólo partículas ferromagnéticas. Sólo indica la masa total de partículas ferromagnéticas.

4.9 Sensores de Restos de Cualquier Metal

Condiciones observadas: Partículas ferrosas y no ferrosas causadas por desgaste y fatiga.

Aplicaciones: Diseñados específicamente para la protección de cojinetes de turbinas de gas.

Intervalo P – F: De semanas a meses.

Funcionamiento: La cabeza del sensor consiste en tres bovinas devanadas alrededor de una sección de tubería aislada. Las espiras de estímulo exteriores son energizadas con señales de alta frecuencia contrapuestas. La bovina sensora (la del medio) está ubicada exactamente en el punto neutro entre los devanados de estímulo. Cuando una partícula ferrosa pasa a través del sensor, distorsiona el primer campo y luego el segundo, generando en la bobina sensora una sintonía fácilmente identificable. Una partícula no ferrosa genera una sintonía única y opuesta. El sensor detectará y medirá la mayor parte del rango de partículas de desgaste severo. Estas sintonías son capturadas y exhibidas en gráficos en función del tiempo y son utilizadas para alertar/avisar a los operadores en tiempo real o enviar una señal para respuestas automáticas de sistemas de control.

Destreza: Un operario/técnico calificado y con experiencia para marcar la tendencia de los resultados.

Ventajas: Detecta y cuantifica partículas metálicas ferrosas y no ferrosas provenientes de desgaste. La probabilidad de identificación errónea es baja. Los sensores incorporados pueden capturar y exhibir gráficos en función del tiempo de varios modos de averías los cuales pueden usarse para la identificación de las fuentes de desgaste prácticamente en tiempo real.

Desventajas: No puede determinar la composición química ni el tamaño de las partículas.

4.10 Filtración Graduada

Condiciones observadas: Partículas en lubricantes y aceites hidráulicos causadas por desgaste, fatiga, corrosión y contaminantes.

Aplicaciones: Aceites usados en motores diesel y nafteros, turbinas de gas, transmisiones, cajas reductoras, compresores y sistemas hidráulicos.

Intervalo P-F: Normalmente de varias semanas a meses

Funcionamiento: Se diluye una muestra pequeña de aceite (100 ml) y se pasa a través de una serie de filtros graduados con forma de discos. Luego se examina cada disco con un microscopio y se cuentan las partículas manualmente Los resultados se expresan como cantidad de partículas dentro de rangos de tamaño determinados. Su distribución estadística se muestra con un gráfico. El análisis del perfil de distribución de las partículas indica si el desgaste es normal o no.

Destreza: Muestreo: un ayudante de laboratorio. Análisis del perfil de distribución de las partículas: Un técnico de laboratorio experimentado o un ingeniero.

Ventajas: Pueden identificarse visualmente contaminantes como trozos de metal, restos de juntas o suciedad. Relativamente barato.

Desventajas: Es subjetivo dado que es el operador quien determina visualmente el tamaño de las partículas, no obstante existen grillas graduadas de referencia. Toma varias horas preparar y analizar cada uno de los filtros muestra. Se necesita la destreza de especialistas para interpretar los resultados de la prueba: La identificación de los elementos que componen las partículas es difícil.

4.11 Detección de Virutas Magnéticas

Condición monitoreada: Desgaste y fatiga

Aplicaciones: Aceites usados en motores diesel y nafteros, turbinas de gas, transmisiones, cajas reductoras, compresores y sistemas hidráulicos.

Intervalo P-F: De días a semanas

Funcionamiento: Se monta un tapón magnético en el sistema de lubricación de forma que la sonda magnética esté expuesta al lubricante circulante. Las pequeñas partículas de metal que están en suspensión en el aceite, y las escamas de metal

causadas por fatiga son capturadas por la sonda. La sonda se saca a intervalos regulares para poder analizar las partículas magnéticas adheridas usando un microscopio. Un aumento en el tamaño de las partículas indica un fallo inminente. Las partículas tienen características diferentes (forma, color y estructura) según de donde procedan.

Destreza: Para recoger una muestra: Un operario semi-especializado debidamente entrenado. Para analizar las virutas de metal: Un técnico debidamente capacitado y con experiencia.

Ventajas: Es un método barato: Sólo se requiere un microscopio de baja potencia para analizar las virutas. Algunas sondas se pueden sacar sin que haya pérdida de lubricante

Desventajas: Intervalo P-F corto: Se necesita mucha experiencia para interpretar las partículas.

4.12 Prueba de Mancha

Condiciones observadas: Desgaste, fatiga y algunas veces partículas de corrosión, barros, etc.

Aplicaciones: Aceites usados en motores diesel y nafteros, turbinas de gas, transmisiones, cajas reductoras, compresores y sistemas hidráulicos.

Intervalo P-F: De unos cuantos días a varias semanas

Funcionamiento: Se depositan una o dos gotas de aceite en un papel secante liso o en papel de filtro. Las gotas de aceite se extienden y se secan, las partículas grandes permanecerán dentro de una corona circular centrada de radio pequeño. Esto elimina muchos aditivos metal-orgánicos y aditivos que dispersan detergentes. Diluciones posteriores permiten que el aceite penetre y se filtre con el papel, con lo que quedan definidas claramente zonas circulares que se corresponden con el tamaño de las partículas transportadas por el aceite filtrado a través del papel. Un anillo claramente definido alrededor del área mojada por el aceite indica la presencia de barros. Se necesita un período de 24 horas para que el aceite "manche" completamente, después de lo cual se pueden analizar los resultados fotométricamente. El ensayo indica cuando los aditivos del aceite del motor están por llegar al fin de su vida útil. Algunos equipos de ensayo portátiles tienen estándares de referencia que proveen una referencia sobre el nivel de barros presente.

Destreza: Mancha de aceite: Un operario semi-especializado debidamente entrenado. Análisis: Un técnico debidamente entrenado y experimentado.

Ventajas: Económico, fácil de usar y de instalar: provee de un registro permanente: Indica el grado de oxidación del aceite con moderada precisión.

Desventajas: Se necesita un período de 24 horas para que el aceite "manche" el filtro: Se necesita una destreza considerable para analizar los resultados: Sólo da una indicación grosera del nivel de barros. No indica la composición química de las partículas.

4.13 Prueba del Parche

Condiciones observadas: Metales desgastados, partículas causadas por desgaste y fatiga, sedimento, etc.

Aplicaciones: Aceites usados en motores diesel y nafteros, turbinas de gas, transmisiones, cajas reductoras, compresores y sistemas hidráulicos.

Intervalo P – F: De semanas a meses.

Funcionamiento: Se utiliza vacío para succionar un volumen estándar del fluido a ser examinado a través de un filtro de 47 mm de diámetro y poros de 5 micrones. El grado de decoloración sobre el filtro se compara contra una escala de calificación de colores estándar de filtros de membrana y contra una escala de evaluación de partículas para determinar el nivel de contaminación. Niveles altos de partículas producen un gris oscuro o una mancha de coloración más intensa. El agua limpia aparece como pequeñas gotas durante el ensayo o como impurezas en el filtro. El parche es examinado usando un microscopio para determinar si el sistema está muy cargado de partículas y para tener una impresión rápida del tipo y del tamaño de las mismas. Se puede determinar una lectura aproximada del nivel de limpieza (cualitativo), comparando el parche con un gráfico de colores.

Destreza: Un operario especializado debidamente entrenado.

Ventajas: Los resultados de la prueba son confiables, repetibles, y lo suficientemente sensibles para detectar cualquier cambio significativo de la limpieza. La medición cualitativa del grado de contaminación es buena. Portátil

Desventajas: Es tedioso el uso del microscopio para contar las partículas de desgaste o contaminación, a la vez que no puede ser calibrado y los resultados varían mucho según el usuario.

4.14 Sedimento (ASTM D-1698)

Condiciones observadas: Sedimentos inorgánicos provenientes de contaminación, Sedimentos orgánicos provenientes del deterioro o contaminación de aceites; barros solubles del deterioro de aceites.

Aplicaciones: Aceites refrigerantes derivados del petróleo usados en transformadores, interruptores de alta tensión y cables.

Intervalo P – F: Varias semanas.

Funcionamiento: Se centrifuga una muestra del aceite para separar el sedimento del aceite. La parte superior, libre de sedimentos, se decanta y se utiliza para medir los barros solubles por dilución con pentano, para precipitar los insolubles en pentano y luego filtrarlos a través de un filtro crisol. El sedimento es retirado y pasado por un filtro crisol. Después de secar y pesar para obtener la cantidad de sedimento total, el crisol es quemado a 500°C y pesado nuevamente. Lo que se pierde de peso es material orgánico y el remanente es el contenido inorgánico del sedimento.

Destreza: Un electricista para tomar la muestra. Un técnico de laboratorio adecuadamente entrenado para llevar adelante la prueba.

Ventajas: Es una prueba simple y rápida. El transformador no debe ser sacado de funcionamiento para monitorear el fluido refrigerante.

Desventajas: La prueba sólo es aplicable a aceites de baja viscosidad, por ejemplo 5.7 a 13.0 cSt a 40°C (104°F). La prueba debe llevarse a cabo en un laboratorio. El pentano es medianamente tóxico e inflamable.

4.15 Detección y Renqueo de Luminosidad (LIDAR – Light Detection and Ranging)

Condiciones observadas: Presencia de partículas en el aire.

Aplicaciones: Cantidad y dispersión de bocanadas de humo en chimeneas.

Intervalo P – F: Muy variable dependiendo de la aplicación.

Funcionamiento: Se dirige una luz de longitud de onda simple hacia el área que se investiga. La cantidad de material particulado se calcula a través de un medidor de dispersión. Las ubicaciones se determinan por triangulación basándose en lecturas tomadas en dos puntos.

Destreza: Un ingeniero experimentado.

Ventajas: Es una técnica de censado a distancia la cual puede cubrir grandes áreas.

Desventajas: Muy cara: Requiere una gran pericia.

5 Monitoreo Químico

Una Nota Preliminar sobre la Detección Química de Contaminantes en Fluidos

Las técnicas descriptas en esta sección del punto 5 del presente anexo son usadas para detectar elementos en fluidos (generalmente aceite lubricante), que indican que un fallo potencial ha ocurrido en alguna parte del sistema, en oposición al fallo incipiente del propio fluido. Los elementos que más frecuentemente son detectados por estas técnicas se listan a continuación, y pueden aparecer como resultado de desgaste, pérdidas o corrosión.

Metal de desgaste: Miden las cantidades de los siguientes metales de desgaste en los aceites lubricantes

- **Aluminio** de pistones, cojinetes de bancada, cuñas, cojinetes de empuje de lubricación forzada, alojamientos accesorios, jaula de rodamientos planetarios, bombas, engranajes, bombas de lubricación de tornillo, etc.
- **Antimonio** algunas aleaciones de cojinetes y compuestos de grasa
- **Cromo** de componentes recubiertos para evitar el desgaste como ejes, sellos, aros de pistón, revestimientos de cilindros, rodamientos de jaula y otros rodamientos

- **Cobre** cojinetes de bancada, cojinetes de empuje, bujes de leva y biela, bujes de pasador de pistones, engranajes, válvulas, embragues, y cojinetes de turbocargadores. Presente en aleaciones de latón y bronce y frecuentemente detectado junto con zinc en el primero y con estaño en el segundo
- **Hierro** pistones de fundición revestidos, aros de pistón, pistones, árbol de levas, cigüeñal, guías de válvulas, rodamientos anti-fricción a rodillos y lineales, engranajes, ejes, bombas de lubricación y estructuras de maquinarias, etc.
- **Plomo** de cojinetes de bancada y sellos
- **Magnesio** de cajas de accesorios de turbina, ejes y válvulas
- **Manganeso** válvulas y sopladores
- **Molibdeno** del desgaste del revestimiento de los aros superiores de cilindros de algunos motores diesel
- **Níquel** de válvulas, álabes de turbinas, álabes revestidos de turbos y cojinetes
- **Plata** de motores de locomotora, estañados y rodamientos de aguja
- **Estaño** de aleaciones de cojinetes, latón, sellos de aceite y estañados
- **Titanio** hallado en cubos de cojinetes, álabes de turbina y discos de compresor de turbinas de avión a gas
- **Zinc** de componentes de latón, sellos de neopreno.

Pérdidas: los siguientes elementos están asociados con pérdidas
- **Aluminio** de contaminación atmosférica
- **Boro** de pérdidas de refrigerante en el aceite
- **Calcio** cuando se encuentra en combustible indica contaminación por agua de mar
- **Cobre** alma de los enfriadores de aceite – agua de refrigeración en el aceite
- **Magnesio** de contaminación por agua de mar
- **Fósforo** de pérdidas de refrigerante en el aceite
- **Potasio** de contaminación de agua de mar en aceite
- **Silicio** de contaminación con sílice de sistemas de inducción o de fluidos de limpieza
- **Sodio** de agentes anticorrosivos en soluciones refrigerantes de motores usualmente como resultado de una pérdida de refrigerante.

Corrosión: los siguientes elementos son asociados con la corrosión
- **Aluminio** de la corrosión de blocs de motores
- **Hierro** de la corrosión de tanques de almacenaje y cañerías
- **Manganeso** a veces encontrado junto con hierro como resultado de la corrosión del acero

5.1 Espectroscopía de Emisión Atómica (EA)

Condiciones observadas: Desgaste de metales como hierro, aluminio, cromo, cobre, plomo, estaño, níquel y plata: aditivos de aceite conteniendo boro, zinc, fósforo, calcio, magnesio, o bario: contaminantes extraños como el silicio: corrosión

Aplicaciones: Aceites utilizados en motores diesel y nafteros, turbinas a gas, transmisiones, cajas reductoras, compresores y sistemas hidráulicos

Intervalo P-F: Usualmente de varias semanas a meses

Funcionamiento: En una fuente de temperatura de alto voltaje (15kV) se aplica EA para excitar los elementos metálicos de desgaste de la muestra elevando su estado de energía atómica. Los elementos son 'atomizados' y emiten su radiación característica. La energía lumínica resultante pasa por un orificio a un polarizador de difracción que separa las emisiones lineales de cada elemento. La intensidad de la emisión a la longitud de onda característica de un elemento, es proporcional a la concentración del elemento en la muestra. Un detector fotomultiplicador mide la intensidad de cada emisión y transfiere los valores a un dispositivo de lectura (generalmente una computadora) para su procesamiento adicional y visualización. Se usan curvas estándar para establecer la relación entre señal y valores de concentración del elemento en partes por millón

Destreza: Para tomar la muestra: un trabajador semi-especializado debidamente capacitado. Para operar el espectrómetro: un técnico de laboratorio adecuadamente capacitado. Para analizar los resultados del ensayo: un analista químico experimentado

Ventajas: Pueden realizarse mediciones secuenciales o simultáneas (20 a 60 elementos). El ensayo toma un poco más de un minuto. Su precisión es del orden de algunas ppm. Bajo costo

Desventajas: Puede fallar en partículas vaporizadas mayores a cinco o diez micrones. No es capaz de determinar qué tipo de proceso de desgaste puede estar ocurriendo.

5.2 EA - Electrodo de Disco Rotante

Condiciones observadas: Para niveles residuales de Metal de desgaste, contaminantes extraños, y niveles de elementos de aditivos en lubricantes, grasas y combustibles

Aplicaciones: Sistemas de lubricación cerrados en motores diesel y nafteros, turbinas de gas, transmisiones, cajas reductoras, compresores y sistemas hidráulicos

Intervalo P-F: Generalmente de varias semanas a meses

Funcionamiento: Un disco rotativo de grafito es sumergido en un recipiente con la muestra y se toma una pequeña cantidad de aceite, grasa o combustible mientras gira. La muestra es introducida dentro del arco eléctrico de alta temperatura que se crea en el espacio entre el disco electrodo y la varilla contra-electrodo. La muestra es completamente volatilizada, creando un plasma que emite una luz característica según los elementos presentes en la muestra. Las líneas de emisión de cada elemento son medidas por un sistema óptico, y los resultados son mostrados en un CRT (tubo de rayos catódicos) y una impresora en un rango de partes por millón (ppm).

Destreza: Para tomar la muestra y operar el equipo: un técnico debidamente capacitado. Para analizar los resultados del ensayo: un técnico de laboratorio adecuadamente capacitado

Ventajas: Simple de operar. No es necesaria la preparación de pre-muestra. El análisis lleva alrededor de 30 segundos. Equipo portátil. Hasta 32 elementos pueden ser analizados al mismo tiempo. No se producen gases peligrosos. Alta precisión y buena repetitibilidad

Desventajas: Puede sufrir interferencias espectrales. Puede fallar para vaporizar partículas mayores a 5 micrones.

5.3 EA – Plasma Acoplado Inductivamente (ICP)

Condición monitoreada: Metal de desgaste de partes en movimiento (como hierro, aluminio, cromo, cobre, plomo, estaño, níquel y plata): aditivos de aceite conteniendo boro, zinc, fósforo, calcio, magnesio o bario: contaminantes extraños como sílice: corrosión

Aplicaciones: Aceite utilizado en motores diesel y nafteros, turbinas de gas, transmisiones, cajas reductoras, compresores y sistemas hidráulicos.

Intervalo P-F: Generalmente de algunas semanas a meses

Funcionamiento: El gas argón es pasado por una bobina de inducción de radiofrecuencia y calentado a una temperatura de 8.000 °K a 10.000 °K produciendo un plasma. La muestra de aceite es diluida por un solvente de baja viscosidad como xileno o kerosén, es nebulizada y quemada con el gas portador en la antorcha de plasma central. La alta temperatura excita a los átomos metálicos que irradian líneas de emisión características correspondientes a cada uno. Las líneas son captadas y medidas por un sistema óptico. Los equipos ICP están disponibles en modo de medida simultánea o secuencial. El instrumento secuencial utiliza un polarizador móvil y un foto detector. Son necesarias múltiples (secuenciales) igniciones para obtener todos los elementos de interés

Destreza: Para obtener la muestra: un trabajador semi-especializado adecuadamente capacitado. Para operar el espectrómetro: un técnico adecuadamente formado. Para analizar los resultados: un técnico experimentado

Ventajas: Más preciso, confiable y repetitivo que el método electrodo de disco rotante. Un gran rango dinámico permite utilizar las líneas de emisión características para la medición de un rango de niveles de concentración. Provee una sensibilidad de partes por billón (ppb) para compuestos como metal-orgánicos y partículas de Metal de desgaste menores a 3 micrones en tamaño. Rápido y fácil de operar. No hay necesidad de diluir las muestras manualmente antes del ensayo. Operación automática.

Desventajas: El espectrómetro ICP es más complejo y más costoso, y tiene un costo de operación más elevado que el espectrómetro de disco rotante. Utiliza químicos peligrosos y por lo tanto genera mayores costos de desperdicios. La información de Metal de desgaste generados por el ICP no se correlaciona con la información generada por otros métodos de EA. Pueden fallar en vaporizar partículas mayores a 5 micrones.

5.4 Espectroscopía de Absorción Atómica (AA)

Condición monitoreada: Metal de desgaste (como el hierro, aluminio, cromo, plomo, estaño, cobre, níquel y plata): los aditivos de aceite conteniendo boro, fósforo, zinc, calcio, magnesio o bario: contaminantes extraños como sílice: corrosión

Aplicaciones: Aceite utilizado en motores diesel y nafteros, turbinas de gas, transmisiones, cajas reductoras, compresores y sistemas hidráulicos.

Intervalo P-F: Generalmente de varias semanas a meses

Funcionamiento: Trabaja sobre el principio de que cada átomo absorbe luz de una longitud de onda específica. La muestra de aceite es diluida y quemada en una llama de acetileno u otro atomizador suficientemente caliente para disociar la muestra en sus átomos constituyentes. La llama es irradiada por una lámpara catódica convexa a la longitud de onda característica del metal deseado. Cuanto más alta la concentración del metal, más alta la absorción de la luz. El grado de absorción es medido y convertido a valores de ppm del metal por la lectura de una computadora. Los espectrómetros de horno de grafito utilizan un cilindro hueco calentado eléctricamente para contener la muestra y pueden ser usados niveles de metal de desgaste residuales ultra bajos. Esto puede incrementar la sensibilidad de 100 a 1000 veces respecto del método de la llama de acetileno.

