

COMITÉ DE REDACCIÓN

Presidente

Sr. D. Martín Aleñar Ginard
Teniente General (R) del Ejército de Tierra

Vocales

Sr. D. Eduardo Avanzini Blanco
General de Brigada Ingeniero del Ejército del Aire

Sr. D. Carlos Casajús Díaz
Vicealmirante Ingeniero de la Armada

Sr. D. Luis García Pascual
Vice-Rector de Investigación y Postgrado de la UPCO

Sr. D. Ricardo Torrón Durán
General de División Ingeniero del Ejército de Tierra

Sr. D. Alberto Sols Rodríguez-Candela
Ingeniero de Sistemas. Isdefe

Sra. Dña. M^a Fernanda Ruiz de Azcárate Varela
Imagen Corporativa. Isdefe

Otros títulos publicados:

1. Ingeniería de Sistemas. *Benjamin S. Blanchard.*
2. La Teoría General de Sistemas. *Ángel A. Sarabia.*
3. Dinámica de Sistemas. *Javier Aracil.*
4. Dinámica de Sistemas Aplicada. *Donald R. Drew.*
5. Ingeniería de Sistemas Aplicada. Isdefe.
6. CALS (Adquisición y apoyo continuado durante el ciclo de vida). *Rowland G. Freeman III.*
7. Ingeniería Logística. *Benjamin S. Blanchard.*
8. Fiabilidad. *Joel A. Nachlas.*
9. Mantenibilidad. *Jezdimir Knezevic.*
10. Mantenimiento. *Jezdimir Knezevic.*
11. Ingeniería de Sistemas de Software. *Gonzalo León Serrano.*
12. Simulación de Sistemas Discretos. *Jaime Barceló.*
13. La Ergonomía en la Ingeniería de Sistemas.
Pedro R. Mondelo y Enrique Gregori Torada.
14. Análisis de las Decisiones Multicriterio. *Carlos Romero.*



Isdefe

Ingeniería de Sistemas

c/ Edison, 4
28006 Madrid
Teléfono (34-1) 411 50 11
Fax (34-1) 411 47 03
E-mail: monografias@isdefe.es

P.V.P.: 1.000 Ptas.
(IVA incluido)

15

ANÁLISIS DEL COSTE DEL CICLO DE VIDA DE LOS SISTEMAS. Wolter J. Fabrycky

Publicaciones de Ingeniería de Sistemas

ANÁLISIS DEL COSTE DEL CICLO DE VIDA DE LOS SISTEMAS

por

Wolter J. Fabrycky



Isdefe

15



Wolter J. Fabrycky

Es el Lawrence Professor Emeritus de Ingeniería Industrial y de Sistemas, así como Científico Investigador Senior en Virginia Polytechnic Institute and State University. Fue profesor en las Universidades de Arkansas y Oklahoma y en 1965 se incorporó a Virginia Tech como fundador y primer Director del Programa de Ingeniería de Sistemas, ejerciendo primero de Adjunto al Decano de Ingeniería y posteriormente como Decano de Investigación de la Universidad.

El Colegio de Ingeniería de la Universidad de Oklahoma le concedió la Medalla Lohmann en 1992 por sus excelentes contribuciones a la enseñanza, investigación y publicaciones en las ingenierías industrial y de sistemas. En 1990 recibió el Premio Holtzman al Profesor Distinguido del Instituto de Ingenieros Industriales. Fue elegido Miembro del Instituto de Ingenieros Industriales en 1978 y Miembro de la Asociación Americana para el Avance de la Ciencia en 1980.

Es co-autor de seis libros publicados por Prentice-Hall, editorial en la que es co-editor de la Serie Internacional en Ingeniería Industrial y de Sistemas, que cuenta actualmente con más de cincuenta títulos. Ha publicado numerosos artículos en revistas técnicas de difusión internacional.

ILUSTRACIÓN DE PORTADA
Manuscrito contable del siglo XVII.

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

Primera Edición: Febrero - 1997
1.250 ejemplares

© Isdefe

c/ Edison, 4
28006 Madrid.

Diseño y fotomecánica:
HB&h Dirección de Arte y Edición

Traducción:
Joaquín Teigeiro Tarancón

Infografía de portada:
Salvador Vivas

Impresión:
Gráficas Algorán, S.A.

ISBN: 84-89338-15-9
Depósito legal: M- 3934-1997
Printed in Spain - Impreso en España.

PRÓLOGO

Un sistema trata de satisfacer determinadas necesidades identificadas y/o cumplir ciertos objetivos definidos. La efectividad o eficacia es el grado en que se cumplen estas necesidades y objetivos. Ahora bien, esa satisfacción implica para el usuario un coste total a lo largo del ciclo de vida del sistema, conocido como coste del ciclo de vida (Life-Cycle Cost, LCC). En consecuencia, se deben considerar simultáneamente tanto el coste como la efectividad durante el diseño y el desarrollo del sistema.

Una parte importante del coste del ciclo de vida proyectado para un producto, sistema o estructura dados, puede relacionarse con las decisiones tomadas durante las primeras etapas del diseño del sistema. Estas decisiones se refieren a requisitos operativos, factores de prestaciones y efectividad, configuración del diseño, concepto de mantenimiento, cantidad de producción, factores de utilización, apoyo logístico, y retirada y eliminación. Tales decisiones conforman el diseño detallado y las actividades de producción, las funciones de distribución del producto y los elementos de apoyo del sistema. Si hay que controlar el coste final del ciclo de vida, es esencial que se aplique un alto grado de atención al coste, durante el diseño y desarrollo del sistema.

El análisis de coste-efectividad (Cost-Effectiveness Analysis, CEA) es una metodología para la consideración simultánea del coste

y la efectividad. Tuvo sus orígenes en el proceso de evaluación económica de sistemas complejos espaciales y de defensa. Su predecesor, el análisis de coste-beneficio, se originó en el sector civil de la economía y se remonta a la Ley de Control de Inundaciones de 1936 en los Estados Unidos. Gran parte de la filosofía y metodología del método de coste-efectividad provino del análisis de coste-beneficio y, en consecuencia, hay muchas similitudes entre las dos técnicas.

Los conceptos básicos inherentes al análisis de coste-efectividad se están aplicando a una amplia gama de problemas, tanto en los sectores de actividades públicas de defensa como en los civiles. Últimamente, el análisis de coste-efectividad está encontrando un lugar en el diseño y desarrollo de sistemas, en aplicaciones para el sector comercial en todo el mundo.

En esta monografía, se hará énfasis en el análisis del coste del ciclo de vida dentro del contexto de la efectividad del sistema. El objetivo es proporcionar al lector una guía de los elementos esenciales de coste y efectividad. Se sugiere un estudio más completo mediante referencia a la literatura del tema, con especial atención a la publicación a partir de la que se ha compuesto esta monografía [3].



Wolter J. Fabrycky
Blacksburg, Virginia
Enero 1997

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	13
2. CONSIDERACIONES SOBRE EL COSTE DEL CICLO DE VIDA	19
2.1. Problemas del diseño tradicional	20
2.2. El problema de la visibilidad del coste	21
2.3. Factores que contribuyen al crecimiento del coste	23
2.4. Cálculo del coste de las funciones del ciclo de vida	24
2.4.1. <i>Diseño conceptual del sistema</i>	24
2.4.2. <i>Diseño preliminar del sistema</i>	25
2.4.3. <i>Diseño detallado y desarrollo</i>	26
2.4.4. <i>Producción, uso y apoyo</i>	26
2.4.5. <i>Retirada y eliminación</i>	27
2.5. La estructura de desglose del coste	27
2.6. Tratamiento del coste a lo largo del ciclo de vida	29
3. ESTIMACIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL COSTE	35
3.1. Métodos de estimación del coste	36
3.1.1. <i>Estimación mediante procedimientos de ingeniería</i>	37
3.1.2. <i>Estimación por analogía</i>	38
3.1.3. <i>Métodos paramétricos de estimación</i>	40
3.1.4. <i>Aplicación de los métodos de estimación</i>	41
3.2. Desarrollo de los datos de costes	43
3.2.1. <i>Requisitos de los datos de costes</i>	43
3.2.2. <i>Fuentes de obtención de los datos de costes</i>	44
3.3. Ajuste de los datos de costes	49
3.3.1. <i>Categorías de los datos de costes</i>	49
3.3.2. <i>Cambios del nivel de precios</i>	51
3.3.3. <i>Mejoras debidas al aprendizaje</i>	55
3.4. Relaciones de estimación del coste	59
3.4.1. <i>Funciones paramétricas de estimación</i>	59
3.4.2. <i>Algunos ejemplos de CER</i>	65
3.5. El buen juicio en la estimación	69