Destreza: Para tomar la muestra: un trabajador semi-especializado debidamente capacitado. Para operar el equipo: un técnico de laboratorio adecuadamente capacitado. Para analizar los resultados: un analista químico experimentado

Ventajas: Popular en establecimientos pequeños para determinar concentraciones de Metal de desgaste en análisis de aceites usados. Alta exactitud y precisión, alta repetitibilidad a bajo costo. AA no sufre de interferencia espectral.

Desventajas: Las muestras requieren preparación. El tiempo de análisis es mayor. Requiere un gas inflamable. Puede fallar en vaporizar partículas mayores a 5 micrones.

5.5 Espectroscopía Fluorescente de Rayos X

Condición monitoreada: Metal de desgaste como el hierro, aluminio, cromo, plomo, estaño, cobre, níquel y plata: los aditivos de aceite conteniendo boro, fósforo, zinc, calcio, magnesio o bario: contaminantes como sílice: corrosión

Aplicaciones: Aceite utilizado en motores diesel y nafteros, turbinas de gas, transmisiones, cajas reductoras, compresores y sistemas hidráulicos.

Intervalo P-F: Generalmente varios meses

Funcionamiento: Una muestra de aceite es expuesta a una fuente de rayos X de alta energía que eleva el nivel de energía de los átomos de la muestra. Esto hace que los contaminantes emitan una energía secundaria característica de rayos X, además la radiación medida es la fluorescencia característica de los elementos químicos de la muestra se convierte en un analizador de señal multi-canal en la información elemental respectiva.

Destreza: Para obtener la muestra: un trabajador semi-especializado debidamente *capacitado:* Para operar el equipo: un técnico adecuadamente formado. Para interpretar los resultados: un ingeniero experimentado

Ventajas: Gran exactitud, precisión y repetitibilidad. Los softwares actuales han simplificado su operación e interpretación de datos. Cubren un rango más amplio de elementos químicos que AA o EA. Puede ver cualquier tamaño de partículas

Desventajas: Requiere de un detector refrigerado criogénicamente para límites de detección comparables a EA o AA. Mayor tiempo de análisis. El análisis de elementos más livianos requieren mayores energías de rayos X y por lo tanto medidas de precaución mayores en el laboratorio.

5.6 Espectrometría de Rayos X de Energía Dispersa

Condición monitoreada: Metal de desgaste (como el hierro, aluminio, cromo, plomo, estaño, cobre, níquel y plata): los aditivos de aceite conteniendo boro, fósforo, zinc, calcio, magnesio o bario: contaminantes como sílice: corrosión

Aplicaciones: Aceite utilizado en motores diesel y nafteros, turbinas de gas, transmisiones, cajas reductoras, compresores y sistemas hidráulicos.

Intervalo P-F: Generalmente varios meses

Funcionamiento: Un espectrómetro de energía dispersa (EDS) añadido a un microscopio de barrido electrónico (SEM) permite la detección de los rayos X producidos por el impacto de un haz electrónico en la muestra, y por lo tanto permitiendo un análisis cualitativo y cuantitativo. El haz electrónico del SEM es utilizado para excitar a los átomos en la superficie del sólido. Estos átomos excitados producen rayos X característicos que son detectados fácilmente. Utilizando la función de barrido del SEM, puede obtenerse una distribución espacial de los elementos.

Destreza: Para tomar la muestra: un operario semi-especializado adecuadamente capacitado. Para hacer el ensayo: un técnico adecuadamente capacitado. Para interpretar los resultados: un ingeniero experimentado

Ventajas: Una rápida identificación de partículas: Imágenes elementales y líneas de barrido muy rápidas

Desventajas: No es una técnica en línea: Requiere equipamientos de laboratorio costosos: Alto grado de especialización para interpretar los resultados.

5.7 Fuerza Dieléctrica (ASTM D-877 y D-1816)

Condición monitoreada: La habilidad de un aceite aislante a resistir esfuerzos eléctricos causados por contaminantes conductivos como virutas metálicas, fibras o agua libre

Aplicaciones: aceites aislantes de transformadores, interruptores y cables

Intervalo P-F: Varios meses.

Funcionamiento: El recipiente de la muestra es invertido y revuelto varias veces antes de llenar la taza de ensayo. Se llena la taza de ensayo hasta el tope con electrodos de latón y se aplica un voltaje creciente a una tasa de 3 kV/s (D-877) o 5 kV/s (D-1816) con dos electrodos espaciados a 2,54 mm (D-877), 2 mm (D-1816) entre sí, hasta que colapsa. Este valor es registrado y guardado. Se realizan cinco ensayos con una tasa a intervalos de un minuto. El promedio de las cinco rupturas es considerado el voltaje de ruptura dieléctrica de la muestra. Los transformadores alto y medio voltaje deben observar el siguiente límite, > 25 kV para aceite en servicio, > 30 kV para aceite nuevo. El ensayo D-877 se utiliza para voltajes estimados por debajo de 230 kV, el ensayo D-1816 se utiliza para voltajes estimados sobre 230 kV.

Destreza: Para tomar la muestra: un electricista. Para llevar a cabo el test: un técnico de laboratorio adecuadamente capacitado.

Ventajas: Ensayo rápido y simple. El transformador no tiene que ser sacado fuera de servicio para tomar la muestra. Es un buen indicador de las condiciones generales del transformador.

Desventajas: Los resultados del ensayo dependen de la técnica de muestreo. El ensayo es sensible a la temperatura ambiente y humedad. Existe algún riesgo en la manipulación de PCBs. Utiliza materiales y equipamientos peligrosos. No es una técnica en línea.

5.8 Tensión Interfasial (ASTM D-971)

Condición monitoreada: Presencia de compuestos hidrofílicos (un compuesto soluble en agua o que atrae agua a su superficie)

Aplicaciones: Aceites aisladores derivados del petróleo usados en transformadores, interruptores y cables.

Intervalo P-F: Meses.

Funcionamiento: La tensión interfacial es determinada mediante la medición de la fuerza necesaria para desprender un anillo plano de alambre de platino de la interfase entre una muestra de aceite y agua destilada. Después de calibrar en cero el dispositivo (conocido como tensiómetro), el anillo de platino es sumergido en el agua hasta una profundidad de 5 mm. Se vierte una muestra de aceite filtrado sobre el agua hasta lograr una profundidad de 10 mm. La interfase aceite-agua se deja reposar durante 30 segundos, luego el recipiente se baja hasta que la película colapsa. Se calcula entonces la tensión interfacial. Las tensiones de los transformadores de alta y media no deben exceder más de 27 dinas/cm para aceite en servicio y 40 dinas/cm para aceite nuevo

Habilidad: Para tomar una muestra, un electricista. Para llevar a cabo el test, un técnico de laboratorio adecuadamente entrenado.

Ventajas: Indicación confiable de los compuestos solubles en agua. El ensayo toma alrededor de 1 minuto. El transformador no tiene que sacarse de servicio para monitorear el aceite aislante.

Desventajas: El test depende de la técnica de muestreo. Se utilizan materiales peligrosos e inflamables para conducir el test. No es una técnica en línea – requiere equipamiento de laboratorio.

5.9 DIAL (Absorción Diferencial LIDAR)

Condiciones observadas: La composición química de gases dispersos en la atmósfera

Aplicaciones: Gases emitidos por chimeneas o pérdidas en tanques o cañerías

Intervalo P-F: De minutos a meses, dependiendo de la aplicación

Funcionamiento: Similar al LIDAR (vea 4.15 anteriores), excepto que se usan dos longitudes de onda diferenciales. Una de ellas es ajustada para corresponder a un gas dado, por lo tanto una longitud de onda es absorbida y la otra es reflejada. La cantidad de gas presente es determinada midiendo la cantidad de luz reflejada. La ubicación del gas puede ser determinada por triangulación basada en las lecturas tomadas desde dos puntos.

Destreza: Un ingeniero experimentado

Ventajas: Pueden cubrir áreas amplias

Desventajas: Deben ser calibradas para gases individuales: Muy costoso y poco probable que sea económico para un solo sitio: Operar el equipo requiere un alto nivel de destreza.

5.10 Una Nota Preliminar sobre la Medición Química de las Propiedades de Fluidos

Las técnicas descriptas en esta sección del punto 5 del presente anexo son usadas para detectar fallos incipientes de los fluidos mismos. Se aplican a combustibles, aceites lubricantes y/o gases. Son usados principalmente para analizar las propiedades de la base de los fluidos y/o la presencia/condición de los aditivos (aunque algunos también detectan contaminantes). Los elementos más comúnmente detectados por estas técnicas son listados a continuación.

- **Antimonio** de componentes de la grasa
- **Arsénico** de agentes anticorrosivos o biocidas
- **Bario** de aditivos detergentes, dispersantes y antioxidantes de combustibles y aceites
- **Boro** de aditivos anticorrosivos de refrigerantes de motor y agentes antiexplosión en combustibles.
- **Calcio** de detergentes y/o aditivos dispersantes
- **Cromo** de antioxidantes de combustibles de avión
- **Cobalto** de niveles residuales naturales de petróleo crudo
- **Cobre** de niveles residuales naturales de petróleo crudo y aditivos de lubricantes
- **Hierro** de niveles residuales naturales de petróleo crudo
- **Plomo** de aditivos antidesgaste de algunos lubricantes, a veces agregados al combustible como agente antiexplosión

- **Magnesio** de detergentes y/o aditivos dispersantes
- **Molibdeno** de niveles residuales naturales de petróleo crudo y de aditivos antifricción de algunos lubricantes
- **Níquel** de niveles residuales naturales de petróleo crudo generalmente en conjunto con vanadio
- **Fósforo** de niveles residuales naturales de petróleo crudo y de aditivos antidesgaste de algunos lubricantes
- **Potasio** de niveles residuales naturales de petróleo crudo
- **Selenio** de niveles residuales naturales de algunos petróleos crudos y carbón
- **Sílice** de agentes antiespumantes de algunos aceites
- **Sodio** de niveles residuales naturales de petróleo crudo y agua de mar
- **Sulfuro** de niveles residuales naturales de petróleo crudo en algunos combustibles. Utilizado como un agente anticorrosión en lubricantes de cajas reductoras y como antioxidantes en aceites lubricantes.
- **Vanadio** de niveles residuales naturales de petróleo crudo
- **Zinc** encontrado naturalmente en algunos petróleos crudos. Usado como aditivo antidesgaste de lubricantes de automotores y como un agente antioxidante de lubricantes marinos.

5.10 Espectroscopía Infrarroja de Transformada de Fourier (FT-IR)

Condiciones observadas: Deterioro, oxidación, contenido de agua y agotamiento de aditivos antidesgaste en aceites minerales y lubricantes sintéticos

Aplicaciones: Aceites lubricantes de motores de combustión, sistemas hidráulicos, etc.

Intervalo P-F: Generalmente de varias semanas a meses

Funcionamiento: Como la espectroscopía de absorción atómica, FT-IR mide la energía luminosa absorbida de una longitud de onda específica para determinar el nivel de elementos en una muestra. Utiliza un haz infrarrojo de banda ancha y baja potencia convertido a un patrón de interferencia constructivo y destructivo por un interferómetro de Michelson. El patrón de interferencia es pasado por una muestra donde es alterado por los niveles de absorción característica de los elementos del aceite y contaminantes. El patrón de interferencia alterado entra a un detector donde es convertido a una señal electrónica de frecuencia audible, luego convertido a información de longitud/amplitud de onda individual por una transformada de Fourier. La absorción del aceite, aditivos y contaminantes a sus respectivas longitudes de onda es medida, generando un espectro escalar, a menudo llamado 'huella dactilar'. La huella de la muestra es comparada con una muestra de aceite sin uso utilizando un software inteligente

Destreza: Para tomar la muestra: un operario semi-especializado adecuadamente capacitado. Para operar el espectrómetro: un técnico de laboratorio adecuadamente capacitado. Para analizar los resultados del ensayo: un analista químico experimentado

Ventajas: No utiliza químicos peligrosos. Los niveles de energía más bajos no alteran la estructura molecular de los compuestos de la muestra, al contrario de la absorción atómica (AA). La información puede ser convertida a parámetros ASTM equivalentes. Buena repetitibilidad. Los datos de número de ácido total (TAN) o número de base total (TBN) pueden ser obtenidos del FT-IR

Desventajas: Utiliza solvente inflamable para limpieza. Fabricantes de equipos FT-IR distintos utilizan distintos algoritmos de extracción de datos para los parámetros de condición del aceite y contaminantes. Sólo sensible a 1000 ppm de contaminación de agua.

5.11 Espectroscopia Infrarroja

Condiciones observadas: La presencia de gases como el hidrógeno, hexafluoruros sulfúricos, nitrógeno, metano, monóxido de carbono y etileno; degradación de fluidos.

Aplicaciones: Como para la cromatografía de gases

Intervalo P-F: Altamente dependiente de la aplicación

Funcionamiento: Los átomos de una molécula vibran alrededor de su posición de equilibrio con frecuencias diferentes pero determinables precisamente. Una muestra, colocada en un haz de luz infrarrojo, absorbe estas frecuencias características. Las bandas de absorción, graficadas en función del longitud de la onda, especifican el espectro infrarrojo. La posición de la escala de los puntos de absorción es una característica cualitativa y pueden obtenerse conclusiones de la intensidad de las bandas de absorción

Destreza: Para operar el espectrómetro infrarrojo precalibrado: un asistente de laboratorio capacitado. Para interpretar y evaluar los resultados: un técnico de laboratorio

Ventajas: Rápido: Alta sensibilidad: Puede ser operado por un asistente de laboratorio cuando el equipo está precalibrado: Los gráficos proveen un registro permanente

Desventajas: Se necesitan experiencia y habilidad considerables para analizar los resultados: Equipo de laboratorio: Requiere de un amplio rango de aplicaciones para justificar el costo del equipo.

5.12 Cromatografía de Gases

Condiciones observadas: Gases emitidos como resultado de fallos. Hay más de 200 gases presentes en aceites de aislación eléctrica de los cuales nueve son de interés. En orden ascendente de criticidad, estos son el nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), metano, etano, etileno, hidrógeno y acetileno. Grandes cantidades de CO o CO_2 indican un sobrecalentamiento en los bobinados; CO, CO_2 y metano indican puntos calientes en la aislación; hidrógeno, etano y metano indican descargas en la corona; el metano es un signo de la formación de arcos internos

Aplicaciones: Sistemas de generación nuclear, generadores de turbina, sistemas sellados con sulfuros de hexafluoros o nitrógeno, aceites de transformadores, interruptores, etc.

Intervalo P-F: Altamente variable dependiendo de la naturaleza de la falla

Funcionamiento: Una muestra de gas es inyectada a través de una puerta de inyección de un compartimento de goma de silicona mantenida a una temperatura mayor que el punto de ebullición del elemento menos volátil de la muestra. Un gas portador (generalmente un gas inerte como el helio, argón o nitrógeno) barre la muestra vaporizada fuera de la puerta y hacia adentro de una columna de separación ubicada en un horno controlado termostáticamente. Los elementos con un amplio rango de puntos de ebullición son separados comenzando a una temperatura de horno baja y elevando la temperatura con el tiempo para extraer con solventes los elementos de alta temperatura. La columna de separación contiene materiales absorbentes como tierra de diatomeas para separar los gases. Los gases emergentes de la columna fluyen hacia un detector que puede ser un espectrómetro de masa o espectrómetro infrarrojo de transformada de Fourier, para registrar el espectro tal como se extrae de la columna usando solventes. Se utilizan diferentes detectores para distintas aplicaciones de separación

Destreza: Para tomar la muestra: un electricista. Para conducir el ensayo: un técnico de laboratorio adecuadamente capacitado. Para analizar los resultados y ver tendencias: un ingeniero eléctrico

Ventajas: Detección de alta sensibilidad (una parte en 1000 millones, en volumen): Una vez que el equipo ha sido calibrado, puede ser operado por un asistente de laboratorio

Desventajas: Es difícil de obtener muestras adecuadas para análisis sensibles: En sistemas grandes cualquier gas defectuoso será rápidamente diluido: Se necesita una habilidad considerable para interpretar los resultados: El equipo no es portátil: Requiere de una gran variedad de aplicaciones para justificar su compra: No es usado ampliamente en mantenimiento.

5.13 Espectroscopía de Absorción de Luz Ultravioleta y Visible

Condiciones observadas: Cambios en las propiedades del aceite (alcalinidad, acidez, insolubles).

Aplicaciones: Aceites utilizados en motores diesel y nafteros, turbinas de gas, transmisiones, cajas reductoras, compresores y sistemas hidráulicos

Intervalo P-F: Varios meses

Funcionamiento: Una muestra de aceite es sujeta a una luz ultravioleta intensa, generalmente de una lámpara de hidrógeno o deuterio, o a luz visible de una lámpara de tungsteno. La luz ultravioleta y la visible son suficientemente energéticas para promover a los electrones de los elementos de la muestra a niveles de energía más altos, causando que la luz de una longitud de onda específica sea absorbida. La

absorción puede ser monitoreada utilizando un separador de longitud de onda como un prisma o un polarizador monocromático. La cantidad de luz absorbida está relacionada con la concentración de cada elemento. Las medidas cuantitativas pueden ser realizadas barriendo el espectro o a una longitud de onda única.

Destreza: Un técnico de laboratorio experimentado y capacitado

Ventajas: Útil para medidas cuantitativas

Desventajas: Tanto el espectro ultravioleta y como el visible tienen una gran cantidad de características que son de uso limitado para la identificación de muestras. Se necesita una habilidad y experiencia considerable para analizar los resultados. El equipo es de laboratorio y es costoso.

5.14 Activación de Capa Delgada

Condiciones observadas: Desgaste

Aplicaciones: Álabes de turbina, cilindros de motores, ejes, cojinetes, contactos eléctricos, rieles y sistemas de enfriamiento.

Intervalo P-F: Meses.

Funcionamiento: Una capa fina de átomos en la superficie del material a ser monitoreado se hace radioactiva mediante el bombardeo con un haz de partículas cargadas. Los sistemas de monitoreo son calibrados para tomar en cuenta el decaimiento radiactivo. Pérdidas de material de hasta 1mm pueden ser medidos hasta 4 años luego de su activación

Destreza: Para tomar las muestras: un trabajador semi-especializado adecuadamente formado

Ventajas: El desgaste puede ser medido durante la operación normal de la planta hasta con material substancial interviniente

Desventajas: Los componentes tienen que ser quitados para ser activados a menos que se utilicen probetas: Se requiere reactivación cada cuatro años.

5.15 Microscopio de Barrido Electrónico (SEM)

Condiciones observadas: Presencia de elementos extraños en superficies fracturadas

Aplicaciones: Cualquier tipo de superficie, películas finas e interfases encontradas en semiconductores en bruto, semiconductores terminados, superficies metálicas y de acero, dispositivos médicos, cerámicas y polímeros, etc.

Intervalo P-F: Depende de la aplicación

Funcionamiento: Se barre la superficie de la muestra con un haz de electrones enfocado y sintonizado a tal efecto. Esto causa que una segunda corriente de electrones sea emitida desde la muestra variando de acuerdo al ángulo de incidencia del haz. La intensidad de la secundaria es utilizada para variar el brillo de un tubo de rayos catódicos que se sincroniza con el barrido de electrones, obteniendo una imagen topográfica de la superficie de la muestra. Pueden usarse detectores

diferentes para proveer otra información. Por ejemplo, un detector electrónico retrodisperso provee información de un número atómico promedio, mientras que un detector de rayos X de energía dispersa auxiliar puede identificar los elementos como el boro o uranio

Destreza: Técnico de laboratorio especializado

Ventajas: Alta resolución con poca preparación de muestra. La gran profundidad de campo permite usar muestras rugosas. Rápido análisis cualitativo de partículas y pequeñas áreas acopladas con un detector de rayos X de energía dispersa

Desventajas: Requiere más de un análisis para determinar causas raíz de fallos. Las muestras deben ser recubiertas con un film conductor. Técnica de laboratorio

5.16 Espectroscopía Electrónica Auger de Barrido

Condiciones observadas: Presencia de elementos extraños, mapeo de partículas finas, escamas de oxidación y corrosión sobre superficies fracturadas.

Aplicaciones: Cualquier tipo de superficie, películas finas e interfases encontradas en semiconductores en bruto y terminados, superficies metálicas y de acero, instrumental médico, cerámicas, polímeros.

Intervalo P-F: Depende de la aplicación

Funcionamiento: Un haz electrónico finamente enfocado irradia la muestra y crea un hoyo en el núcleo eyectando un electrón de un átomo de la muestra. El ion resultante luego se desexita cuando un electrón de un nivel superior llena el hueco y un tercer electrón – el electrón de Auger – es emitido para conservar la energía. Este electrón tiene una energía cinética característica del átomo emisor, que permite a los elementos ser identificados a una profundidad entre 2 y 20 capas atómicas

Destreza: Un técnico de laboratorio especialista

Ventajas: Las capacidades de un SEM generalmente se incorporan al instrumento Auger. Sensible a la superficie. Mapeo elemental. Rápido análisis

Desventajas: Requiere más de un análisis para determinar la causa raíz. Técnica de laboratorio.

5.17 Monitoreo de Corrosión Electroquímica

Condiciones observadas: Corrosión de material dentro de hormigón

Aplicaciones: Pilares estructurales de acero, estructuras de soporte, etc.

Funcionamiento: Se pasan corrientes pequeñas entre la estructura y una lanza insertada en la tierra cerca de la estructura. Estas corrientes afectan el potencial de la estructura en cualquier punto donde la corrosión se está desarrollando. Los cambios en el potencial son medidos por una media celda puesta a tierra y cercana a la estructura. El grado de corrosión está directamente relacionado con la corriente requerida para desplazar el potencial. Las altas corrientes indican la necesidad de una inspección física

Destreza: Un técnico adecuadamente capacitado

Ventajas: No es necesario excavar las estructuras para la inspección a menos que esta técnica revele la necesidad de hacerlo

Desventajas: No mide hasta que punto avanzó la corrosión o la ubicación precisa de la misma: La tierra debe estar húmeda.

5.18 Analizadores de Emisión de Escapes (Análisis de Cuatro gases)

Condiciones observadas: Eficiencia de combustión mediante la medición de las concentraciones de oxígeno (O_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2) e hidrocarburos (CH) en emisiones de escape. Pérdidas de gases de escape

Aplicaciones: Motores de combustión interna

Intervalo P-F: De semanas a meses

Funcionamiento: Una probeta de muestreo se introduce en el caño de escape aguas arriba del convertidor catalítico. La suciedad y el aceite son removidos por un prefiltro y la humedad por un separador de agua. Los sensores de gas toman las concentraciones de los gases y las lecturas son mostradas como porcentajes (HC en partes por millón). Un alto CO indica que la máquina está andando con mezcla rica. Un alto O_2 indica un pobre encendido o pérdidas de escape. CO_2 está a su máxima en el punto óptimo de mezcla aire-combustible (air-fuel ratio – AFR), y decae cuando el AFR es muy rico o muy pobre. Alto HC indica fallas de encendido o combustión incompleta. Las lecturas 'Lambda' también son calculadas en la mayoría de los analizadores. Lambda es el nombre dado a la relación del AFR real sobre el ideal de 14,7. La lectura ideal de lambda es uno, y relaciones más pobres son mayores que uno

Destreza: Mecánico de automotores capacitado y experimentado

Ventajas: Señala precisamente fallos de emisión. Portátil

Desventajas: El equipo necesita colocarse fuera de servicio para conectar al analizador.

5.19 Titulación por Indicación de Color (ASTM D974)

Condiciones observadas: Deterioro del lubricante mediante la determinación del nivel de acidez y alcalinidad en una muestra de aceite

Aplicaciones: Aceite utilizado en motores diesel y nafteros, turbinas de gas, transmisiones, cajas reductoras, compresores y sistemas hidráulicos

Intervalo P-F: De semanas a meses

Funcionamiento: La muestra es disuelta en una mezcla de tolueno, alcohol isopropil y agua, y titulado con una base alcohólica o solución ácida, hasta que se produzca un cambio de color de la solución de naftolbenceno que se agregó. La acidez o alcalinidad es expresada en miligramos de hidróxido de potasio necesario para

neutralizar un gramo de aceite. Cuanto más alto el ácido o número base, mayor es el deterioro del aceite. Los transformadores de alta y media tensión deben ser < 0,5 mgKOH/gm para aceite nuevo y < 0,1 mgKOH/gm para aceite en servicio

Destreza: Técnico de laboratorio

Ventajas: Ensayo con 15% de precisión.

Desventajas: Sólo puede ser utilizado para aceites a base de petróleo. Venenoso, inflamable, químicos corrosivos utilizados en el ensayo. No puede ser usado para aceites oscuros.

5.20 Titulación Potenciométrica TAN/TBN (ASTM D664)

Condiciones observadas: Deterioro de lubricantes mediante la determinación del nivel de acidez de una muestra de aceite

Aplicaciones: Aceites usados en motores diesel y nafteros, turbinas de gas, transmisiones, cajas reductoras, compresores, sistemas hidráulicos y transformadores.

Intervalo P-F: De semanas a meses

Funcionamiento: La muestra es disuelta en una mezcla de tolueno, alcohol isopropil y agua titulada con hidróxido de potasio alcohólico. La acidez es determinada mediante la medición del cambio en la conductividad eléctrica a medida que se agrega hidróxido de potasio. El valor es expresado en mgKOH/g. Cuanto mayor el número ácido, mayor el deterioro del aceite.

Destreza: Técnico de laboratorio

Ventajas: Puede ser utilizado para aceites que son demasiado oscuros para utilizar el indicador de cambio de color. Ensayo preciso dentro de un 4%.

Desventajas: Sólo puede ser utilizado para aceites a base de petróleo. Para el ensayo se usan químicos peligrosos.

5.21 Titulación Potenciométrica TBN (ASTM D2896)

Condiciones observadas: Deterioro de lubricante mediante la medición de alcalinidad.

Aplicaciones: Aceites usados en motores diesel y nafteros, turbinas de gas, transmisiones, cajas reductoras, compresores, sistemas hidráulicos y transformadores.

Intervalo P-F: De semanas a meses

Funcionamiento: La muestra es disuelta en una mezcla de solvente de titulación que es titulado con ácido perclórico. Las lecturas potenciométricas (conductividad eléctrica) son graficadas en función de los volúmenes respectivos de solución titulada. La alcalinidad (número base) es calculada de la cantidad de ácido necesario por gramo equivalente (mgKOH/g). El ensayo es una medida de la habilidad del aceite para neutralizar ácidos corrosivos formados durante la operación, indicando su aptitud para uso continuo.

Destreza: Técnico de laboratorio

Ventajas: Puede ser utilizado sin importar el color del aceite. Preciso dentro del 15%.

Desventajas: Sólo puede ser utilizado para aceites a base de petróleo. Químicos peligrosos utilizados en el ensayo.

5.22 Factor de Potencia (ASTM D-924)

Condiciones observadas: Pérdidas dieléctricas en aceites de aislación eléctrica causados por la contaminación y deterioro de los mismos.

Aplicaciones: Aceites minerales de aislación de transformadores, interruptores, y cables

Intervalo P-F: Varias semanas

Funcionamiento: Se vierte una mezcla bien agitada en un vaso de precipitado limpio y se la calienta hasta a 2° C por debajo de la temperatura de ensayo. Se extrae la celda de la cámara de ensayo y se llena con la muestra caliente. El electrodo interior es insertado en la celda junto con un termómetro de mercurio. Se hacen las conexiones eléctricas a la celda. Luego se exige la muestra eléctricamente pasando un voltaje a través de la celda y se calcula el factor de potencia. Para transformadores de alta y media tensión el límite de factor de potencia debe ser menor a 1% a 25°C

Destreza: Para tomar la muestra: un electricista. Para conducir el ensayo: un técnico de laboratorio adecuadamente capacitado

Ventajas: Ensayo rápido y relativamente económico. El transformador no necesita sacarse de servicio para monitorear el fluido aislador

Desventajas: Utiliza materiales y equipos peligrosos. El test debe ser conducido en un laboratorio y el resultado depende de la técnica de muestreo.

Una Nota Preliminar en Monitoreo de Humedad

El agua en el aceite rápidamente reduce la vida de las máquinas y componentes. Por ejemplo, puede reducir la vida de un rodamiento tanto como 100 veces. También interfiere seriamente las propiedades lubricantes del aceite – por ejemplo, una gota de agua en 5 litros de aceite a 85° C destruye totalmente los aditivos antidesgaste a base de zinc. El agua directamente afecta al aceite mismo de las siguientes maneras:

- incrementa la oxidación, de esta forma produciendo barros y lacas
- incrementa la conductividad, que es especialmente indeseable en aceites de transformadores
- reacciona con antioxidantes para formar ácidos y precipitar sales
- reacciona con aditivos antidesgaste de dialquil ditiofosfato de zinc (ZDDP) para formar sulfito de hidrógeno y ácido sulfúrico
- promueve el crecimiento de microbios
- cambia la viscosidad del aceite
- degrada los mejoradores de viscosidad

El agua también afecta otros aspectos del sistema como sigue:
- oxida y corroe las superficies metálicas
- bloquea las válvulas por formación de cristales
- incrementa el desgaste
- pega válvulas y orificios
- acorta la vida de filtros
- absorbe más aire, lo que afecta a los núcleos de entrehierro

5.23 Ensayo de Titulación de Karl Fisher (ASTM D-1744)

Condiciones observadas: Agua en aceite

Aplicaciones: Sistemas de aceite cerrados como motores, cajas reductoras, transmisiones, compresores, sistemas hidráulicos, turbinas, transformadores, etc.

Funcionamiento: Se hace reaccionar una cantidad de muestra determinada con un reactivo de Karl Fischer que contiene yodo. Cuando el yodo está presente, la corriente pasará entre dos electrodos de platino. La humedad retenida en la muestra reacciona con el yodo, prolongando el ensayo mientras haya agua remanente que no haya reaccionado con el yodo. Una vez agotada, los electrodos son despolarizados por el yodo, completándose el ensayo. El cambio potenciométrico correspondiente es utilizado para determinar el punto final de la titulación y calcular la concentración de agua. La duración del ensayo indica el contenido de agua. Los transformadores de alta y media tensión no debieran exceder 25ppm a 20° C

Destreza: Técnico de laboratorio

Ventajas: Preciso para pequeñas cantidades de agua (partes por millón). Precisión cercana al 10%. El ensayo es relativamente rápido.

Desventajas: Es difícil obtener muestras adecuadas para análisis precisos son difíciles de obtener: En sistemas grandes cualquier falla de gas puede ser rápidamente diluída: Es necesaria una destreza considerable para interpretar los resultados: Equipo no portátil: Requiere un amplio rango de aplicaciones para justificar su compra: No es ampliamente utilizado en el ambiente de mantenimiento.

5.24 Monitoreo de Humedad (Cintilación Inducida por Vapor)

Condiciones observadas: Agua en el aceite.
Aplicaciones: Aceites utilizados en motores diesel y nafteros, turbinas de gas, transmisiones, cajas reductoras, compresores, sistemas hidráulicos y transformadores.
Intervalo P-F: Varias semanas
Funcionamiento: Se sumerge una probeta con un elemento calefactor miniatura en la muestra de aceite. Durante el ensayo el elemento calefactor emite a una temperatura constante, lo que causa que la humedad que está en suspensión en la muestra se evapore y emita una señal acústica distintiva conocida como crepitación. Un micrófono montado cerca del elemento de calefacción capta este sonido, lo

convierte en una señal electrónica y lo envía a un colector de datos para ser analizado. El algoritmo en el colector de datos se calibra para convertir la señal de entrada en el nivel de humedad expresado en ppm o en porcentaje. El equipo es capaz de detectar niveles de humedad desde 25 ppm hasta 10.000 ppm. El ensayo toma por lo general 30 segundos.

Destreza: Un técnico capacitado semi experimentado.

Ventajas: No necesita preparación de muestra. Es fácil y rápido. Detecta un rango amplio de concentraciones. Sólo se requiere de 70 mililitros de fluido para realizar el ensayo. No contiene partes móviles. No lo afecta la viscosidad, ni el color, la densidad, la contaminación, la conductividad, o el caudal del fluido. Portátil.

Desventajas: El equipamiento es costoso.

5.25 Ensayo de Crepitación (Sentidos humanos)

Condiciones observadas: Agua en el aceite.

Aplicaciones: Aceites utilizados en motores diesel y nafteros, turbinas de gas, transmisiones, cajas reductoras, compresores, sistemas hidráulicos y transformadores.

Intervalo P-F: De días a semanas

Funcionamiento: Se depositan unas cuantas gotas de aceite sobre la plancha caliente (cerca de 250°F o 120°C). Si hay agua presente se vaporiza rápidamente crepitando o haciendo un sonido similar a un estallido.

Destreza: Un técnico capacitado semi experimentado.

Ventajas: Es rápido, barato y fácil de usar. Efectivo y económico.

Desventajas: No se puede escuchar fácilmente la crepitación de aceites con humedades menores a 300 – 400 ppm. Es un ensayo subjetivo variando tanto entre tests como entre usuarios. No cuantifica la cantidad de agua presente. Requiere de áreas silenciosas para escuchar las crepitaciones. Es peligroso el manipuleo de aceite cerca de superficies calientes

5.26 Ensayo de Crepitación (Sensor auditivo)

Condiciones observadas: Agua en el aceite.

Aplicaciones: Aceites utilizados en motores diesel y nafteros, turbinas de gas, transmisiones, cajas reductoras, compresores, sistemas hidráulicos y transformadores.

Intervalo P-F: Semanas

Funcionamiento: Se monta un micrófono junto a una plancha caliente (elemento calefaccionado). Se depositan unas cuantas gotas de aceite sobre la plancha caliente (cerca de 250°F o 120°C). Si hay agua presente se vaporiza rápidamente crepitando o haciendo un sonido similar a un estallido. El micrófono capta este sonido, lo convierte en una señal electrónica y lo envía a un colector de datos para ser analizado. El algoritmo en el colector de datos se calibra para convertir la señal de entrada en el nivel de humedad expresado en ppm o en porcentaje.

Destreza: Un técnico capacitado y experimentado.

Ventajas: Puede detectar niveles de humedad desde 25 ppm hasta 10.000 ppm. El ensayo toma 30 segundos. Fácil de usar.

Desventajas: Es peligroso el manipuleo de aceite cerca de superficies calientes. Ensayo de laboratorio.

5.27 Ensayo de Brillo y Claridad

Condiciones observadas: Agua en el aceite.

Aplicaciones: Aceites utilizados en motores diesel y nafteros, turbinas de gas, transmisiones, cajas reductoras, compresores, sistemas hidráulicos y transformadores.

Intervalo P-F: Varios días

Funcionamiento: A medida que se eleva la humedad en el aceite, el aceite se vuelve turbio – en otras palabras, ya no es brillante y cristalino. No obstante, nótese que algunos aceites pueden disolver grandes cantidades de agua (dependiendo de la viscosidad y del aditivo) y todavía verse brillantes y cristalinos. Sólo cuando el aceite tiene un estado avanzado de emulsificación, cuando el agua y el aceite se combinan (no se mezclan), deja de verse claro y brillante.

Destreza: Un técnico experimentado.

Ventajas: No requiere equipamiento para el ensayo. Es económico, rápido, simple y barato.

Desventajas: El color del aceite puede traer aparejado errores en el ensayo. Es subjetivo.

6 Monitoreo de los Efectos Físicos

6.1 Tintas Penetrantes

Condiciones observadas: Discontinuidades en la superficie o grietas debidas a fatiga, desgaste, contracción de superficies, amoladura, tratamiento térmico, fatiga por corrosión, tensiones de corrosión y resquebrajamiento por hidrógeno.

Aplicaciones: Materiales ferrosos y no ferrosos como soldaduras, superficies mecanizadas, estructuras de acero, ejes, calderas, estructuras plásticas, tanques de compresores, etc.

Intervalo P-F: De varios días a varios meses, dependiendo de la aplicación

Funcionamiento: El líquido penetrante se aplica a la superficie de prueba y se permite que pase suficiente tiempo para que penetre en las discontinuidades de la superficie. Se limpia el exceso de penetrante de la superficie. Se aplica entonces un revelador que provoca que el penetrante salga de la discontinuidad y se deposite en la superficie de prueba, donde se interpreta y evalúa. Los líquidos penetrantes están

categorizados de acuerdo con el tipo de tinta (tinta visible, fluorescente o penetrantes sensitivos duales) y con el proceso requerido para removerlos de la superficie de prueba (lavable con agua, post emulsionado o lavable con disolvente)

Destreza: Para aplicar el penetrante: un operario semi especializado debidamente entrenado. Interpretación: un técnico con experiencia suficiente.

Ventajas: Los juegos de tinta penetrante visible son muy baratos(pero los juegos fluorescentes, aunque más caros, son mucho más sensibles): Detecta discontinuidades en superficies de materiales no ferrosos.

Desventajas: Los penetrantes fluorescentes requieren un área oscura para la inspección: Para evaluar los resultados se requiere personal altamente cualificado: No es una técnica de monitoreo en-línea: Monitorea solamente roturas superficiales: No pueden examinarse materiales que tengan superficies muy porosas.

6.2 Penetrante Fluorescente Electrostático

Condiciones observadas y aplicaciones: Como para tintas penetrantes

Intervalo P-F: Un poco más largo que para tintas penetrantes.

Funcionamiento: Como para tintas penetrantes, excepto que se tiene que inducir una polarización electrostática opuesta entre la pieza de trabajo y los materiales de prueba.

Destreza: Como para tintas penetrantes

Ventajas: La polarización asegura una deposición del penetrante y del revelador más completa y uniforme que con los penetrantes ordinarios, lo que da una sensibilidad mayor.

Desventajas: Como para los penetrantes fluorescentes ordinarios

6.3 Inspección de Partículas Magnéticas

Condiciones observadas: Grietas en la superficie y cerca de la misma causas por fatiga, desgaste, laminación, inclusiones, contracción de superficies, amoladura, tratamiento térmico, resquebrajamiento por hidrógeno, solapadura, costuras, fatiga por corrosión y tensiones de corrosión.

Aplicaciones: Metales ferromagnéticos tales como tanques de compresores, soldaduras, superficies mecanizadas, ejes, estructuras de acero, calderas, etc.

Intervalo P-F: De días a meses dependiendo de la aplicación.

Funcionamiento: Se magnetiza la pieza a ensayar y se rocía el área a inspeccionar con una solución que contiene partículas de hierro muy finas. Si existe una grieta, las partículas de hierro serán atraídas hacia la filtración de flujo magnético causado por la discontinuidad, formando una marca que luego se interpreta y evalúa. La pulverización de partículas magnéticas fluorescentes proveen una mayor sensibilidad, pero la inspección deberá llevarse a cabo bajo luz ultravioleta en una cabina oscura.

Destreza: Aplicación: un operario semi-especializado. Interpretación: un técnico experimentado

Ventajas: Fiable y sensible: Se usa mucho

Desventajas: Detecta solamente las grietas que están cerca o en la superficie: El ensayo lleva mucho tiempo: Contamina las superficies limpias: No es una técnica de monitoreo en-línea

6.4 Película Magnética Desprendible

Condiciones observadas: Discontinuidades de superficie y grietas causadas por fatiga, desgaste, contracción de superficies, amoladuras, tratamientos térmicos, resquebrajamiento por hidrógeno, laminaciones, fatiga por corrosión, tensiones de corrosión, solapamiento y costuras.

Aplicaciones: Metales ferromagnéticos tales como tanques de compresores, soldaduras, superficies mecanizadas, ejes, engranajes, estructuras de acero, calderas, etc.