4. CONCEPTOS DE COSTE-EFECTIVIDAD	73
4.1. Objetivos del análisis del coste	74
4.2. Líneas maestras y limitaciones del análisis	75
4.3. Identificación de alternativas	76
4.4. Aplicación de la estructura de desglose del coste	76
4.5. Aplicación del modelo de flujo monetario	77
4.6. Evaluación de las alternativas de diseño del sistema	80
4.7. Consideración de criterios múltiples	81
5. EJEMPLOS DE COSTE-EFECTIVIDAD	85
5.1. Evaluación de alternativas usando la CBS	86
5.1.1. <i>Análisis del coste del ciclo de vida</i>	87
5.1.2. <i>Desarrollo de la estructura de desglose de costes</i>	93
5.1.3. <i>Evaluación de alternativas</i>	93
5.2. Evaluación de alternativas mediante optimización económica	96
5.2.1. <i>Esquema y características de un REPS</i>	97
5.2.2. <i>Formulación de la función de evaluación de un REPS</i>	99
5.2.3. <i>Problema I de diseño de un REPS</i>	102
5.2.4. <i>Problema II de diseño de un REPS</i>	107
5.3. Resumen de los ejemplos	111
6. RESUMEN Y CONCLUSIONES	115
APÉNDICE A: EL INTERÉS DEL DINERO Y LA EQUIVALENCIA ECONÓMICA	121
A.1. El modelo de flujo monetario	122
A.2. Fórmulas de interés	123
A.3. Tablas de interés	123
A.4. El cálculo de equivalencia	125
A.5. Equivalencia a partir de varios factores	127
A.6. Diagramas de función de equivalencia	127
APÉNDICE B: MÉTODOS DE COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS	131
B.1. Método del valor actual equivalente	132
B.2. Método del valor anual equivalente	132
B.3. Método de la tasa de rentabilidad	133
B.4. Método de la amortización	133
REFERENCIAS	135
BIBLIOGRAFÍA	139
GLOSARIO	143



1

Introducción

te Contatus misere, maximus 100.000-324-98.154-25.216-32

156.256 Noster 1966 7-254-12

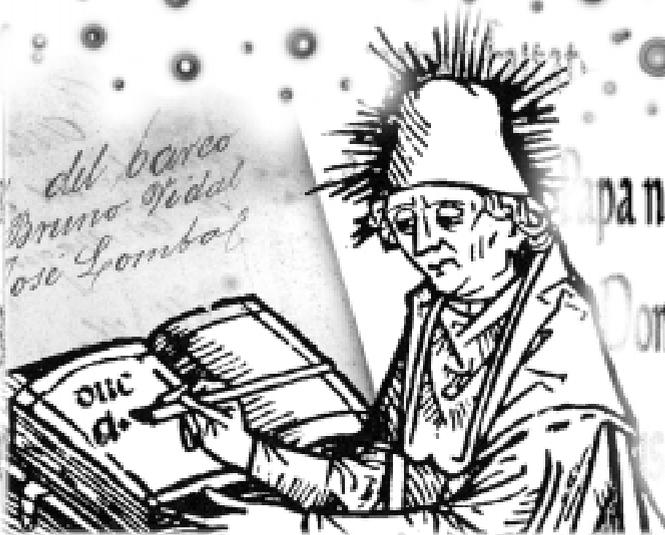
69-3 1966 7-254-12

rus del barco
Bruno Tidal
Jose Lombal

39-3 1966 7-254-12

squi 1966 7-254-12

10007.582-15- omnes 12.780-22.085-125.805-diligentes



Al aplicar el análisis de coste-efectividad para comparar diseños alternativos de sistemas complejos, deben satisfacerse tres requisitos. Primero, los sistemas candidatos que están siendo evaluados deben tener los mismos objetivos o propósitos. No sería válida la comparación entre un avión de transporte y uno de caza, pero sí lo sería una comparación entre barcos de transporte y aviones de transporte para trasladar unas mercancías específicas. En segundo lugar, deben establecerse criterios de evaluación para factores de interés, técnicos y no técnicos. Finalmente, se debe disponer de la mayoría de los detalles de los sistemas que están siendo evaluados, o se deben estimar de tal forma que se puedan predecir los componentes de coste y efectividad de cada sistema candidato.

Como primer paso, es esencial que se defina el objetivo u objetivos deseados del sistema. En el caso de la logística militar, el objetivo puede ser trasladar una cierta cantidad de personal y equipo desde un punto hasta otro, en un intervalo de tiempo especificado. Esto puede realizarse mediante unos pocos barcos de transporte relativamente lentos o una cantidad mayor de aviones de transporte rápidos.