Intervalo P-F: De varias semanas a meses

Funcionamiento: Se vierte en o sobre el área bajo inspección una solución de goma de silicona auto-curable que contiene partículas finas de óxido de hierro y se la somete a un campo magnético inducido por un imán. Las partículas magnéticas de la solución migran hacia las grietas bajo la influencia del campo magnético. Después del curado, la goma se desprende de los agujeros como si fuera un tapón o como si fuera un recubrimiento si está sobre las superficies. Las grietas aparecen en la goma curada como líneas negras intensas. Para el estudio de grietas pequeñas puede necesitarse la ayuda de un microscopio.

Destreza: Para la aplicación de la solución de goma: un operario entrenado semi especializado. Para la evaluación: un técnico experimentado

Ventajas: Se puede usar para examinar áreas con acceso visual limitado: Provee un registro permanente.

Desventajas: Detecta sólo grietas superficiales: No es una técnica en-línea.

6.5 Ultrasonido - Técnica de Eco Pulso

Condiciones observadas: Las discontinuidades de la superficie y por debajo de ella causadas por fatiga, tratamientos térmicos, inclusiones, falta de penetración y porosidades gaseosas en soldaduras, laminación; El espesor de materiales sujetos a desgaste y a corrosión

Aplicaciones: Materiales ferrosos y no ferrosos relacionados con las soldaduras, estructuras de acero, calderas, tubos de calderas, estructuras plásticas, ejes, tanques de compresores, etc.

Intervalo P-F: De varias semanas a varios meses

Funcionamiento: Un emisor envía un impulso ultrasónico a la superficie de prueba. Un receptor amplificador envía el impulso de retomo a un osciloscopio. El eco es una combinación de impulsos de retorno desde el lado opuesto de la pieza de trabajo y desde cualquier discontinuidad interpuesta. El tiempo transcurrido entre las

señales de retomo iniciales y la cota relativa indica la ubicación e importancia de la discontinuidad. Se puede conseguir una idea aproximada del tamaño y la forma del defecto por triangulación.

Destreza: Un técnico entrenado y experimentado.

Ventajas: Es aplicable a la mayoría de los materiales

Desventajas: Es difícil diferenciar los tipos de defectos.

6.6 Ultrasonido - Técnica de Transmisión

Condiciones observadas, Aplicaciones e Intervalo P-F: Como para la técnica de eco pulso

Funcionamiento: Un transmisor emite ondas continuas desde un transductor que se pasa directamente a través de la pieza de prueba. Las discontinuidades reducen la cantidad de energía que llega al receptor por lo que se pueden detectar.

Destreza y Ventajas: Como para la técnica de eco pulso

Desventajas: Como para la técnica de eco pulsos: Los problemas de modulación asociados con las ondas estacionarias causan que se obtengan lecturas falsas.

6.7 Ultrasonido - Técnica de Resonancia

Condiciones observadas, Aplicaciones e Intervalo P-F: Como para la técnica de eco pulso (también se usa para testear la fuerza de adherencia entre superficies delgadas)

Funcionamiento: Se mueve un transmisor sobre la superficie de prueba y se observa la señal. La resonancia mantiene la señal de transmisión alta cuando no existen discontinuidades. Cuando hay discontinuidades, éstas causan que la señal transmitida se reduzca o desaparezca

Destreza, Ventajas y Desventajas: Como para la técnica de eco pulsos.

6.8 Ultrasonido – Modulación de Frecuencia

Condiciones observadas, Aplicaciones e Intervalo P-F: Como para la técnica de eco pulso

Funcionamiento: Se usa un transductor para enviar continuamente ondas ultrasónicas a frecuencias de radiación cambiantes. Los ecos vuelven a la frecuencia inicial y chocan con las ondas nuevas de frecuencia cambiada. Midiendo la fase entre las frecuencias puede determinarse la ubicación del defecto.

Destreza, Ventajas y Desventajas: Como para la técnica de eco pulsos

6.9 Evaluación de Probetas

Condiciones observadas: Erosión y corrosión general o localizada.

Aplicaciones: Igual que para el método de la resistencia eléctrica, excepto para molinos de papel.

Intervalo P – F: Varios meses.

Funcionamiento: Las probetas por lo general son hechas de acero blando de baja cantidad de carbono o de una categoría similar al de la pared del recipiente o tubería. Las probetas son preparadas cuidadosamente, pesadas y medidas antes de ser expuestas. Después de que las probetas han estado inmersas en la corriente del fluido durante un tiempo determinado (varias semanas a varios meses) se sacan y se controla la pérdida de peso y las picaduras sufridas por oxidación. De esas mediciones, puede calcularse la cantidad relativa de pérdida de metal de las paredes de la tubería y puede estimarse el grado de picadura de las mismas.

Destreza: Un técnico debidamente entrenado.

Ventajas: Muy satisfactorio cuando la corrosión está estabilizada: Utilizable donde se prohiben dispositivos eléctricos: Bastante económico: indica el tipo de corrosión: Muy difundido.

Desventajas: Se requiere de mucho tiempo de exposición: Baja respuesta en condiciones de corrosión peligrosas: El uso de probetas conlleva mano de obra intensiva: La determinación del grado de corrosión generalmente lleva varias semanas: No puede asignar problemas a condiciones inusuales o temporarias: Las probetas son inadecuadas para la industria de pulpa y del papel.

6.10 Ensayo de Corrientes Parásitas

Condiciones observadas: Las discontinuidades de la superficie y por debajo de ella causadas por desgaste, fatiga y tensiones; detección de cambios dimensionales producidos por desgaste, esfuerzo y corrosión; determinación de la dureza del material.

Aplicaciones: Materiales ferrosos utilizados en tubos de calderas, tubos de intercambiadores de calor, tuberías hidráulicas, cables de izado, vías de tren, conductores aéreos, etc.

Intervalo P-F: Varias semanas, dependiendo de la aplicación

Funcionamiento: Una bobina de prueba que lleva corriente alterna de 100kHz a 4MHz induce corrientes parásitas en las partes inspeccionadas. Las corrientes parásitas se desvían alrededor de las grietas, comprimiéndose, demorándose y debilitándose. La reacción eléctrica en la bobina de prueba se amplifica y registra en un tubo de rayos catódicos (CRT) o en un contador de lectura directa.

Destreza: Un técnico debidamente entrenado y experimentado

Ventajas: Es aplicable a una amplia gama de materiales conductores. Funciona sin tener que preparar la superficie. Alta sensibilidad de detección de defectos: provee un registro permanente utilizando un registrador gráfico con banda de papel

Desventajas: Pobre respuesta en materiales no ferrosos

6.11 Radiografía de Rayos X

Condiciones observadas: Discontinuidades de superficie y debajo de ella causadas por tensiones, fatiga, inclusiones, falta de penetración de soldaduras, porosidad, corrosión intergranular, tensiones por corrosión. Discontinuidades en los semiconductores tales como cables flojos.

Aplicaciones: Soldaduras, estructuras de acero, estructuras plásticas, componentes metálicos desgastados en motores, compresores, cajas reductoras, bombas, ejes, etc.

Intervalo P-F: Varios meses

Funcionamiento: Se realiza una radiografía pasando rayos x o rayos gama a través de materiales que son ópticamente opacos. La absorción de los rayos x iniciales depende del grosor y la naturaleza del material, y la intensidad de la radiación inicial. Cuando la película se expone a estos rayos, las áreas expuestas aparecen oscuras cuando se revela la película; el grado de oscuridad depende de la cantidad de radiación que llega a la película. La película será más oscura donde el objeto sea más delgado. Se observa como una mancha oscura cuando existe una grieta, una inclusión o un hueco.

Destreza: Para usar el equipo: Un técnico hábil y debidamente entrenado. Para interpretar los resultados: Un técnico de grado superior o un ingeniero.

Ventajas: Provee un registro permanente: Detecta defectos en partes o estructuras que no son accesibles visualmente: Es la técnica de rayos X más aplicada.

Desventajas: La sensibilidad es a menudo baja para defectos tales como grietas: A veces se necesita tener acceso por dos partes.

6.12 Fluoroscopía Radiográfica de Rayos X

Condiciones observadas, Aplicaciones e Intervalo P-F: Como en la radiografía de rayos X

Funcionamiento: La radiación transmitida produce en la película una fluorescencia de intensidad variable en lugar de las manchas oscuras. La claridad de la imagen es proporcional a la intensidad de la radiación transmitida

Destreza: Como para la radiografía de rayos X

Ventajas: Produce resultados rápidos. Tiene capacidad escaneo: Detecta defectos en partes o estructuras que no son accesibles visualmente: Técnica ampliamente aplicable: Bajo costo.

Desventajas: No produce registro permanente: Generalmente da una imagen de menor calidad: Menos sensible que la radiografía de rayos X

6.13 Barioscopios rígidos

Condiciones observadas: Grietas superficiales y su orientación, películas de óxido, defectos de soldadura, corrosión, desgaste, fatiga.

Aplicaciones: Inspección visual interna de tubos estrechos, orificios y cavidades de motores, bombas, turbinas, compresores, calderas, etc. en automotores, construcción de barcos, aviones, generación de energía, industrias químicas, etc.

Intervalo P-F: Varias semanas dependiendo de la aplicación

Funcionamiento: Se canaliza hacia el barioscopio una luz producida por una fuente externa a través de un cable de fibra flexible. Utilizando una luz de gran intensidad (300W) se pueden tomar fotografías.

Ventajas: La inspección se hace con una iluminación clara: Se pueden fotografiar y ampliar partes no visibles al ojo humano

Desventajas: Provee solamente inspección superficial: Limitada resolución: Los sistemas de lentes son relativamente inflexibles: Los operarios pueden sufrir problemas ópticos durante inspecciones largas.

6.14 Sondas Rígidas de Luz Fría

Condiciones observadas, Aplicaciones e Intervalo P-F: Como para los barioscopios rígidos

Funcionamiento: Se canaliza luz blanca de gran intensidad que proviene de una unidad de suministro de luz fría (150W) a lo largo de un cable de fibra flexible hacia un barioscopio rígido. La sonda contiene un sistema de regulación de lentes revestido de fibras de cristal a través del cual la luz pasa al extremo de trabajo. No hay desperdicio de luz y no emite calor. Se encuentran disponibles versiones que inspeccionan hacia adelante, oblicuamente hacia adelante, hacia los costados y hacia atrás. Los diámetros de la sonda varían desde 1,7 mm a 10 mm y las longitudes entre 8 cm y 133 cm. Las partes que no son visibles al ojo humano, pueden fácilmente fotografiarse y ampliarse o grabarse mediante una cámara de vídeo miniatura.

Destreza: Como para los barioscopios rígidos

Ventajas: Como para los barioscopios rígidos. No se genera calor cuando se utiliza una fuente de luz fría. Puede hacerse una inspección detallada de los acabados de superficie que están en áreas inaccesibles sin necesidad de desmontar las piezas: Las fotografías proveen registros permanentes: Equipo portátil: Cuando se usa la técnica del endoscopio/cámara de TV, se reduce el tiempo de inspección a un cuarto del tiempo requerido para la inspección directa.

Desventajas: Como para el barioscopio rígido: Sonda inflexible: No es una técnica de monitoreo en-línea.

6.15 Endoscopio de Sonda Profunda

Condiciones observadas, Aplicaciones e Intervalo P-F: Como para los barioscopios rígidos (también se usa para inspeccionar las tuberías de calderas e intercambiadores de calor)

Funcionamiento: Estos son endoscopios modulares especiales que se encuentran disponibles en longitudes de hasta 21 m. Están hechos de acero inoxidable y se atornillan entre sí para lograr un sistema de visión que puede penetrar dentro de cavidades con entradas muy restringidas. La iluminación se provee mediante una luz halógena de cuarzo de gran intensidad

Destreza: Como para los barioscopios rígidos

Ventajas y Desventajas: Como para los barioscopios rígidos

6.16 Fibroscopios de vista panorámica

Condiciones observadas, Aplicaciones e Intervalo P-F: Como para los barioscopios rígidos

Funcionamiento: Se transmite luz blanca de gran intensidad proveniente de una fuente de luz fría mediante una reflexión total interna a través de un cable de fibra flexible a un fibroscopio. El fibroscopio contiene un conjunto de fibras ópticas ligadas unas a otras para que formen tubos de luz flexible. El fibroscopio tiene en la punta un prisma óptico a control remoto al que según se requiera, se puede hacer que mire hacia adelante o hacia los costados. Se puede insertar el instrumento usando vista frontal, y puede ser detenido para observar hacia los costados cualquier defecto en forma detallada, simplemente girando un mando de control alojado al costado de la pieza óptica. Se pueden usar adaptadores para permitir tomar fotografías o montar visores de TV o cámaras de cine. También puede usarse una luz ultravioleta de gran intensidad con penetrantes fluorescentes para detectar pequeñas imperfecciones en áreas inaccesibles

Destreza: Como para los barioscopios rígidos

Ventajas: Como para las sondas rígidas de luz fría. Su flexibilidad hace que se puedan hacer inspecciones mas detalladas

Desventajas: No es una técnica de monitoreo en-línea: Provee solamente la inspección superficial: Resolución limitada: Los operarios pueden sufrir problemas ópticos en las inspecciones prolongadas. Los fibroscopios ultravioleta son caros.

6.17 Fractografía Electrónica

Condiciones observadas: Desarrollo de grietas debidas a la fatiga.

Aplicaciones: Componentes metálicos sometidos a tensiones cíclicas.

Intervalo P-F: Depende de la aplicación

Funcionamiento: Cada fractura tiene su propia "huella", por el hecho de que la historia del proceso de la fractura está impresa en la superficie de la pieza. Al estudiar una copia de la fractura con un microscopio electrónico, es posible establecer las causas y circunstancias de la falla

Destreza: Copia de la superficie de la fractura: un técnico debidamente entrenado. Análisis y lectura: un ingeniero experimentado.

Ventajas: Las fallas se pueden analizar con una gran certeza. No se daña a la superficie de la fractura al hacer la copia.

Desventajas: El microscopio electrónico es caro: Se requiere un alto grado de especialización para leer los resultados: No es una técnica de monitoreo en-línea: Los componentes inaccesibles se tienen que desmontar.

6.18 Color (ATM D-1524)

Condiciones observadas: Color y condición del aceite.

Aplicaciones: Aceites aislantes derivados del petróleo de transformadores, interruptores y cables.

Intervalo P – F: De semanas a meses.

Funcionamiento: Se llena un tubo de ensayo con una muestra del aceite y se lo coloca al lado del comparador de colores. El color se compara girando el disco de colores estándar hasta que un color coincida con el color de la muestra. La cifra que se ve en la parte superior de la cubierta delantera del disco, indica directamente el resultado de la medición. Para transformadores de media y alta tensión el límite de color no debe exceder el 3.0 de la escala de colores ASTM D-1524.

Destreza: Un electricista experimentado.

Ventajas: Permite realizar en el campo una selección rápida de las muestras de aceites a las que se les realizará análisis más profundos. No debe sacarse de funcionamiento el transformador para monitorear el estado del aceite aislante.

Desventajas: Depende de la técnica de muestreo. Puede verse afectado por la luz del sol.

6.19 Aspecto del Aceite

Condiciones observadas: Oxidación de aceite, contaminación de agua, partículas de desgaste de metal y contaminación de partículas

Aplicaciones: Aceites lubricantes.

Intervalo P – F: De días a semanas.

Funcionamiento: Tal vez es el más simple de todos los ensayos, la apariencia puede proveer distintas indicaciones sobre la condición y la contaminación del aceite. La mayoría de los aceites industriales son líquidos de color dorado que cuando son nuevos son brillantes y no tienen sólidos en suspensión. Las grasas, los refrigerantes y los combustibles también tienen una apariencia distintiva antes de ser usados. Una apariencia nubosa o turbia indica por lo general contaminación con agua, mientras que el oscurecimiento gradual ocurre por lo general cuando el aceite en servicio se está oxidando. El ojo humano por si mismo puede ver partículas tan pequeñas como de 40 micrones proveyendo una indicación de contaminación con partículas grandes.

Destreza: Un operario entrenado semi calificado

Ventajas: Es un ensayo simple, rápido y barato. No requiere de equipamiento

Desventajas: Subjetivo. El ojo humano por si mismo no puede ver partículas más pequeñas de 40 micrones. No puede determinarse el nivel de concentración de partículas ni la fuente de contaminación. El ensayo depende de la técnica de muestreo.

6.20 Olor del Aceite

Condiciones observadas: Oxidación de aceite.

Aplicaciones: Aceites lubricantes.

Intervalo P – F: De días a semanas.

Funcionamiento: La mayoría de los aceites tienen un olor insulso o indefinido cuando son nuevos y a medida que se oxidan estando en servicio comienzan a desarrollar un olor acre o "a quemado". Un olor inusual puede indicar contaminación como ser disolución de combustible. Generalmente, cuanto más fuerte es el olor, mayor es el nivel de contaminación u oxidación. Esta técnica también es limitada por la naturaleza subjetiva de la observación. Algunas personas poseen un sentido del olfato más sensitivo y ante fuertes olores reaccionan diferente. Además pueden juntarse gases en reservorios cerrados o tanques de almacenamiento, dando un olor más fuerte en el primer momento que se abre el tanque. Esta concentración de vapores puede llegar a sugerir un nivel más alto de contaminación u oxidación que la que existe normalmente.

Destreza: Un operario entrenado semi calificado.

Ventajas: Es un ensayo simple, rápido y barato. No requiere de equipamiento.

Desventajas: Subjetivo.

6.21 Strain Gauges

Condiciones observadas: Esfuerzos.

Aplicaciones: Grandes estructuras civiles como puentes, túneles, las fundaciones de grandes edificios.

Intervalo P – F: De semanas a meses.

Funcionamiento: Un alambre resistencia, una lámina metálica y un semiconductor calibrado trabajan según el principio por el cual cuando un conductor eléctrico se estira, su resistencia eléctrica se incrementa. Adhiriendo el conductor de manera tal que tenga contacto mecánico íntimo con la superficie bajo estudio, cualquier tensión en dicha superficie se reflejará en un cambio de resistencia eléctrica del strain gauge. Para monitorear las tensiones en la mayor parte de las estructuras se necesita de indicadores sensitivos o de equipamiento de registro.

Destreza: Para operar el equipo: un técnico debidamente entrenado. Para interpretar *los resultados:* un ingeniero civil.

Ventajas: Fácilmente adherible a casi cualquier superficie.

Desventajas: El strain gauge debe ser compatible tanto con el material que se estudia como con el medio ambiente en el que está operando.

Nota Preliminar sobre Monitoreo de Viscosidad

La viscosidad es una importante propiedad física de los fluidos lubricantes. Es esencial para proveer la luz crítica entre las partes móviles y las deslizantes. Una viscosidad inapropiada es un indicador temprano de un fallo general de lubricación. Los cambios de viscosidad también pueden ser una señal de advertencia de muchas condiciones de la falla potencial. Un incremento de la viscosidad puede causar un entorpecimiento en el control de válvulas, cavitación de bombas, reducción de eficiencia mecánica, volumétricas y energéticas e incrementos de la temperatura. Una disminución de la viscosidad puede causar un incremento de fugas internas y externas, incremento de la temperatura, desgaste excesivo debido a una pobre lubricación y reducciones de control y de precisión.

6.22 Monitoreo de la Viscosidad

Condiciones observadas: Cambios de viscosidad causados por sobrecalentamiento, fallos del aditivo, mezcla de lubricantes, dilución de glicol y combustible, oxidación, contaminación por partículas y por humedad.

Aplicaciones: Aceites utilizados en motores diesel y nafteros, turbinas de gas, transmisiones, cajas reductoras, compresores, sistemas hidráulicos y transformadores.

Intervalo P – F: De varias semanas a meses.

Funcionamiento: Un sensor se adosa directamente a un medidor de condición portátil (PCM) el que controla la secuencia del ensayo y muestra los resultados. El sensor testea directamente desde el recipiente de la muestra y arroja un resultado inmediato que puede guardarse en el PCM para realizar una revisión posterior. Los resultados pueden transferirse a una computadora personal (PC) para analizar tendencias y realizar gráficos. La temperatura del fluido se mide utilizando una sonda de temperatura digital.

Destreza: Un técnico entrenado y calificado.