Se debe tener cuidado en este paso para asegurar que los objetivos definidos satisfarán los requisitos de la misión. Cada sistema de envío debe tener la capacidad de trasladar un conjunto de personal y equipo que cumpla los requisitos de la misión. Una comparación entre aviones que pueden trasladar únicamente personal y barcos que

pueden llevar tanto personal como equipo, no sería válida en un estudio de coste-efectividad.

Una vez que se han identificado los requisitos de la misión, se deben desarrollar los conceptos y diseños de sistemas alternativos. Si sólo se puede concebir un sistema, el único uso que tendrá una evaluación de coste-efectividad es para establecer una comparación con una capacidad ya existente. Finalmente, se debe hacer la selección con base en una configuración óptima para cada sistema alternativo, utilizando un método de evaluación económica como los que se presentan en el Capítulo 5.

Los criterios de evaluación deben seleccionarse comparando tanto los aspectos del coste del ciclo de vida como los de efectividad de los sistemas estudiados. Estos criterios se muestran en la Figura 1. Normalmente, hay menos dificultad en establecer los criterios de coste que los criterios de efectividad. Esto no quiere decir que la estimación del coste sea sencilla; sólo significa que normalmente se comprenden mejor las clasificaciones y las bases para resumir el coste.

Entre las distintas categorías de coste están las que surgen a lo largo del ciclo de vida del sistema. Incluyen los costes asociados a la investigación y el desarrollo, la ingeniería, el diseño y desarrollo, la producción, la operación y el mantenimiento, y la retirada, como se muestra en la parte izquierda de la Figura 1 [1, 3].

Es difícil establecer los criterios de evaluación de la efectividad de los sistemas. Por otra parte, muchos sistemas tienen múltiples objetivos, lo que complica aún más el problema. Algunas de las categorías generales de la efectividad son la utilidad, la aptitud, el provecho, el beneficio, la ganancia... Estas características son difíciles de cuantificar por lo que normalmente se usan criterios como la movilidad, la disponibilidad, la mantenibilidad, la fiabilidad, etc., como muestra la parte derecha de la Figura 1. Aunque no todos dispongan