Ventajas: Rápido y confiable, ensayo in situ. Puede calibrarse a los estándares de viscosidad ASTM. Mide directamente la viscosidad absoluta. La viscosidad cinemática puede determinarse ingresando la gravedad específica. Pueden mostrarse los resultados en SSU, centipoises, centistoke, o en grados de viscosidad ISO y pueden ser tomadas a 40°C o 100°C.

Desventajas: El equipo es muy costoso.

6.23Comparador por caída de bolillas

Condiciones observadas: Viscosidad de aceite.

Aplicaciones: Aceites utilizados en motores diesel y nafteros, turbinas de gas, transmisiones, cajas reductoras, compresores, sistemas hidráulicos y transformadores.

Intervalo P – F: De varias semanas a meses.

Funcionamiento: Se compara una muestra de aceite con un aceite de referencia. Se dejan caer libremente dos bolillas idénticas en la muestra de aceite y en el aceite de referencia. El tiempo requerido para caer cierta distancia provee una comparación de las viscosidades. Algunos equipos proveen una medición directa de la viscosidad de la muestra de aceite mientras que otros requieren hacer cálculos

Destreza: Un técnico de laboratorio entrenado.

Ventajas: Fácil y simple de usar. Tiene una precisión del 1% en la mayoría de los casos.

Desventajas: La muestra de aceite debe ser lo suficientemente translúcida para ver la bolilla mientras cae, pueden ser inadecuados los aceites oscuros u oxidados. No es una técnica portátil.

6.24 Viscosidad cinemática (ASTM D445)

Condiciones observadas: Viscosidad de aceite.

Aplicaciones: Aceites utilizados en motores diesel y nafteros, turbinas de gas, transmisiones, cajas reductoras, compresores, sistemas hidráulicos y transformadores.

Intervalo P – F: De varias semanas a meses

Funcionamiento: Este ensayo (resistencia a fluir) mide el tiempo que le toma a un determinado volumen de fluido pasar a través de viscómetro capilar calibrado de vidrio en condiciones especificadas (gravedad) y a una temperatura dada (generalmente 100°F o 38°C). El ensayo puede utilizarse para monitorear el envejecimiento del aceite o para indicar la presencia de contaminación por combustibles u otros aceites. La viscosidad cinemática es el producto del tiempo de flujo y el factor de calibración del instrumento. La viscosidad dinámica es el producto del valor de la viscosidad cinemática y la densidad del líquido.

Destreza: Un técnico de laboratorio entrenado.

Ventajas: Puede ser usado en aceites transparentes y opacos. Buena repetitibilidad. Puede usarse para la mayoría de los aceites lubricantes.

Desventajas: En el ensayo se usan solventes inflamables. No es una técnica de campo.

7 Monitoreo Térmico

Nota Preliminar sobre Termografía

Una termografía es la medición en tiempo real de la radiación emitida por la superficie de un objeto, produciendo una imagen visible de la radiación infrarroja que es invisible. Está basada en el principio de que todo objeto que está a una temperatura superior al cero absoluto (-273°C) emite radiación infrarroja. Los sistemas de imágenes térmicas son cámaras electrónicas que hacen que la radiación

sea ópticamente visible en una imagen en colores (o en blanco y negro). Estas imágenes pueden ser grabadas en una cinta de vídeo convencional o en soporte electrónico.

7.1 Escaners Infrarrojos

Condiciones observadas: Eléctricas: relación corriente/resistencia de conexiones flojas, oxidadas o corroídas o mal funcionamiento del componente mismo. Mecánicos: calor generado por fricción de cojinetes defectuosos, lubricación inadecuada, desalineación, maltrato y desgaste normal

Aplicaciones: Eléctricas: Distribución eléctrica y líneas de alta tensión, transformadores, conectores de transformadores, conexiones de bancos de capacitores, bancos de tiristores, interruptores, relays e interruptores de circuito, conexiones de medición y control, contactos de interruptores de circuitos, conexiones de fusibles y conductores, conexiones del tipo "cuchilla" y zócalos porta fusibles, disrruptores de caja modulada y aire, bobinados de motores, sobrecargas térmicas, fatiga de conductores, bobinados de generadores, escobillas colectoras de generadores, generadores de corriente exitatriz, excitadores, reguladores de voltaje, sala de control de motores.

Mecánicas: Calderas y refractarios, tuberías de vapor, intercambiadores de calor, radiadores, torres de enfriamiento, motores diesel, múltiples de escape, sistemas hidráulicos, tuberías de gas, cojinetes, lubricación de cojinetes, cintas transportadoras, engranajes patrones, correas cinemáticas, acoples, plásticos, metales, engranajes, ejes, piezas fundidas, extruciones, álabes de turbinas, soldaduras, líneas de vapor subterráneas, trampas de vapor, ladrillos refractarios, aislación de techos y paredes, ductos, hornos rotativos, defectos neumáticos. Procesos continuos: Fabricación de vidrio, papel, metal, plástico y goma

Intervalo P – F: De unos pocos días a varios meses dependiendo de la aplicación

Funcionamiento: Los escaners infrarrojos usan juegos de espejos y/o prismas que rotan a alta velocidad y una lente colectora para recolectar la radiación y enviarla a un conjunto de detectores. Los detectores responden a la radiación generando una corriente eléctrica, dicha cantidad de corriente es proporcional a la cantidad de radiación. Esta señal es tratada por un microprocesador incorporado al escáner para que pueda ser vista como una imagen en colores que se muestra en un monitor o en un visor como un termograma.

Destreza: Un técnico adecuadamente entrenado y experimentado.

Ventajas: No requiere contacto, es seguro para monitorear sistemas eléctricos energizados, con procesos estacionarios o en movimiento sin afectar la temperatura del objeto. Es muy sensible y puede ver diferencias de temperatura de 0,1°F (0,2°C) o menos.

Desventajas: El equipamiento es costoso y moverlo de un lado a otro puede resultar engorroso. Es necesario un especialista para interpretar los resultados. La cámara tiene diversas partes móviles.

7.2 Colección de Esquemas Focales (FPA's-Focal Plan Arrays)

Condiciones observadas: Eléctricas: relación corriente/resistencia de conexiones flojas, oxidadas o corroídas o mal funcionamiento del componente mismo. Mecánicos: calor generado por fricción de cojinetes defectuosos, lubricación inadecuada, desalineación, maltrato y desgaste normal.

Aplicaciones: Eléctricas: Distribución eléctrica y líneas de alta tensión, transformadores, conexiones de transformadores, conexiones de bancos de capacitores, bancos de tiristores, interruptores, relays y circuitos interruptores automáticos, conexiones de medición y control, contactos de interruptores de circuitos, conexiones de fusibles y conductores, conexiones a cuchilla y zócalos de fusibles, cajas moldeadas y disrruptores de aire, bobinados de motores, sobrecargas térmicas, fatiga de conductores, bobinados de generadores, escobillas colectoras de generadores, generadores de corriente exitatriz, excitadores, reguladores de voltaje, centros de control de motores. Mecánicas: Calderas y refractarios, tuberías de vapor, intercambiadores de calor, radiadores, torres de enfriamiento, motores diesel, múltiples de escape, sistemas hidráulicos, tuberías de gas, cojinetes, lubricación de cojinetes, cintas transportadoras, engranajes patrones, correas cinemáticas, acoples, plásticos, metales, engranajes, ejes, piezas fundidas, extrusiones, álabes de turbinas, soldaduras, líneas de vapor subterráneas, trampas de vapor, ladrillos refractarios, aislación de techos y paredes, ductos, hornos rotativos, defectos neumáticos. Procesos continuos: Fabricación de vidrio, papel, metal, plástico y goma.

Intervalo P – F: De unos pocos días a varios meses dependiendo de la aplicación

Funcionamiento: Una lente en el FPA enfoca la radiación hacia una matriz de detectores los que entregan resoluciones espaciales y térmicas que eran desconocidas previamente. Cada detector se compone de muchos elementos pequeños. Los detectores convierten la radiación en energía eléctrica, la cual es amplificada y procesada en una imagen visible que se muestra en un monitor o en un visor como un termograma. El FPA sólo tiene una parte móvil, el disipador de calor.

Destreza: Un técnico adecuadamente entrenado y experimentado.

Ventajas: Muy versátil. No requiere contacto, es seguro para monitorear sistemas eléctricos energizados, con procesos estacionarios o en movimiento sin interferencia de la temperatura del objeto. Es muy sensible y puede ver diferencias de temperatura de 0,1°F (0,2°C) o menos. Pequeño y compacto. Radiométrico.

Desventajas: El equipamiento es más costoso que los escáners infrarrojos. Es necesario un especialista para interpretar los resultados.

7.3 Termografía por Arrollamiento de Fibra Óptica

Condiciones observadas: Variaciones de temperatura causadas por deterioro de la aislación, fugas, bloqueos de sistemas de enfriamiento.

Aplicaciones: Cañerías, motores, bobinados de generadores, conductores y cables.

Intervalo P – F: de horas a meses.

Funcionamiento: La luz se pasa a través de un cable de fibra óptica. Una parte de la dispersión se refleja hacia la fuente de luz y disminuye la potencia de la señal emitida. Existe una relación matemática directa entre el tiempo que demora la luz en recorrer una distancia dada del cable, la cantidad de luz dispersada y la temperatura del cable. Esta relación puede utilizarse para determinar la temperatura en puntos determinados a lo largo del cable.

Destreza: Un técnico adecuadamente entrenado y experimentado

Ventajas: No se ve afectado por interferencias magnéticas: capaz de ser operado en ambientes peligrosos: Puede alcanzar lugares inaccesibles: Combina la detección de temperatura y la transmisión de datos en un solo componente (el cable): Continúa funcionando aún si el cable se rompe: Es preciso hasta 4 Km.

Desventajas: No es económico en instalaciones pequeñas.

7.4 Pintura termosensible

Condiciones observadas: Temperatura de superficie.

Aplicaciones: Lugares calientes, falla de aislación.

Intervalo P – F: De semanas a meses dependiendo de la aplicación.

Funcionamiento: Es una pintura a base de silicona que cambia de color a medida que la temperatura aumenta. Al comienzo el color es verde, cambia a azul a 204°C y se vuelve blanca a 316°C. Si la temperatura baja, los colores permanecen sin cambios.

Destreza: Los observadores no requieren de entrenamiento previo

Ventajas: Simple: Se logra un registro permanente de la temperatura máxima alcanzada.

Desventajas: Los colores no vuelven a cambiar nuevamente una vez que baja la temperatura: es solamente útil a dos temperaturas fijas: El tiempo de servicio de cada mano de pintura es sólo de uno o dos años (siempre y cuando no halla cambiado de color en ese período).

8 Monitoreo Eléctrico

8.1 Resistencia de Polarización Lineal (Corroedor)

Condiciones observadas: Grado de corrosión en sistemas expuestos a fluidos corrosivos conductores de electricidad.

Aplicaciones Sistemas de enfriamiento de agua, sistemas municipales de agua, agua de intercambiadores de calor de centrales nucleares, sistemas generadores de energía geotérmica, plantas de desalinización y molinos de pulpa y papel.

Intervalo P – F: Por lo general varios meses en la mayoría de las aplicaciones.

Funcionamiento: La polarización se basa en que un pequeño voltaje aplicado entre una placa metálica y una solución corrosiva produce una corriente. La proporción entre el voltaje aplicado y la corriente es inversamente proporcional al grado de corrosión, por eso esa "proporción" provee una medida del aumento del grado de corrosión.

Destreza: Un técnico adecuadamente entrenado.

Ventajas: Provee una indicación rápida y directa del grado de corrosión y la tendencia de picaduras de óxido: Mide la corrosión a medida que ocurre: Ciertos instrumentos registran el estado de corrosión: Disponibilidad de sistemas portátiles y automáticos: Sensible a cambios en el grado de corrosión tan bajos como una fracción de milésima por año: Resultados fáciles de interpretar.

Desventajas: El equipo portátil no almacena la información resultante del ensayo: Deben ajustarse las lecturas cuando se toman medidas de corrosión muy sensitivas: No da información sobre la corrosión total.

8.2 Resistencia Eléctrica (Medidor de Corrosión)

Condiciones observadas: Pérdida de metal unificada (ej. : corrosión total).

Aplicaciones Refinerías de petróleo, plantas de procesamiento, plantas de distribución de gas, estructuras bajo tierra y bajo el mar, monitoreo de protección catódica, transporte de pastas abrasivas, sistemas de distribución de agua, corrosión atmosférica, plantas de generación eléctrica, molinos de papel, etc.

Intervalo P – F: Como para Resistencia de Polarización Lineal.

Funcionamiento: El sistema está compuesto por una probeta de prueba y un instrumento para medir la probeta. La probeta consiste en un alambre, una tira o un tubo del mismo metal que la planta a ser monitoreada. La resistencia eléctrica de la probeta, medida por un circuito fuente, aumenta al mismo tiempo que disminuye su sección por la corrosión. El aumento de la resistencia corresponde a la pérdida total de metal, lo cual es fácilmente convertido en grado de corrosión.

Destreza: Como para el método de Resistencia de Polarización Lineal

Ventajas: Cuando se grafica en función del tiempo se obtienen ambas mediciones; el grado de corrosión y la pérdida total de metal: Puede ser usado en cualquier medio ambiente: Disponibilidad de equipos portátiles: Es posible el testeo en línea: En planta, el equipo provee registros permanentes: La interpretación normalmente es simple.

Desventajas: No indica si el grado de corrosión en un tiempo determinado es alto o bajo. Los equipos portátiles no proveen registros permanentes.

8.3 Monitoreo de Potencial

Condiciones observadas: Estados de corrosión (activa o pasiva) tales como grietas producidas por estrés de corrosión, tensiones por corrosión, corrosión en fase selectiva, picaduras por corrosión, ataque incisivo, etc.

Aplicaciones Ambientes electrolíticos tales como: plantas de procesamiento químico, molinos de papel, plantas generadoras de electricidad, plantas de control de polución, plantas de desalinización, etc.; las equipadas con acero inoxidable, aleaciones con base de níquel y titanio, son las mejores.

Intervalo P – F: Depende del material y el grado de corrosión.

Funcionamiento: Esta técnica se basa en que desde el punto de vista de la corrosión, un metal que está en estado pasivo (bajo grado de corrosión) tiene un potencial de corrosión noble, mientras que el mismo metal en estado activo (grado de corrosión mayor) tiene un potencial de corrosión mucho menos noble. El potencial cambia cuando cae la pasividad, y pueden realizarse la mediciones usando un voltímetro de alrededor de 10 magaohms de impedancia de entrada y con una tolerancia para la escala completa de 0,5 a 2 volts.

Destreza: Usualmente un técnico entrenado, pero algunas veces se necesita un ingeniero experimentado

Ventajas: Monitorea la corrosión localizada: Rápida respuesta al cambio.

Desventajas: Los pequeños cambios de potencial pueden ser influidos por los cambios de temperatura y acidez. No dan una medida exacta del grado de corrosión o corrosión total: puede ser necesaria la asistencia de expertos para la interpretación de resultados.

8.4 Monitoreo del Factor de Potencia

Condiciones observadas: Pérdidas de potencia a través del sistema de aislación causadas por descargas a tierra y humedad en los conductores.

Aplicaciones Circuitos eléctricos, bobinados de transformadores, conectores de transformadores de alto voltaje, cables de alto y medio voltaje.

Intervalo P – F: Varios meses.

Funcionamiento: El factor de potencia es la resistencia del circuito dividida por la impedancia del circuito. Se aplica a la aislación de la bobina un voltaje determinado de corriente alterna y se mide la corriente resultante. El coseno del ángulo entre la tensión y la corriente se llama factor de potencia. La corriente medida al cuadrado y multiplicada por la resistencia de la aislación es la potencia de pérdida. Estos valores son medidos y registrados cuando el sistema de aislación es instalado para establecer un valor de base. Los resultados de los ensayos subsecuentes se comparan con las lecturas iniciales. Como el cambio de la impedancia de los circuitos son debidos al envejecimiento, humedad, contaminación, cortocircuitos o daños físicos en la aislación, el factor de potencia aumenta. Un transformador recientemente cargado con aceite debería tener un factor de potencia por debajo de 0,5%. Un transformador en servicio normal, cargado con aceite, debajo del 2%.

Destreza: Para realizar el ensayo: un técnico de campo. Para analizar los resultados: un ingeniero.

Ventajas: Es uno de los mejores ensayos predictivos.

Desventajas: No es una técnica en línea.

8.5 Meggers (medidores de resistencia de aislación) y Otros Generadores de Voltaje

Condiciones observadas: Resistencia de la aislación.

Aplicaciones: Circuitos eléctricos.

Intervalo P – F: De meses a años.

Funcionamiento: Se aplica al equipo ensayado un voltaje determinado de corriente alterna (250 volts a 10 KV) resultando un flujo de corriente pequeño. Si no hay corriente de retorno al equipamiento de testeo desde el equipo ensayado, este flujo de corriente debe estar descargándose a tierra. La corriente que se descarga a tierra se llama "corriente de fuga". La resistencia de la aislación puede entonces ser calculada usando la ley de Ohm.

Destreza: Técnicos o Ingenieros

Ventajas: Es una técnica simple y fácil de entender.

Desventajas: Los ensayos no pueden hacerse con el equipo funcionando.

8.6 Ensayo de interrupción por tiempo

Condiciones observadas: el recorrido del contacto del interruptor, velocidad, roce y rebote del mismo.

Aplicaciones: Interruptores de circuitos de medio y alto voltaje.

Intervalo P – F: De semanas a meses.

Funcionamiento: Se acopla mecánicamente un sensor al mecanismo del interruptor y luego se lo conecta eléctricamente a un temporizador. El circuito del interruptor es luego operado a través de su ciclo completo de apertura y cierre. El timer mide el recorrido del contacto del interruptor, velocidad, roce y rebote del mismo. Los resultados se comparan con el último ensayo y con las recomendaciones del fabricante. Teniendo en cuenta esa información se indica los ajustes necesarios a hacer en el interruptor.

Destreza: Para realizar el ensayo: técnicos de campo. Para analizar los resultados: un ingeniero

Ventajas: Los interruptores de medio y alto voltaje pueden beneficiarse con este ensayo.

Desventajas: No es una técnica en línea. No es aplicable a interruptores de caja moldeada o a interruptores de bajo voltaje.

8.7 Prueba de Resistencia del Contacto del Interruptor

Condiciones observadas: Uso y deterioro del contacto del interruptor.

Aplicaciones: Interruptores de circuitos.

Intervalo P – F: Varias semanas.

Funcionamiento: Se aplica a los contactos una corriente continua generalmente de 10 a 100 amperes. Se mide el voltaje a través de los contactos y se calcula la resistencia aplicando la ley de Ohm. Las resistencias de aproximadamente 200 micro ohms son normales, aunque los diseñadores publiquen rutinariamente sus propios límites de diseño. Este valor tiende a estimar el deterioro a través del tiempo. Los límites máximos pueden obtenerse de los fabricantes.

Destreza: Para realizar el ensayo: técnicos de campo. Para analizar los resultados: un ingeniero

Ventajas: Los valores de resistencia tienden a través del tiempo a detectar fallas potenciales antes que los contactos de los interruptores se deterioren significativamente.

Desventajas: No es una técnica en línea. No puede utilizarse u ohmetro convencional debido a que la resistencia está en el orden de los micro ohms. No es reconocida como una técnica verdadera de predicción.

8.8 Análisis del Circuito del Motor (MCA)

Condiciones observadas: Cambios en la resistencia de un circuito eléctrico causados por conexiones flojas o corroídas, pérdidas de cobre (cambios) en el estator: cambio de inductancia entre fases causadas por la interacción magnética entre el estator y el rotor: inductancia del estator afectada por la posición del rotor, porosidad y excentricidad del rotor, cambios en el estator, cortocircuito de fase y bobina: limpieza del bobinado y resistencia de la descarga a tierra.

Aplicaciones: Motores eléctricos (de corriente continua, de inducción de corriente alterna, sincrónicos y de rotor bobinado).

Intervalo P – F: De varias semanas a varios meses dependiendo de la aplicación.