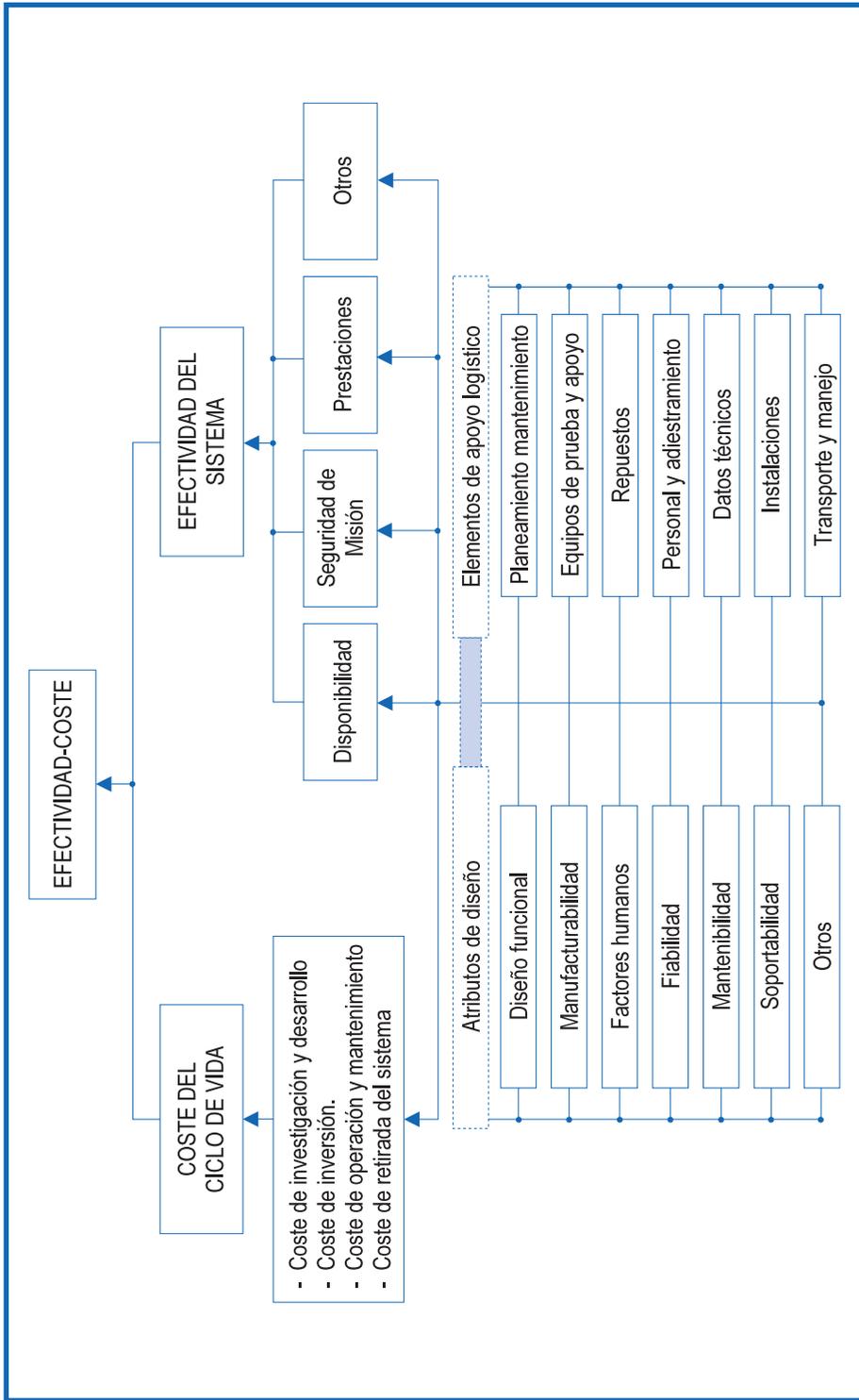


Figura 1 - ELEMENTOS DE COSTE-EFECTIVIDAD -

de bases de medidas cuantitativas precisas, estos criterios son útiles para la descripción de la efectividad del sistema.

En un estudio de coste-efectividad se deben analizar los sistemas candidatos de acuerdo con sus cualidades, lo que se puede hacer ordenando los sistemas de acuerdo con su capacidad para satisfacer los criterios más importantes. Por ejemplo, si el criterio en el caso de logística militar es la cantidad de personal y el tonelaje de equipo trasladados desde un punto a otro en un intervalo de tiempo especificado, este criterio será el principal. Otros criterios, como la mantenibilidad, ocuparían una posición secundaria. A menudo, este procedimiento eliminará los candidatos menos prometedores. Los candidatos restantes pueden someterse entonces a un análisis de coste y efectividad más detallado.

Si tanto el coste como la efectividad de una alternativa son superiores a los valores respectivos de los otros candidatos, la elección es obvia. Si los valores de los criterios de las dos mejores alternativas son idénticos, o casi idénticos, y no existe una diferencia significativa en el coste, se puede seleccionar cualquiera de las dos, de acuerdo con esa irreductibilidad. Finalmente, si tanto el coste como la efectividad del sistema difieren significativamente, la selección debe realizarse basándose en la intuición y el buen juicio.

El paso final de un estudio de coste-efectividad incluye documentar su finalidad, hipótesis, metodología, y conclusiones. Es el paso de la comunicación a terceras personas y no debe tratarse con ligereza. En este proceso, puede ser útil una representación gráfica de la evaluación de la decisión, tal como se describirá en el Capítulo 4.

2

Consideraciones sobre el coste del ciclo de vida



Existen muchas decisiones y acciones, tanto técnicas como no técnicas, que se deben adoptar a lo largo del ciclo de vida del producto o sistema. La mayoría de las acciones, particularmente las que corresponden a las primeras fases, tienen implicaciones en el ciclo de vida e influyen en gran medida sobre su coste. Por tanto, se debe emplear el cálculo del coste del ciclo de vida en la evaluación de configuraciones alternativas de diseño del sistema, de esquemas alternativos de producción, de políticas alternativas de apoyo logístico, de conceptos alternativos para la eliminación del sistema, etc. La base del cálculo del coste del ciclo de vida está constituida por el propio concepto del ciclo de vida, adaptado al sistema específico que se diseña y desarrolla.

2.1. Problemas del diseño tradicional

El diseño en la ingeniería tradicional se ha centrado principalmente en la fase de adquisición del ciclo de vida. Sin embargo, la experiencia reciente indica que no puede obtenerse un producto o sistema adecuadamente coordinado y operado, y que sea competitivo en el mercado, mediante acciones aplicadas mucho después de haber sido concebido. Por tanto, es esencial que los ingenieros contemplen la viabilidad operativa durante las primeras etapas del desarrollo del producto y que asuman la responsabilidad del cálculo del coste del ciclo de vida, tan ignorado en el pasado. Este análisis implica un método secuencial que emplea los valores relevantes del coste del ciclo de vida como criterios para alcanzar un diseño apto desde el punto de vista de coste-efectividad.

A menudo, un diseño «bueno» para cumplir la función principal de un producto trae consigo efectos secundarios en forma de problemas operativos. Ello se debe a una consideración exclusiva de la función principal, en lugar de abordar el problema más exigente del diseño que satisfaga las numerosas «ilidades» (valga el vocablo para referirse a fiabilidad, mantenibilidad, soportabilidad, eliminabilidad, etc.). Se dispone de un conocimiento especializado suficiente para resolver este problema. La dificultad está en la sistematización del uso integrado de lo que se conoce [2].

Existe una capacidad de integración de las consideraciones económicas dentro del campo de la economía aplicada a la ingeniería [6, 7]. Las consideraciones económicas son una base importante en la integración de los ciclos de vida del producto, la producción y el apoyo. En la Figura 2 se ilustran cada uno de estos ciclos de vida y las funciones más importantes asociadas con sus fases [2].

2.2. El problema de la visibilidad del coste

La combinación entre inflación creciente, aumento del coste, reducción del poder adquisitivo, limitaciones de presupuesto, aumento de la competencia y otras características similares, ha generado una inquietud e interés acerca del coste total de los productos, sistemas y estructuras. La situación económica actual se complica aún más con algunos problemas adicionales relacionados con la determinación real del coste del sistema y/o del producto. Algunos de ellos son:

1. A menudo el coste total del sistema no es visible, en particular aquellos costes asociados con la operación y apoyo del sistema. El problema de visibilidad del coste se debe al efecto «iceberg», como muestra la Figura 3 [1].
 2. A menudo los factores de coste se aplican incorrectamente. Los costes individuales se identifican mal y, muchas veces,
-