Funcionamiento: Se toman una cantidad de pruebas juntas para dar un cuadro completo de la condición de los circuitos del motor. Se utiliza una serie de algoritmos y reglas para determinar la severidad de cualquier defecto que pueda presentarse. Se aplica una corriente con bajo voltaje de AC y DC (el test de resistencia fase - neutro usa entre 500 a 1000 volts DC) a los terminales de los bobinados del motor para medir: resistencia, resistencia del circuito (entre fases), capacitancia, inductancia (entre fases), reacción del rotor, DC entre barras e índice de polarización/ absorción dieléctrica. En el circuito del motor, la resistencia de cada fase se mide y compara con el resto de las fases. Las lecturas son usualmente más bajas para circuitos de motores grandes y más altas para los motores pequeños. Una resistencia desigual en cualquier parte de los circuitos desbalancea los voltajes de las fases, los cuales a su vez causan un aumento significativo de temperatura en las bobinas del motor. Se mide también el desequilibrio inductivo. Esto indica desequilibrios en los campos magnéticos y desigualdad en el flujo de las corrientes de los bobinados, y está por lo general asociado a los bobinados del estator (pero

puede estar influido por el núcleo de hierro del estator y por el rotor). El aumento de los valores de capacitancia generalmente se asocia al motor. Cuando el vacío entre el estator y la empaquetadura del motor se ensucia o se humedece, aumenta el efecto capacitivo entre los conductores bobinados y la aislación más externa de las bobinas (papel aislante). La corriente alterna puede circular a través de la "capacitancia normal del motor" y luego descargarse a tierra pasando por las conexiones causadas por la suciedad o la humedad y luego a través de la carcaza del motor.

Destreza: Para realizar el ensayo: técnicos de campo. Para analizar los resultados: un ingeniero

Ventajas: Los ensayos son realizados a bajos voltajes y con corrientes mínimas las cuales no son destructivas. Los equipos son livianos y portátiles con lo que pueden usarse en ensayos de campo. Las pruebas pueden ser hechas en los terminales del motor sin necesidad de forzar las conexiones del mismo

Desventajas: No es un ensayo en línea. Los circuitos del motor no deben estar conectados.

8.9 Comparación de Sobretensiones Eléctricas

Condiciones observadas: Deterioro de la aislación, inversiones o desconexiones en una espira o un grupo de espiras comparado entre los bobinados de diferentes fases y entre grupos de espiras iguales de la misma fase.

Aplicaciones: Motores de inducción o sincrónicos, rotores de corriente continua, polos de campo sincrónico.

Intervalo P – F: De semanas a meses dependiendo de la frecuencia de campo y de las condiciones de carga en el momento del arranque.

Funcionamiento: Se aplica a dos partes iguales y separadas de la bobina un aumento de tensión transitorio de alta frecuencia. Se muestran en un osciloscopio las ondas del voltaje resultante reflejado por cada parte. Si ambas bobinas son idénticas las ondas resultantes estarán superpuestas, con lo que aparece un trazo sencillo sobre la pantalla. Si uno de los dos segmentos tiene un cortocircuito o una bobina abierta o invertida, las ondas resultantes serán visiblemente diferentes. Si se encuentra una diferencia es necesario establecer cuál segmento falla. Esto puede hacerse comparando cada segmento contra un tercer segmento y observando qué combinación produce desviaciones de onda. Generalmente las vueltas en corto o faltantes causan diferencias moderadamente pequeñas en la amplitud de las ondas. Las conexiones defectuosas tales como la inversión de espiras o cortocircuitos entre fases tienden a causar grandes irregularidades en la forma de las ondas. Con este método frecuentemente es posible determinar el voltaje a partir del cual comienza la conducción entre los bobinados de diferentes fases y entre grupos de espiras iguales de la misma fase. Si el voltaje de corto está cerca del voltaje operativo, entonces el motor tiene una serie de fallos en la aislación y debería ser reemplazada tan pronto

como sea posible. Si no se detecta corto hasta dos veces el voltaje operativo más 1000V, la bobina se considera en buen estado y el motor puede volver a ponerse en servicio.

Destreza: Un operador entrenado y con experiencia en la realización de ensayos.

Ventajas: Portátil. El corto entre los bobinados de diferentes fases y entre grupos de espiras iguales de la misma fase ocurre antes del deterioro de la aislación de la carcaza, dando mayores intervalos P-F. La mayoría de los equipos también pueden realizar testeos de alto potencial (ver 8.13)

Desventajas: Muy complejo y caro. No se puede evaluar una bobina por sí misma. Se requiere de una repetición cuidadosa para determinar el lugar y la severidad de la falla.

8.10 Análisis de las Curvas de Corriente Características del Motor

Condiciones observadas: Rotura de barras o de aros de cortocircuito de rotores de tipo "jaula", alta resistencia entre barras y aros, luz despareja entre el rotor y el estator, mala posición del rotor, laminado del núcleo del rotor o estator deteriorado o en corto.

Aplicaciones: Motores de corriente alterna y de corriente continua.

Intervalo P – F: De varias semanas a meses.

Funcionamiento: Esta técnica se basa en que cuando un motor eléctrico mueve una carga mecánica actúa como un sensor. El motor controla las variaciones en la carga mecánica y las convierte en pequeñas variaciones de corriente las cuales se transmiten a lo largo de los cables del motor. Estas variaciones de corriente, a pesar de ser muy pequeñas en relación con la corriente consumida por el motor eléctrico, pueden ser monitoreadas y grabadas en un lugar convenientemente alejado del lugar de operación del equipo. El análisis de las variaciones provee una indicación de las condiciones de la máquina, las cuales pueden ser graficadas en función del tiempo para dar una advertencia sobre el proceso de deterioro o alteración. El ensayo se hace conectando una pinza amperométrica a los cables de alimentación del motor en el centro de control del motor o en los terminales del mismo. La señal sinusoidal captada es amplificada, filtrada y luego procesada para obtener una medición de la variación instantánea de la carga entre la carga nominal y la carga final. En general la corriente en las tres fases no debería diferir más que en un 3%. Si la variación excede el 3% para cualquier fase, podrían existir problemas en el estator. Las amplitudes de la frecuencia de línea también pueden ser comparadas con la frecuencia de paso del polo inmediatamente la izquierda de la línea de frecuencia. Una diferencia significativa de amplitudes entre estas dos frecuencias indica una barra de la jaula o un anillo roto, un anillo rozando, o problemas de resistencia en las juntas.

Destreza: Para la conexión de la pinza amperométrica en uno de los cables trifásicos un electricista experimentado. Para conducir el ensayo e interpretar los resultados: un técnico que entienda de motores eléctricos

Ventajas: Las mediciones pueden hacerse en línea sin tener que realizar ningún tipo de desconexión eléctrica. No se requieren conexiones eléctricas lo que reduce el peligro de shocks eléctricos. Las lecturas pueden tomarse de manera remota y segura en máquinas de gran tamaño o de alta velocidad o bajo cualquier otro tipo de condición peligrosa

Desventajas: Compleja debido a la naturaleza subjetiva y relativa de la interpretación del espectro (esto ha sido recientemente mejorado a partir de una recolección de datos y una base de interpretación de análisis). El equipo es costoso.

8.11 Análisis de las Curvas de Potencia Características

Condiciones observadas: Rotores, barras de rotores de tipo jaula rotas, anillos terminales rotos o quebrados, fallas en las juntas de la jaula, rotores inclinados o arqueados; Estatores, laminaciones en cortocircuito, excentricidad; Fase, balance entre corriente y voltaje de fase, desfasaje resistivo e inductivo; Variaciones de Torque, deterioro y desgaste de la luz entre rotor y estator, restricciones en el flujo o la descarga de la máquina, alineación de la máquina, eficiencia de la máquina.

Aplicaciones: Motores a inducción, motores sincrónicos, compresores, bombas y válvulas operadas por motores.

Intervalo P – F: De varias semanas a meses.

Funcionamiento: Se fijan sensores a los cables de alimentación del motor, pudiendo conectarse tanto en el centro de mando del motor (MCC) en la caja del interruptor o en el motor mismo, en su caja de conexiones de bobinados, para medir la corriente y el voltaje que toma el motor en funcionamiento. Una unidad de condicionamiento de señal, filtra y pone en condiciones las señales análogas censadas de las líneas de alimentación. Luego se compila y analiza la información usando softwares con herramientas de aplicación (Transformada Rápida de Fourier – FFT) para estimar variables como la potencia real total, potencia reactiva total, factor de potencia total. El análisis de los resultados permite evaluar en detalle el rendimiento del motor y del sistema en general. Los resultados del ensayo pueden compararse con los datos de diseño del motor para detectar desviaciones

Destreza: Para fijar los sensores a las líneas de alimentación energizadas: un electricista. Para conducir el ensayo e interpretar resultados: un técnico experimentado.

Ventajas: El ensayo puede ser realizado sin desconectar el equipo Es una de las pocas técnicas que permite detectar barras del rotor rotas estando bajo carga. Permite determinar la eficiencia del equipo.

Desventajas: Se requiere de mucha habilidad y cuidado para fijar los sensores a las líneas de alimentación energizadas. Es necesario tener práctica y conocimientos de motores eléctricos y de los equipos manejados para poder interpretar y analizar la información. Es de aplicación en un número limitado de industrias. El equipamiento es costoso.

8.12 Descarga Parcial

Condiciones observadas: Fallos en la aislación.

Aplicaciones: Toda clase de equipos eléctricos de medio voltaje incluyendo selectores, conmutadores, ductos de conductores, transformadores cables y sus accesorios, transformadores, seccionadores, conectores, bujes, arrancadores de motores, disyuntores, motores, generadores, terminales, empalmes y los mismos cables. Sistemas y equipos de distribución eléctrica de más de 2000 volts de corriente alterna.

Intervalo P – F: De varias semanas a meses (Los niveles de voltaje, la forma del espacio vacío la temperatura ambiente y las pérdidas del sistema influyen en la velocidad de deterioro de la aislación).

Funcionamiento: Cuando hay un aumento del campo eléctrico por un vacío, una rajadura o una irregularidad en el sistema de aislación ocurre una descarga parcial (DP). Se usan sensores para monitorear la DP. En selectores, el sensor se conecta entre los lados de puesta a tierra del circuito que se está midiendo CT. En cables conductores, el sensor se conecta alrededor del cable a tierra que conecta el blindaje del conductor o se ubica alrededor del conductor aislado. En motores, los sensores se colocan en la carcaza del motor o alrededor de la puesta a tierra o alrededor de la aislación de las bobinas. Cuando se analiza la información se tienen en cuenta tres cosas:

- El número de pulsos por ciclo y la magnitud de dichos pulsos (la fuerza del campo en pico coulombs)
- La potencia de los pulsos (intensidad)
- La tasa de cambio de la potencia en el tiempo (análisis de tendencia)

Cuando se realiza un análisis de tendencia se establecen tres niveles de umbrales de descarga. El verde significa que puede seguir usándose, el amarillo actividad en aumento y el rojo significa que la falla es inminente

Destreza: Un técnico electricista experimentado

Ventajas: Permite tomar decisiones de forma rápida y con más información. Puede aplicarse a cualquier tipo de equipo eléctrico.

Desventajas: La tecnología disponible para operar en línea no puede localizar de manera exacta la fuente de la descarga (DP) mientras que el equipo está energizado. La información de un solo punto provee muy poca o ninguna información. Se necesitan varios puntos para poder realizar una tendencia. No existen estándares de corriente permitida o niveles máximos aceptables de actividad de DP, excepto para cables. Se requiere del conocimiento experto y del análisis estadístico para establecer los tres niveles de umbrales de descarga. Se necesitan sensores especiales que no estén en línea para determinar el punto exacto de la actividad de DP.

8.13 Testeo de Alto Potencial (Hi –Pot)

Condiciones observadas: Deterioro de la aislación entre la carcaza y los devanados del motor.

Aplicaciones: Motores de corriente alterna y continua.

Intervalo P – F: Varias semanas.

Funcionamiento: Se aplica alto voltaje a los devanados del estator de manera escalonada o progresiva hasta un límite que por lo general es del doble del voltaje de línea. Los ensayos de voltaje por lo general se derivan del estándar IEEE 95. A la primer señal de no linearidad de la corriente de ensayo o de caída en la resistencia de la aislación con consecuente aumento de voltaje, se registra el voltaje del ensayo y se desconecta para evitar la avería total de la aislación. Si la aislación soporta el voltaje, se considera que está en condiciones y el motor puede ser puesto en servicio nuevamente. Cualquier valor de voltaje en el cual ocurra la no linearidad de la corriente o una caída en la resistencia de la aislación puede ser usado para predecir la vida remanente.

Destreza Un técnico electricista experimentado.

Ventajas: Los ensayos normalmente están correlacionados con los ensayos de comparación de sobretensión.

Desventajas: Para llevar a cabo el ensayo los motores deben sacarse de servicio. El ensayo es potencialmente destructivo.

8.14 Análisis del Flujo Magnético

Condiciones observadas: Roturas de barras de rotores tipo "jaula", desbalanceo de fases y anomalías en los devanados del estator tanto entre grupos de espiras iguales de la misma fase, como entre los bobinados de diferentes fases, y cortocircuitos entre fase y tierra.

Aplicaciones: Motores de inducción de corriente continua.

Intervalo P – F: De varias semanas a meses.

Funcionamiento: Se coloca un sensor de flujo de bobina en el centro del extremo axial de giro del motor (el posicionamiento correcto de este sensor es esencial para que la información sea confiable y pueda realizarse una tendencia de la misma). La señal recibida por el sensor se transforma en la frecuencia característica utilizada por un analizador FFT. La tendencia de ciertas frecuencias de flujo magnético indicarán asimetrías eléctricas asociadas con los devanados del rotor y del estator. La mayor parte de los picos en el espectro del flujo de la espira ocurren a frecuencias que están relacionadas de alguna forma a la velocidad de giro. Las barras del rotor rotas incrementan la actividad de bandas laterales alrededor de la velocidad de giro en aproximadamente la velocidad de giro. El desbalanceo del voltaje de alimentación (que causa recalentamiento en el motor y eventualmente conduce al deterioro prematuro de las bobinas del estator) no muestra cambio excepto alrededor de la

ocurrencia del pico a una frecuencia de línea +1 x RPM. Una de las primeras fallas que tendrá una bobina son cortocircuitos entre grupos de espiras iguales de la misma fase, los cuales migran a cortocircuitos entre fase y tierra. Una falla en la bobina puede estar indicada cerca de la bandas laterales alrededor de 3 x velocidad de giro de la línea de frecuencia. Un variación de esta técnica se usa para detectar cortocircuitos entre espiras de la misma fase observando la familia de frecuencias "slot pass" de las mediciones tomadas con el flujo de una espira. Las mediciones de flujo se toman como se mencionó anteriormente, y el gráfico resultante es analizado según la frecuencia de "paso de ranuras". El principio de la frecuencia de "paso de ranuras" ocurre en el número de barras del rotor por la velocidad de giro. La técnica implica contrastar el espectro en función del tiempo para determinar el momento en el que ocurre un cambio.

Destreza: Para registrar el espectro: un electricista/técnico con entendimiento de motores. Para interpretar los resultados: un ingeniero.

Ventajas: Es una de las pocas técnicas que puede detectar fallos asociadas con la aislación eléctrica de motores eléctricos mientras que el mismo está funcionando.

Desventajas: Se necesita gran habilidad y profundo conocimiento de motores eléctricos para interpretar los resultados.

8.15 Ensayo de Impedancia de Baterías

Condiciones observadas: Deterioro de las celdas.

Aplicaciones: Energía de emergencia y baterías de control de energía DC.

Intervalo P – F: Varias semanas.

Funcionamiento: A medida que la batería envejece y comienza a perder capacidad, su impedancia interna crece. El equipo de impedancias inyecta una señal de corriente alterna entre los terminales de la batería. El voltaje resultante se mide y se calcula la impedancia. Pueden hacerse entonces dos comparaciones: primero, se compara la impedancia con la última lectura de esa batería; segundo, se compara la lectura con otras baterías del mismo banco de baterías. Cada batería debe estar dentro del 10% de las otras y en el 5% de su última medición. Una lectura fuera de esos valores indica un problema en las celdas o una pérdida de capacidad. No existe un conjunto de líneas directrices ni límites para este ensayo. Cada tipo, estilo y configuración de batería tiene su propia impedancia, con lo cual es importante tomar una lectura base cuando la batería es nueva.

Destreza: Un técnico de campo.

Ventajas: El test puede ser realizado sin sacar de servicio la batería, ya que la señal de corriente alterna es baja y se monta sobre la corriente continua de la batería.

Desventajas: El ensayo puede llevar mucho tiempo en grandes bancos de baterías.

9 Un Comentario sobre Fugas

Excepto la detección de fugas por ultrasonido, las fugas son un tema que no ha sido cubierto con mucho detalle en este apéndice, especialmente en tanques de almacenamiento enterrados. Esto es porque ya está disponible una publicación que da una descripción comprensiva de los 36 métodos de detección de fugas disponibles en la actualidad. El nombre de esta publicación es "Underground Leak Detections Methods – A State of the Art Review", y es un reporte preparado en 1986 por Shahzad Niaki y John Broscious de la IT Corporation en Pittsburgh y encargado por el Hazardous Waste Engineering Research Laboratory, Edison, New Jersey. Las copias de este reporte están disponibles en el National Tecnical Information Service, que es una división del United States Department of Commerce con base en Springfield, Virginia, EEUU.

Glosario

Aplicable: Ver "técnicamente factible"

Capacidad Inicial: El nivel de funcionamiento al que un activo o sistema es capaz de trabajar en el momento en que entra en servicio

Consecuencias de la Falla: La forma (o formas) en la cual tiene importancia un modo de falla o una falla múltiple

Consecuencias No Operacionales: Un modo de falla tiene consecuencias no operacionales si no es oculto y no tiene consecuencias sobre la seguridad, sobre el medio ambiente ni consecuencias operacionales, pero necesita ser reparado

Consecuencias Operacionales: Un modo de falla o una falla múltiple tienen consecuencias operacionales si pueden afectar de manera adversa la capacidad operacional de un activo físico o sistema (producción, calidad de producto, servicio al cliente, capacidad militar, o costos operativos además de los costos de reparación)

Consecuencias sobre el Medio Ambiente: Un modo de falla o una falla múltiple tienen consecuencias sobre el medio ambiente si pudieran quebrantar cualquier estándar o regulación medioambiental corporativa, municipal, regional, nacional o internacional que se aplique al activo físico o sistema en consideración.

Consecuencias sobre la Seguridad: Un modo de falla o una falla múltiple tiene consecuencias sobre la seguridad si puede dañar o matar a un ser humano

Contexto Operacional: Conjunto de circunstancias en las que se espera que opere un activo físico o sistema

Dispositivo o Sistema de Protección: Un dispositivo o sistema diseñado para evitar, eliminar o minimizar las consecuencias de la falla de otro sistema

Efectivo: Ver "merecer la pena"

Efecto de la Falla: Qué sucede cuando ocurre un modo de falla

Falla Evidente: Un modo de falla que será evidente por sí mismo para los operarios en circunstancias normales

Falla Funcional: Estado en el cual el activo físico o sistema es incapaz de cumplir, a un nivel de funcionamiento que sea aceptable para su propietario o usuario, con una función específica

Falla Múltiple: Un evento que ocurre si falla una función protegida mientras su dispositivo o sistema de protección se encuentra en estado de falla

Falla Oculta: Un modo de falla que no será evidente por sí mismo para los operarios en circunstancias normales

Falla Potencial: Una condición identificable que indica que una falla funcional está en vías de ocurrir o en proceso de ocurrir

Función Evidente: Una función cuya falla será evidente por sí misma para los operarios en circunstancias normales

Función Oculta: Una función cuya falla no será evidente por sí misma para los operarios en circunstancias normales

Función(es) Primaria(s): La función que constituye la razón principal por la que su propietario o usuario adquirió un activo físico o sistema

Función(es) Secundaria(s): Funciones que debe cumplir un activo físico o sistema además de sus funciones primarias, como aquellas que se necesitan para cumplir con requerimientos regulatorios y aquellos que se relacionan con temas de protección, control, contención, confort, apariencia, integridad estructural, y eficiencia energética.