ANÁLISIS DEL COSTE DEL CICLO DE VIDA DE LOS SISTEMAS

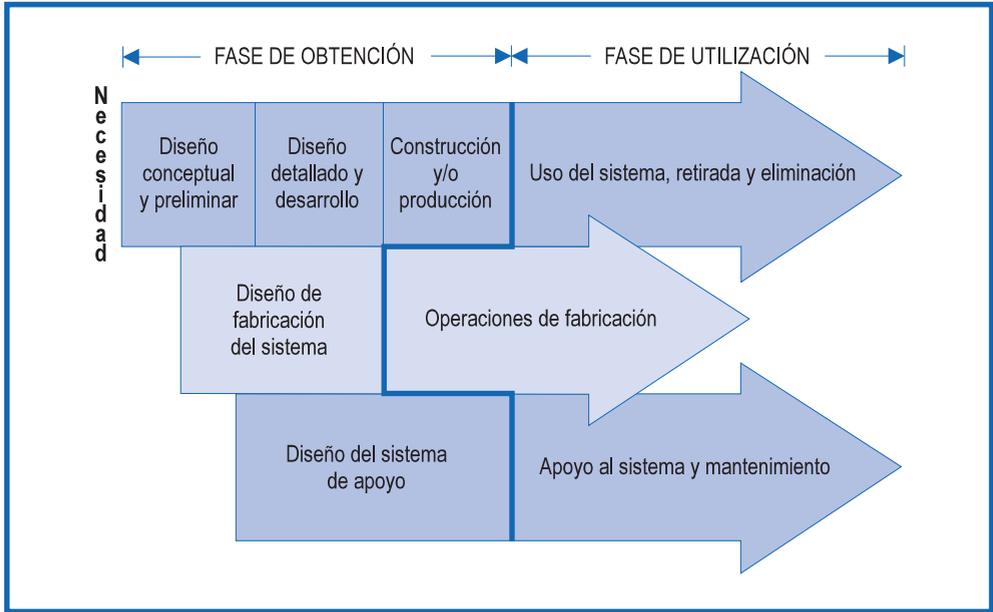


Figura 2 - CICLOS DE VIDA DE PRODUCCIÓN, PROCESO Y APOYO -

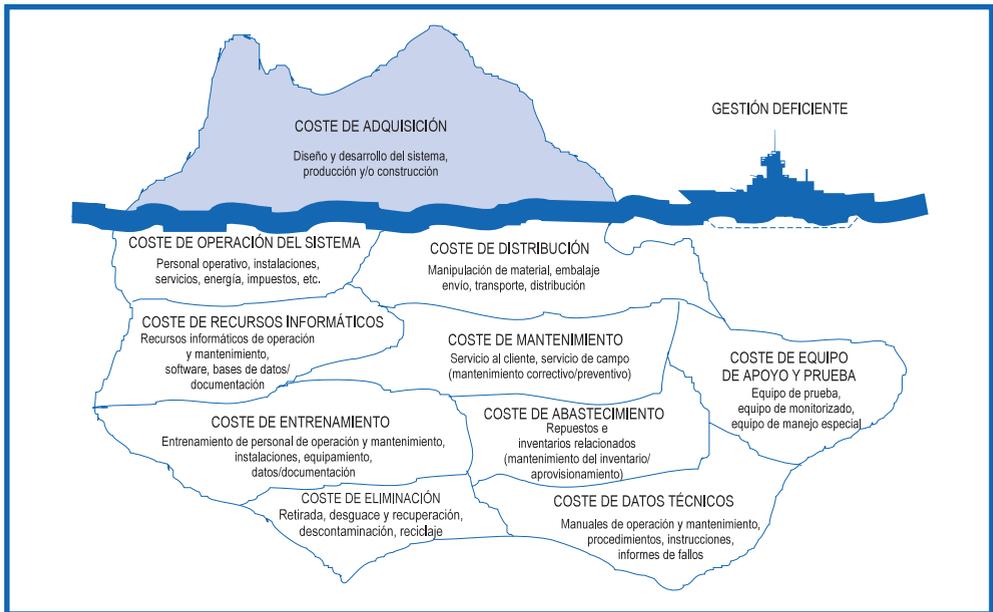


Figura 3 - EL PROBLEMA DE LA VISIBILIDAD DEL COSTE TOTAL -

se incluyen en la categoría equivocada: los costes variables se tratan como fijos (y viceversa), los costes indirectos se tratan como directos, etc.

3. Los procedimientos contables no siempre permiten una evaluación realista y oportuna del coste total. Además, a menudo es difícil (si no imposible) determinar los costes, de acuerdo con una base funcional.
4. Muchas veces las prácticas presupuestarias son inflexibles con respecto al cambio de fondos de una categoría a otra, o, de un año a otro, para facilitar las mejoras del coste de la adquisición y el uso de los sistemas.

Para evitar el efecto «iceberg», los estudios de viabilidad económica deben abordar todos los aspectos del coste del ciclo de vida. La tendencia actual del aumento de la inflación y del coste, junto con los problemas adicionales ya enunciados, ha conducido a una falta de efectividad en el uso de recursos valiosos. Se han desarrollado sistemas y productos que no son aptos desde el punto de vista de coste-efectividad. Se puede anticipar que estas condiciones empeorarán, a menos que los ingenieros de sistemas y de diseño asuman un mayor grado de consideración de los costes.

2.3. Factores que contribuyen al crecimiento del coste

No sólo aumentan los costes de adquisición asociados a los nuevos sistemas, sino que también lo hacen de forma rápida los costes de operación y mantenimiento de los sistemas ya en uso. Esto es debido principalmente a una combinación entre los factores de aumento de la inflación y el coste debido a:

1. Inexactitudes en las estimaciones, predicciones y previsiones.
 2. Cambios de ingeniería durante el diseño y desarrollo.
-

3. Cambios en la producción y/o construcción del sistema.
4. Cambios durante la adquisición de componentes del sistema.
5. Calidad deficiente de los productos y sistemas durante su uso.
6. Cambios en la capacidad de apoyo logístico.
7. Contratiempos y problemas imprevistos.

La experiencia indica que el aumento en el coste por causas diversas ha sido muchas veces la tasa de inflación durante las últimas décadas. Al mismo tiempo, las asignaciones presupuestarias de muchos proyectos y programas están disminuyendo de año en año. El resultado es que cada vez se dispone de menos recursos para adquirir y operar nuevos sistemas o productos, así como para mantener y apoyar los sistemas existentes. Los fondos disponibles para proyectos disminuyen rápidamente cuando interviene el aumento en la inflación y el coste.