Función: Lo que el propietario o usuario quiere que el activo físico o sistema haga

Funcionamiento Deseado: El nivel aceptable de funcionamiento para el propietario o usuario del activo físico o sistema

Intervalo P-F: El intervalo que va desde el punto en que una falla potencial se vuelve detectable y el punto en que se degrada hasta ser una falla funcional (también conocido como "período de desarrollo de la falla" o "tiempo a la falla")

Mantenimiento "a rotura" (run-to-failure): Política de manejo de fallas que permite que ocurra un modo de falla específico sin hacer ningún intento de anticiparlo o prevenirlo

Merecer la Pena: Una tarea programada merece la pena si reduce (evita, elimina o minimiza) las consecuencias del modo de falla asociado a un punto que justifique los costos directos o indirectos de realizar la tarea

Modo de Falla: Un evento singular que causa una falla funcional

Política de Manejo de Fallas: Término genérico que abarca las tareas a condición, el reacondicionamiento programado, la sustitución cíclica, la búsqueda de fallas, el mantenimiento correctivo (run-to-failure) y el rediseño

Probabilidad Condicional de Falla: La probabilidad de que ocurra una falla en un período determinado siempre que el elemento en cuestión haya sobrevivido hasta el comienzo de dicho período

Programado: Realizado a intervalos fijos y predeterminados

Reacondicionamiento Programado: Una tarea que restaura la capacidad inicial de un elemento o componente a una edad determinada (o antes de la misma) sin importar el estado en el que se encuentre en ese momento

Rediseño: Cualquier acción tomada para cambiar la configuración física de un activo o sistema (modificación), para cambiar el contexto operativo del activo o sistema, para cambiar el método usado por el operador o persona de mantenimiento para hacer una tarea, o para cambiar la capacidad de un operador o persona de mantenimiento (capacitación)

Rutinaria: lo mismo que "programada"

Sustitución Cíclica: Una tarea que implica descartar un elemento o componente a una edad determinada (o antes de la misma) sin importar el estado en el que se encuentre en ese momento

Tarea de Búsqueda de Fallas: Una tarea programada que busca determinar si ha ocurrido una falla oculta específica (controla si el elemento ha fallado)

Tareas a Condición: Una tarea programada usada para determinar si ha ocurrido una falla potencial (controla si el elemento está fallando o en vías de fallar)

Técnicamente Factible: Una tarea es técnicamente factible si es físicamente posible para la tarea reducir, o permitir tomar una acción que reduzca, las consecuencias del modo de falla asociado al punto que el propietario o usuario del activo pueda aceptar

Bibliografía

American Society of Testing Materials. *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia Pennsylvania. ASTM. 1995

Andrews JD & Moss TR. *Reliability and Risk Assessment*. Harlow, Essex. Longman. 1993

Blanchard BS, Verma D & Peterson EL. *Maintainability*. New York. Wiley. 1995

Blanchard BS & Fabrycky WJ. *Systems Engineering and Analysis*. Englewood Cliffs, New Jersey. Prentice Hall. 1990

Blanchard BS. *Logistics Engineering and Management*. Englewood Cliffs, New Jersey. Prentice Hall. 1986

Berry JE. "Detection of Multiple Cracked Rotor Bars on Induction Motors using both Vibration and Motor Current Analysis" *P/PM Technology*. **9 (3)** 1996

Bowers SV. "Integrated Strategy for Predictive Maintenance of AC Induction Motors". *Predictive Maintenance Technology National Conference*. Indianapolis, Indiana. 4 - 6 December 1995

Cox SJ & Tait NRS. *Reliability, Safety and Risk Management*. Oxford. Butterworth Heinemann. 1991

Dalley R. "Wear Particle Analysis". *Predictive Maintenance Technology National Conference*. Indianapolis, Indiana. 4 - 6 December 1995

Davis D J: "An Analysis of Some Failure Data". *Journal of the American Statistical Association*, **47 (258)** 1952

DelZingaro M & Matthews C. "Using Power Signature Analysis to Detect the Behaviour of Electric Motors and Motor-driven Machines". *P/PM Technology*. **8 (5)** 1995

Gaertner J P. *Demonstration of Reliability-Centered Maintenance*. Palo Alto, California: Electric Power Research Institute. 1989

Gleick J. *Chaos – Making a New Science*. New York. Penguin. 1987

James R. "Basic Oil Analysis". *Predictive Maintenance Technology National Conference*. Indianapolis, Indiana. 4 - 6 December 1995

Jones RB. *Risk-based Management*. Houston, Texas. Gulf. 1995

Kane CF: "Predictive Maintenance Technologies Can Help Prioritise Maintenance Dollars". *Northwest Indiana Business Roundtable & Trade Show*. Merrillville, Indiana. 3 October 1996

Maintenance Steering Group - 3 Task Force . *Maintenance Program Development Document MSG-3*. Washington DC: Air Transport Association (ATA) of America. 1993

Mercier J-P. *Nuclear Power Plant Maintenance*. Maisons-Alfort, France. Editions Kirk. 1987

Mohr G. "Technology Overview - Ultrasonic Detection". *P/PM Technology*. **8 (5)** 1995

Moubray JM. "Maintenance Management – A New Paradigm". *Third Annual Conference of the Society of Maintenance & Reliability Professionals*. Chicago Illinois. 2 - 4 October 1995

Moubray J M . "Maintenance and Product Quality". *International Conference on Total Quality*, Hong Kong: 16 - 17 November 1989

Moubray J M. "Maintenance and Safety - a Proactive Approach". *Annual Conference of the Accident Prevention and Advisory Unit of the UK National Health and Safety Executive*, Liverpool, UK; 19 May 1989

Moubray J M. "Developments in Reliability-centred Maintenance". *The Factory Efficiency & Maintenance Show and Conference*, NEC, Birmingham, UK; 27 - 30 September 1988

Moubray J M. "Maintenance Management - The Third Generation". *The 9th European Maintenance Congress*, Helsinki, Finland; 24 - 27 May 1988

Moubray J M. "Reliability-centred Maintenance". *A Conference on Condition Monitoring*, Gol, Norway; 2 - 4 November 1987

Nelson W. *Applied Life Data Analysis*. New York: Wiley. 1982

Niaki S and Broscious J A. *Underground Tank Leak Detection Methods – A State-of-the-Art Review*. Springfield, Virginia: National Technical Information Service, US Department of Commerce. 1985

Nicholas J R Jr (1995): "AC & DC Motor Circuit Testing and Predictive Analysis". *Predictive Maintenance Technology National Conference*. Indianapolis, Indiana. 4 - 6 December 1995

Nowlan F S & Heap H. *Reliability-centered Maintenance*. Springfield, Virginia: National Technical Information Service, US Department of Commerce. 1978

Oakland JS. *Total Quality Management*. Oxford. Butterworth Heinemann. 1989

Perrow C. *Normal Accidents*. New York. Harper-Collins. 1984

Reason JT. *Human Error*. Cambridge, England. Cambridge University Press. 1990

Resnikoff H L. *Mathematical Aspects of Reliability-centered Maintenance*. Los Altos, California: Dolby Access Press. 1978

Robinson Dr JC & Piety Dr KR. "Peak Value (Peak Vue) Analysis: Advantages over Demodulation for Gearing Systems and Slow-speed Bearings". *Northwest Indiana Business Roundtable & Trade Show*. Merrillville, Indiana. 3 October 1996

Rose A. "How to Set Up an Electrical Predictive Maintenance Program". *Predictive Maintenance Technology National Conference*. Indianapolis, Indiana. 7 - 9 November 1994

Sandtorv H & Rausand M. "RCM - Closing the Loop between Design Reliability and Operational Reliability". *Maintenance*, 6(1), 13 - 21. 1991

Shiffrin CA. "Aviation Safety Takes Center Stage Worldwide". *Aviation Week & Space Technology*. **145 (19)**. 1996

Smith AM. *Reliability-centered Maintenance*. New York. McGraw-Hill. 1993

Smith DJ. *Reliability, Maintainability and Risk*. Oxford. Butterworth Heinemann. 1993

Snow DA (editor). *Plant Engineer's Reference Book*. Oxford. Butterworth Heinemann. 1991

Tissue BM. *SCIMEDIA - Analytical Chemistry and Instrumentation*. Website <http://www.scimedia.com>. 1996

Toms LA. *Machinery Oil Analysis*. Pensacola, Florida. Published by author. 1995

US Navy (Engineering Specifications & Standards Department). *Mil-Std-2173: Reliability-Centered Maintenance Requirements for Naval Aircraft, Weapon Systems and Support Equipment*. Lakehurst, New Jersey. US Department of Defense. 1986

van der Horn G & Woyshner W. "Electric Motor Predictive Maintenance - A Comprehensive Approach". *Predictive Maintenance Technology National Conference*. Indianapolis, Indiana. 4 - 6 December 1995

Weaver C. "Time Waveform Analysis" *P/PM Technology*. **8 (5)** 1995

White G. "Vibration Data Collectors and Analysers". *Predictive Maintenance Technology National Conference*. Indianapolis, Indiana. 4 - 6 December 1995

White G. "Designing and Installing a Monitoring System". *Predictive Maintenance Technology National Conference*. Indianapolis, Indiana. 4 - 6 December 1995

Xu Ming & Le Bleu J. "Condition Monitoring of Sealless Pumps using Spike Energy™". *P/PM Technology*. **8 (6)** 1995

Indice

Abastecimiento de materias primas: 35
Abrasión: 62
Absorción diferencial LIDAR: 382
Accidentes aéreos: 313
Acciones "a falta de": 14, 95, 174-201
documentación de decisiones: 210
Aceite:aspecto: 401
color (ATM D-1564): 401
color: 402
Acelerómetro: 355
Aceptable:
verse: 27, 300
riesgo: 32, 102- 105, 260, 347- 351
Activación de Capa Delgada: 385
Activos existentes: 19
Activos nuevos: 19, 273
Activos significativos: 283-284
Administración de RCM: 279- 281
Aerolíneas y RCM: 322- 325, 327
Agencia Federal de Aviación: ver FAA
Alta frecuencia: ver Mantenimiento, programas de
AMFE: 56- 93
ver también Modos de falla y Efectos de fallas
Análisis actuarial: 254- 259, 261
Análisis de ancho de banda constante: 357
Análisis de ancho de banda de porcentaje constante: 357 -358
Análisis de árbol de fallas: 348- 349
Análisis de flujo magnético: 416-417
Análisis de Forma Temporal de Onda: 358
Análisis de Fourier: 355
Análisis de Frecuencia: 360
Análisis de la Banda Octava: 356-357
Análisis de las curvas de corriente características del motor: 413-414
Análisis de las curvas de potencia características del motor: 414
Análisis de Pareto: 284
Análisis de Promedios de Tiempos Sincrónicos: 359
Análisis de Proximidad: 363
Análisis de vibración de banda ancha: 356
Análisis de vibraciones: 161, 354-366
Análisis del circuito del motor: 411-412
Análisis del valor máximo (Peak Vue): 362
Análisis en Tiempo Real: 358
Análisis por similitud: 285
Análisis Ultrasónico: 364
Analizadores de Emisión de Escapes: 388
Ansiedad: 42
Apagones: 315
Apariencia: 43
Aplicando RCM: 16-18, 265-295
Aprendizaje simultáneo: 273
Armada de los EEUU: 327
Asociación del Transporte Aéreo de América (ATA): 327
Atractivo: 27
Auditoría RCM: 18, 218- 221, 275, 278, 280
Aviación civil:
y RCM: 322- 325
Registros de seguridad de la: 313

Barioscopios Rígidos: 398
Base de datos: 20, 271- 272, 320- 321
Benchmarking: 307
Beneficios de RCM: 312- 321
Bhopal: 313
Bomba de reserva: ver Bombas
Bombas:
búsqueda de fallas: 182-183, 196
consecuencias no operacionales: 112-114
consecuencias operacionales: 109-110
dipositivos de protección: 115
distintos contextos operativos: 30, 31
falla del impulsor: 57, 59-60
falla múltiple: 122, 125, 126
fallas funcionales: 46
fallas ocultas: 96, 97
Funcionamiento deseado: 22-23, 24
funciones: 23-24
modos de falla: 57, 59-60, 64, 68-72

rediseño: 196
Búsqueda de fallas: 11, 14, 15, 126, 127, 174, 175- 190, 210, 263, 269
factibilidad técnica de realizar: 189
proceso de decisión: 190
definición de: 177
intervalos de: 179- 189
una forma menos formal de determinar los: 187- 188
una forma rigurosa de determinar los: 183- 187
otros enfoques: 188
merecer la pena: 189

Cable de parada de emergencia: 44, 119
Caldera: 336
Sala de: 231, 332- 336
Calidad de producto: 3, 19, 63, 108, 153, 205, 281, 316
monitoreo de: 155, 156
Cambios de diseño: ver Rediseño
Cambios de una sola vez: 18, 224- 225
Camión: 27, 29, 84-89
Caos: 24
Capacidad: ver Capacidad inicial
Capacidad de las personas: 225
Capacidad Inicial: 24- 25, 49- 50, 67, 134
Capacitación: 225
necesidad de análisis: 273
en RCM: 295
Carrocería de auto: 299- 300
Causa raiz de fallas: 72, 163, 339-346
Causa y Efecto: 75
Causalidad: 68- 73
Cepstrum:361
Cintilación Inducida por vapor:391-392
Circunstancias normales: 130, 267
Cojinetes sellados de por vida: 62, 74
Colección de esquemas focales: 405
Comando Aereo de la Marina de los EEUU: 328
Combinación de tareas: 173, 210
Comparación de sobretensiones eléctricas: 412
Comparador por caída de bolillas: 403
Complejidad de equipos: 146
y análisis actuarial: 254
Computadoras y RCM: 215, 275, 294
Confiabilidad: 3, 45, 297, 314-316
y búsqueda de fallas: 179-189
Confort: 42
Consecuencias de la falla: 10- 11, 15, 75, 94- 132, 207- 208, 289
categorías de: 10
económicas: 15, 109, 112
evitar las: 95
fallas ocultas: ver Ocultas
marco estratégico: 131
operacionales: ver Operacionales
registro de decisiones: 207- 208
sobre el medio ambiente: ver Medio Ambiente
Consecuencias no operacionales: 10, 15, 97, 112- 114, 174, 208, 268
y rediseño: 114, 197
Consecuencias operacionales: 10, 15, 97, 107- 112, 143, 174, 208, 263, 268, 314
definición de: 108
y rediseño: 111, 197- 201
Consecuencias sobre el medioambiente: 3, 10, 15, 97, 98- 107, 140- 141, 142, 170, 208, 267
definición de: 95
estándares: 30, 99, 283
y rediseño: 106, 194
Consecuencias sobre la seguridad: 3, 10, 15, 97, 98-107, 140-141, 142, 170, 173, 208, 267
definición: 98
y rediseño: 106, 194
Consenso: 17, 271, 277
Consistencia del intervalo P-F: 152-153, 209
Contador de Partículas por Obturación de Malla (Presión Diferencial): 368
Contaminantes en fluidos: 375- 376
Contención: 26, 42, 303
Conteo de Partículas por Dispersión Lumínica: 370
Conteo de Partículas por Extinción Lumínica: 369
Contradicción:
en programas de mantenimiento: 227- 228
la última: 256
Contravenciones excepcionales: 342, 346
Contravenciones rutinarias: 342, 346
Contravenciones: 342, 346

Control de calidad: 230
Control estadístico de procesos: 155-156
Control: 41
Corroedor: 406 -407
Corrosión: 138
Costo: 4
de mantenimiento: 282, 309
de reparación: 108, 112- 114, 151, 260
efectividad: 3, 19, 172, 316- 318
Costos operativos: 108, 205
Cromatografía de Gases: 384-385
Cubiertas: 164-165, 166, 255, 314
Curva de bañera: 12, 253
Curva P-F: 148- 149, 161- 166, 352- 353
linear: 164-165
y fallas aleatorias: 160
Curva S-N: 247-249
Curvas P-F lineales: 164- 166
Checklist: 231- 233
Chequeos de función: 175, 177

Daño: ver Daño secundario
Daño secundario: 75-77, 114
Delegación: 252
Demanda del mercado: 34
Demodulación de amplitud: 361
Desafíos que enfrenta el mantenimiento: 5
Desarme: 60
Descarga parcial: 415
Desensamblado: 60
Deslices: 342-343
Detección de fugas: 416
Detección de Virutas Magnéticas: 372
Detección y Renqueo de Luminosidad: ver LIDAR
Detector de correa cortada: 43
Detector de humo: 195
Deterioro: 61-54, 134-137
Determinación de Criticidad: 284
Determinación de vida: 144
Diagrama de decisión: 204-205
Diagrama de decisión: 204-205, 271
Diagramas funcionales de bloque: 38, 333- 338
DIAL: ver Absorción diferencial LIDAR
Disponibilidad: 3, 298- 308, 314- 316
de funciones ocultas: 119- 122, 261
y búsqueda de fallas: 179- 183
Dispositivos de protección: 43-44, 115-119, 176-189
Distribución de supervivencia: 241-249
Distribución exponencial: 243- 245
Distribución normal: 136, 240- 241
Distribución Weibull "desviada ": 249
Distribución Weibull truncada: 249
Distribución Weibull: 246-247

EA - Electrodo de Disco Rotante: 377-378
EA: ver Emisión atómica
Economía: 44
Económica:
consecuencias: 15, 109, 112
limite de vida: 141
riesgo: 123, 347, 350
Efectividad de equipamiento: 305
Efectividad funcional: 301- 308
Efectividad general del equipo: 306- 308
Efecto mariposa: 163
Efectos de la Falla: 9, 76- 84, 95, 220, 266, 289
Efectos de Partícula: 154, 353, 366-375
Efectos de temperatura: 154, 354, 404-407
Efectos dinámicos: 154, 353, 354- 366
Efectos eléctricos: 154, 354, 407- 417
Efectos físicos: 154, 354, 393- 404
Efectos Químicos: 154, 353, 375- 393
Efectos sobre la producción: 78-80
Eficiencia: 44, 298- 299
del mantenimiento: 308- 311
energética: 298
El Acertijo Resnikoff: 256
Eliminación de cuellos de botella: 65- 66
Emisión acústica: 365- 366
Empowerment:
Endoscopio de sonda profunda: 399
Energía punzante (Spike Energy TM): 362- 363
Enfoque Selectivo de RCM: 282-286
Enfoque tradicional de mantenimiento: 16
Ensayo de brillo y claridad: 394
Ensayo de corrientes parásitas: 398
Ensayo de crepitación: 392
Ensayo de impedancia de baterías: 413
Ensayo de interrupción por tiempo: 409
Ensayo de Titulación de Karl Fisher (ASTM D-1784): 390-391

Ensayo de viscosidad cinemática: 403
Entropía: 24
Envasadora de caramelos: 28, 51
EPRI: 328
Equipo médico de Emergencia:
Equivocación fundada en la regla: 342, 344-345
Equivocaciones fundadas en el conocimiento: 342, 345- 346
Ergonomía: 42
Erosión: 62
Error de ortografía: 123
Error humano: 63, 64, 73, 339- 346
Errores basados en la habilidad: 343
Errores: 342- 345
Escaners infrarrojos: 404-405
Espectro: 355
Espectrometría de Rayos X de Energía Dispersa: 380
Espectroscopía de Absorción Atómica (AA): 379
Espectroscopía de absorción atómica: 379
Espectroscopía de Absorción de Luz Ultravioleta y Visible: 385
Espectroscopía de emisión atómica: 377
Espectroscopía Electrónica Auger de Barrido: 386
Espectroscopía Fluorescente de Rayos X: 379
Espectroscopía Infrarroja de Transformada de Fourier (FT-IR): 383
Espectroscopia Infrarroja: 384
Estación de servicio: 301- 306
Estado de falla: 48, 56
Estándar de Ingeniería Naval 45: 328
Estándares de calidad: 3, 31
  de productos: ver calidad de productos
Estándares de funcionamiento: 7, 23-28, 49, 95, 260,
7-8, 21-44, 219, 265-266
Evaluación de consecuencias: 11, 221
Evaluación de Probetas: 396
Evaporación: 62, 138
Evidencia de la falla: 77
Expectativas del mantenimiento: 3
Expectativas nuevas: 3

FAA: 322- 327
Fabricante de equipos: 77- 78, 292- 293
Facilitadores: 17- 18, 273- 281
Factibilidad Técnica: 14, 94-95, 133-134, 209, 326
  de tareas a condición: 153
  de tareas de búsqueda de fallas: 189
  de tareas de reacondicionamiento programado: 141-142
  de tareas de sustitución cíclica: 142
Factor de Potencia (ASTM D-924): 389-390
Factores antropométricos: 339- 340
Factores fisiológicos: 341- 342
Factores psicológicos: 342-346
Factores sensoriales humanos: 341
Faltas de atención: 342
Falla de caja reductora: 75, 90- 92
Falla de lubricación: 62, 75
Falla Múltiple: 117- 119, 210
  probabilidad de: 119- 124, 176-177, 183- 184, 261, 267
Falla parcial: 50
Falla potencial: 14, 148-149, 158, 159, 209, 260, 314, 352-353
  definición: 148
Falla total: 50
Falla: 48- 49
  aleatoria: ver Fallas aleatorias
  consecuencias de la: ver Consecuencias de la falla
  definición de: 48
  efectos de la: ver Efectos de la Falla
  evidencia de la: 77
  evidente: 96- 97
  funcional: 8- 9, 48- 55, 128, 159, 220, 266
  historial de la: ver Historial técnico
  modos de: ver Modos de Falla
  múltiple: ver Fallas múltiples
  no relacionadas con la edad: 144- 147
  oculta: ver Fallas ocultas
  patrón de: ver Patrón de fallas
  período de desarrollo de la: 150
  política de manejo de: 67, 72
  política de reporte de: 237- 238, 255- 256
  probabilidad condicional de: 11- 12, 136
  tareas de búsqueda de: ver Búsqueda de fallas
  visión tradicional de la: 11
Fallas aleatorias: 13, 144-147, 243-246
  e intervalos P-F: 160
Fallas de memoria: 342

Fallas evidentes: 96- 97
categorías de: 97
Fallas funcionales: 8- 9, 47- 55, 128, 159, 220, 266
definición de: 47
Fallas no relacionadas con la edad: 144- 147
Fallas ocultas y el tiempo: 128-129
Fallas ocultas: 10, 15, 96- 97, 115- 132, 176, 208, 267
de funciones primarias y secundarias: 129
el tiempo: 128
en circunstancias normales: 130
para los operarios: 129- 130
y rediseño: 126, 195- 196
Fallas relacionadas con la edad: 11, 135- 137, 164- 165, 239- 242, 247- 250
Fase: 355
Fatiga: 62, 138
y falla de cojinetes: 161- 163
Ferrografía analítica: 366- 367
Ferrografía de lectura directa: 367-368
Ferrografía: 366
FFT: ver Transformada rápida de Fourier
Fibroscopios de vista panorámica: 399
Filtración Graduada: 371-372
Físicos:
activos: 6, 21-24, 85, 306-308, 331-334
efectos: 154, 354, 404-403
Fluoroscopía Radiográfica de Rayos X: 399
FMEA: ver AMFE
Formas de desgaste normal: 62, 163, 164-165
Fractrografía electrónica: 400
Frecuencias:
a condición: 149- 153, 167- 169
altas: ver Mantenimiento, programas de
bajas: ver Mantenimiento, programas de
consolidación de: 227
de búsqueda de fallas: 179- 189
de reacondicionamiento programado: 139
de sustitución cíclica: 142- 144
Fuerza Aerea de los EEUU: 327, 329
Fuerza dieléctrica: 380-381
Fuerzas Armadas: 108
Función continua de riesgo: 124, 347- 351
Funcionamiento deseado: 23-24, 134, 134-137
Funcionamiento deseado: de un auto: 39, 41, 45
Funciones "ESCAPES": 40- 46
Funciones evidentes: 96
Funciones ocultas: 115- 132, 174
disponibilidad requerida de las: 119- 122
proceso de decisión: 127
Funciones primarias: 8, 37-39, 129
Funciones protegidas: 114
Tiempo Medio Entre Fallas: 183-185, 189
Funciones secundarias: 8, 37, 39-46, 141
Funciones superfluas: 45
Funciones:
definición de: 22
diferentes tipos de: 37- 46
primarias: 8, 37- 39
secundarias: 8, 36, 39- 46
superfluas: 45
Fundición: 314, 315

Generadores eléctricos de emergencia:
Gerentes de operaciones: 265- 272, 295
Gerentes de producción: 265
Gerentes de proyecto: 17, 279-281
Gestión para la calidad total: ver TQM
Gráfico de suma acumulativa: 155
Grupo de trabajo: 5, 20, 272, 319
Grupos de análisis: 17, 270-273

Habilidades en RCM: 295
Higiene: 41
Historial técnico: 83-84, 263-264
Hoja de Decisión: 202-215
Hoja de decisión: 202-215, 271, 275
Hoja de Información: 40, 55, 57, 93, 206
Hoja de información: 40, 55, 57, 93, 206, 271, 275
Hoja de trabajo: ver Hoja de

Información y Hoja de Decisón
Implementación de las Recomendaciones de RCM: 18, 216-238, 280
Incapacidad inicial: 67
Indisponibilidad: 120-122, 298
Información administrativa: 262, 296- 308
Información genérica de la falla: 83
Información: 259- 264
de falla: ver historial técnico
Informe de fallas: 255-256

Inspección de Partículas Magnéticas: 394
Instalación y mortandad infantil: 251- 252
Instituto de Investigación de la Energía Eléctrica (EPRI): 328
Integridad del medioambiente: 19, 40, 312- 313
Integridad estructural: 41
Interruptor de presión: 129
Interruptores de último nivel: 119
Interruptores de vibración: 119
Intervalo inicial: 211- 212, 221
Intervalo P-F: 148-153, 160, 209...
  consistencia del: 152- 153, 209
  definición: 149
  determinación del: 167- 169
  neto: 150-152
  vs. la edad de operación: 160, 164-166
Intervalo P-F neto: 150- 152
ISO 9000: 223

Jerarquía de los Activos: 331- 334
Jerarquía funcional: 333-337
Jerarquía:
  de activos: 85, 331- 334
  funcional: 333- 337
Justo a tiempo (JIT): 3, 33

Kurtosis: 365

La contradicción fundamental : 256
Las siete preguntas: 7
Legislación de seguridad: 107
LIDAR: 376
Límite de vida segura: 140- 141
Límites de control: 27
Límites de especificación: 27
Límites del sistema: 17, 274, 338
Línea de combustible: 85- 89
Luces de freno: 177, 179- 180, 195

Mantenedor: ver mantenimiento: operario de
Mantener:
  definiciones: 6
Mantenible: 25
Mantenimiento a rotura: 11, 14
Mantenimiento basado en la condición: 149
Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM):
  Diagrama de Decisión: 204-205
  definición: 7
  estrategias de implementación: 281-288
  las siete preguntas básicas: 7
Mantenimiento correctivo: 175
Mantenimiento de rutina:
  y funciones ocultas: 124-126
  reducción: 316-317
Mantenimiento proactivo: 133- 173
Mantenimiento: 192- 193
  costos de: 316- 318
  definición: 7
  efectividad del: 297- 308, 316- 318
  eficacia del: 308- 311
  operario de: 17, 226, 230- 236, 266-272, 295
  programas de: 18, 226- 228
  sistemas de planeamiento y control de: ver Planeamiento y Rediseño: 192- 193
  supervisores de: 17, 232- 238, 266-272, 295
  trabajo de: 309
Manuales: 20, 320
Margen de deterioro: 24
Marina de los EEUU: 327-330
Marina Real: 328
Medición del funcionamiento del mantenimiento: 296
Medición química de las propiedades de los fluidos: 382- 383
Medidor de corrosión: 407
Medidor de resistencia eléctrica: 407
Medioambiente: 328
Meggers: 410
Merecer la pena: 15, 90-92, 207-208, 326
Microscopio de Barrido Electrónico (SEM): 386-387
Mina de carbón: 314
Modificación: ver Rediseño
Modos de falla: 9, 56- 76, 220, 128, 266, 274, 289
  categorías de: 61- 67
  definición de: 56
  detalle requerido de: 67- 76, 84- 92
  fuentes de información sobre: 80- 84
  probabilidad de: 73- 74
  razones para analizar: 58- 60
Modos: ver Modos de falla
Monitoreo de la viscosidad: 402-403

Monitoreo de condición: 5, 153- 154, 352- 416
Monitoreo de corrosión electroquímica: 387
Monitoreo de efectos primarios:
Monitoreo de Humedad: 390
Monitoreo de Impulsos de Choque: 364
Monitoreo de Partícula: 353, 366-375
Monitoreo de potencial: 409
Monitoreo del factor de potencia: 408
Mortalidad infantil: 13, 147, 251- 253, 315
Motivación: 20, 319
MSG-1: 324- 325
MSG-2: 324- 325, 329
MSG-3: 327

NAVAIR 00-25-408: 328
NES45: 328
Ningún mantenimiento pogramado: 14, 15, 111, 113, 191, 210
Nivel de análisis: 85- 92, 219
No mantenible: 25
Norma SAE JA 1011: 6, 328-330
Nuevas investigaciones: 4
Nuevas técnicas: 5- 6

OEE: 306- 308
Omisiones: 342- 343
Operario: 17, 213, 229- 230, 266- 272, 295
Operarios: 129- 130, 267
Oxidación: 138

Paquetes de Tareas: 227
Paquetes de trabajo: 217, 225-228
Parálisis por análisis: 65
Parámetro de escala: 247
Parámetro de forma: 247
Participación: 5, 270- 270- 273, 286- 289, 319
Patrones de falla: 12, 239-253
  A: 12, 137, 138, 140, 253
  B: 12, 136, 137, 138, 239-242
  C: 12, 137, 140, 247-250
  D: 12, 147, 138, 250
  E: 12, 147, 243-246
  F: 12, 147, 250-253
  no relacionados con la edad: 144- 147
  relacionados con la edad: 11, 135-138
Película Magnética Desprendible: 396
Peligros medioambientales: 78
Peligros sobre la seguridad: 30, 78
Penetrante Fluorescente electrostático: 394
Perspectiva tradicional de la falla: 11
Pintura termosensible: 406
Piper Alpha: 313
Planeamiento basado en el tiempo de funcionamiento: 235-236
Planeamiento:
  planes de alta frecuencia: 228- 233
  planes de baja frecuencia: 228- 229, 234-236
  planilla de: 234
  tiempo de funcionamiento: 235
  tiempo transcurrido: 234
  y el proyecto RCM: 16, 279, 287
  y sistemas de control: 228- 236, 310
Planos: 20, 320
Plasma Acoplado Inductivamente (ICP): 378
Poka yoke: 343
Posibles víctimas: 103- 104, 267, 312, 351
Primera generación: 2
PRN: 284
Probabilidad condicional de falla: 241
Probabilidad:
  número de probabilidad/riesgo: 284
  ver Tiempo Medio Entre Fallas y notas en la pág. 100
Procedimientos operativos estándar: 225-226
Procedimientos operativos: 18
Procesamiento de leche: 314
Proceso batch: 31
Proceso:
  y planos de instrumentación: 333
Procesos continuos: 31
Producción: 19, 108, 205, 297
Productos en proceso: 31, 33-34
Programa de RCM viviente: 281
Programa: ver Mantenimiento, programas de
Programas de mantenimiento existentes: 74- 75
Prueba de Mancha: 373
Prueba de resistencia del contacto del interruptor: 410- 411
Prueba del Parche : 374
"Puede ser realizado por": 212- 213

Radiografía de Rayos X: 397
RCM 2: 325-327,
RCM:
facilitadores: ver Facilitadores
perdurable: 288- 290
reuniones: ver Grupos de análisis
RCM: ver Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad
Reacondicionamiento programado: 11, 13, 138-144, 172, 209, 242, 269, 326
factibilidad técnica: 141-142
frecuencia: 139-141
merecer la pena: 142- 144
Recorridas de Inspección: 175, 201
Rectificado de cigüeñal: 26, 27, 36, 52
Rediseño: 11, 14, 15, 18, 192-201, 210, 211, 224-225, 269, 275
consecuencias ambientales: 106, 194
consecuencias no operacionales: 113- 114, 197-201
consecuencias sobre la seguridad: 106
consecuencias operacionales: 111, 197-201
fallas ocultas: 126, 127, 190, 196-197
justificación económica: 197-201
y mantenimiento: 192-193
Redundancia: 31, 108, 284
Registros de Planta:16, 331-334
Regulación: 33
Rendimiento: 299, 306-307
Reparación: 13, 147, 315
ver también tareas de reacondicionamiento programado
Reportando Defectos: 237-238
Repuestos: 20, 32-33, 310
Resistencia al esfuerzo: 62, 135
Resistencia de polarización lineal: 408
Resultados de un análisis RCM: 18
Retrabajos cíclicos: 139
Reuniones: 270- 273, 276- 280
Riesgo: 99-105
económico: 123, 347, 350
evaluación: 105
fatal: 102-103, 347-351
función contínua del: 122-124
tolerabilidad: 102-105
Rodamientos: 145, 161- 163, 211
Rotación de personal: 20, 320

Sabotage: 342, 346
Sedimento (ASTM D-1738): 375
Segunda Generación: 2, 11
Seguridad: 3, 19, 38, 151, 174, 283, 312-313
Sensor de partículas de cualquier metal: 370-371
Sensor Ferromagnético en Tiempo Real: 370
Sensores de amplitud: 355
Sentidos humanos: 153, 157- 158
Servicio al cliente: 3, 19, 31, 108, 205, 284
Sistemas con protección inherente: 115-116, 131
Sistemas de Lubricación Centralizado: 59
Sistemas expertos: 321
Sobrecarga: 64- 67
Sondas rígidas de luz fría: 398-399
Soporte de decisión: 5
SPC: ver Control Estadístico de Procesos
Strain gauges: 403
Suciedad: 63
Supervisores de operaciones: 17, 266-272, 295
Sustitución cíclica: 11, 13, 138-144, 172, 209, 242, 269
factibilidad técnica: 142
frecuencia: 139-141
merecer la pena: 142- 144

Tamaño de la muestra y análisis actuarial: 255
Tarea:
descripciones: 222 - 223
frecuencias: ver Frecuencias
fuerza: 282
paquetes de: 227
proactiva: ver Tareas proactivas
proceso de selección: 13-14, 173, 221
propuesta: 210-211
Tareas a condición: 11, 14, 149- 173, 209, 268
Contexto operacional: 7, 28- 35, 50, 72-73, 95, 112, 285, 289
definición de: 149
intervalos de: 149- 153
jerarquía: 36- 37
peligros: 159- 160
Tareas a condición: 170

Tareas cíclicas a condición: ver Tareas a condición
Tareas de búsqueda de fallas: 189
Tareas de reacondicionamiento programado: 142- 144
Tareas de sustitución cíclica: 142-144
Tareas detectivas: 175
Tareas predictivas: 148- 173, 175
Tareas preventivas: 137- 144, 175
Tareas proactivas: 11-14, 95, 106-107, 110-111, 174, 289
    combinación de: 173
    orden de preferencia: 173
    registro de: 208- 210
    selección de: 171-173
    y fallas ocultas: 125
Tareas propuestas: 210- 211
Tarjeta de trabajo: 237- 238
Tasa de falla: 297, 299
    ver también: Tiempo medio entre fallas y nota de la pág.100
Técnica de Bloqueo de Poros (Decaimiento de Caudal): 369
Técnica:
    archivos históricos: 83-84, 263-264
    carácterística: 15, 133
Técnicos de campo: 81,317
Tecnología comprobada: 251
Tensión entre fases: 381
Teoría del Caos: 163
Tercera generación: 2-5, 311
Termografía por arrollamiento de fibra óptica: 406-407
Termografía: 404
Testeo de alto potencial: 414
Tiempo a la falla: 150
Tiempo de reparación: 34, 80
    costos: 108, 112-114, 151
Tiempo de respuesta: 34
Tiempo medio de reparación: 79
Tiempo Medio Entre Fallas: 110, 179-186, 242, 245, 261- 264, 267, 297- 305
Tiempo muerto fraccional: 121
Tiempo transcurrido: 234- 235
Tiempos muertos: 3, 78-80, 151, 260, 282, 298
Tintas Penetrantes: 393
Titulación por Indicación de Color (ASTM D974): 389
Titulación por indicación de color: 388
Titulación Potenciométrica TAN/TBN (ASTM D664): 390
Titulación Potenciométrica TBN (ASTM D2936): 390
TMEF: ver Tiempo Medio Entre Fallas
TMR: ver Tiempo Medio de Reparación
Tolva: 199- 201
TQM: 22, 292
Transformada rápida de Fourier: 355
Traza de auditoría: 20, 320
Turbina:
    falla de los discos de: 165-166
    sistema de escape de: 47, 55, 93
Turnos de trabajo: 32

Ultrasonidos:
    Modulación de Frecuencia: 396
    Técnica de Eco Pulso: 395
    Técnica de Resonancia: 396
    Técnica de Transmisión: 395 - 396
United Airlines: 324
Usinas de molino: 31, 307
Utilización: 299

Válvula de alivio de presión: ver
Válvula de escape:
Válvula de escape: 117, 118
Válvula de seguridad: ver Válvula de escape
Vendedores de equipos: 80- 81, 292- 293
Vida "B10": 245- 246, 298
Vida "L10": ver Vida B10
Vida: 298
    promedio: 136, 143, 242
    segura: 140- 141
    útil: 19, 136, 141, 142, 242, 318

RCM II

RCM (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad) es un proceso usado para determinar sistemática y científicamente qué debe ser hecho para asegurar que los activos físicos continúen haciendo lo que sus usuarios desean que hagan. Ampliamente reconocido por los profesionales del mantenimiento como la forma más "costo-eficaz" de desarrollar estrategias de mantenimiento de clase mundial, RCM lleva a mejoras rápidas, sostenidas y sustanciales en la disponibilidad y confiabilidad de planta, calidad de producto, seguridad e integridad ambiental.

El autor y sus asociados han ayudado a los usuarios en la aplicación de RCM y su más moderno derivado, RCM2, en más de 1200 locaciones en 44 países, incluyendo todo tipo de manufacturas (especialmente en la industria automotriz, servicios (agua, gas y electricidad), fuerzas armadas, constructoras, minería, telecomunicaciones, y transporte). Este libro resume esta experiencia mediante una descripción práctica y completa de qué es el RCM2 y cómo debe ser aplicado.

La segunda edición inglesa - sobre la cual se basa esta edición en español traducida por Ellmann, Sueiro y Asociados - ha sido extensamente revisada para incorporar los más recientes desarrollos en este campo. Incluye más de 100 páginas de material nuevo sobre monitoreo de condición, análisis de funciones y fallas, error humano, manejo del riesgo, búsqueda de fallas, y medición del desempeño de mantenimiento.

Este libro será de inmenso valor para los gerentes de mantenimiento, y para todo aquel que tenga interés en la confiabilidad, productividad, seguridad, e integridad ambiental de los activos físicos. Su enfoque transparente y basado en la realidad de la planta hacen que este libro sea especialmente indicado para su uso como libro de texto en centros de educación superior.

John Moubray (Ing. Mecánico), pasó sus primeros años de carrera desarrollando e implementando sistemas de gestión de mantenimiento primero como ingeniero de planta y luego como consultor. A principios de los años 80 comenzó a focalizarse en las aplicaciones industriales del RCM, bajo la guía del difunto F Stanley Nowlan. En 1986, desarrolló Aladon Ltd., una compañía de consultoría y entrenamiento basada en Lutterworth, Reino Unido. Fue, hasta su inesperada muerte prematura en Enero del 2004, director de Aladon, que se especializa exclusivamente en el desarrollo de procesos de gestión centrados en confiabilidad, y su aplicación a activos físicos.

Aladon Ltd
44 Regent Street
Lutterworth
Leicestershire LE17 4BD
United Kingdom
e-mail: aladon@aladon.co.uk
http://www.aladon.co.uk

ISBN 09539603-2-3
9 780953 960323

Aladon Ltd