2.4. Cálculo del coste de las funciones del ciclo de vida

El coste del ciclo de vida se determina identificando las funciones aplicables en cada una de sus fases, calculando el coste de estas funciones y aplicando los costes apropiados durante toda la extensión del ciclo de vida. Para que esté completo, el coste del ciclo de vida debe incluir todos los costes del fabricante y del consumidor. En los párrafos siguientes se resumen las características de los costes en las distintas fases del ciclo de vida del sistema o producto.

2.4.1. Diseño conceptual del sistema

Las magnitudes de las características determinantes del coste, de acuerdo con las que se va a diseñar, probar, producir (o construir) y apoyar el sistema o producto, deben establecerse en las etapas iniciales de planificación y diseño conceptual del sistema, cuando se están definiendo los requisitos. Se puede adoptar un objetivo de «diseño

según el coste» (Design-To-Cost, DTC) a fin de establecer el coste como restricción del diseño del sistema o producto, al igual que las prestaciones, efectividad, capacidad, precisión, tamaño, peso, fiabilidad, mantenibilidad, soportabilidad, etc.

El coste debe ser un factor activo más que una consecuencia durante el proceso de diseño conceptual del sistema. Debido a la macronaturaleza de la estimación del coste durante la formulación del concepto, normalmente se usan métodos paramétricos al mismo tiempo que el buen juicio de los expertos.

2.4.2. Diseño preliminar del sistema

Una vez establecidos los requisitos cuantitativos del coste, el siguiente paso incluye un proceso iterativo de síntesis, compromiso entre diversas opciones y optimización, y definición del sistema o producto. Los criterios definidos en el diseño conceptual del sistema se asignan o reparten inicialmente entre los diversos segmentos del sistema, a fin de establecer las pautas para el diseño y/o adquisición de los elementos necesarios. La asignación se realiza a nivel del sistema y se desciende posteriormente hasta el nivel necesario para suministrar los datos de entrada al diseño, así como para asegurar un control adecuado. Los factores asignados reflejan el objetivo de coste por unidad individual (esto es, un solo equipo o producto de la población desplegada) y están basados en los requisitos operativos del sistema, el concepto de mantenimiento y el concepto de retirada y eliminación.

A medida que evoluciona el desarrollo del sistema, se consideran diversos métodos que puedan conducir a seleccionar una configuración de preferencia. Se realizan análisis del coste del ciclo de vida evaluando cada posible candidato, con el fin de asegurar que el candidato seleccionado es compatible con los objetivos establecidos de coste, y de determinar cuál de los distintos candidatos considerados es el preferible desde un punto de vista global de coste-efectividad.

A continuación se realizan estudios de compromiso, utilizando el análisis del coste del ciclo de vida como una herramienta de evaluación, hasta que se elige una configuración de diseño de preferencia. Se justifican las áreas de cumplimiento y se descartan las soluciones que no cumplen los requisitos. Este es un proceso iterativo con reorientación activa y acción correctiva.

2.4.3. Diseño detallado y desarrollo

A medida que el diseño del sistema o producto se refina con más profundidad y se dispone de datos del diseño, el proceso de análisis del coste del ciclo de vida va implicando la evaluación de características específicas del diseño (como reflejan la documentación del diseño y los modelos de ingeniería o prototipos), la predicción de fuentes generadoras de coste, la estimación de costes y la proyección del coste del ciclo de vida a fin de establecer el perfil del coste del ciclo de vida (Life-Cycle Cost Profile, LCCP). Los resultados se comparan con el requisito inicial y se toma una acción correctiva según sea necesario. De nuevo, esto es un proceso iterativo, pero a nivel inferior que el que se alcanzaba durante el diseño preliminar del sistema.

2.4.4. Producción, uso y apoyo

Los aspectos de coste en las etapas de producción, uso, apoyo y, retirada y eliminación en el ciclo de vida del sistema o producto, se abordan mediante la recogida y el análisis de datos, y una función de evaluación de los mismos. Se identifican los determinantes de costes elevados, se definen las relaciones causa-efecto, y se obtiene y utiliza una información valiosa a efectos de la mejora del producto, mediante un nuevo diseño o un nuevo estudio de ingeniería. El objetivo es hacer estimaciones realistas de estos costes «aguas abajo» como ayuda en la evaluación del diseño.

2.4.5. *Retirada y eliminación*

Los costes que surgen de las actividades de baja en servicio, retirada y eliminación del sistema y de sus componentes se producen en un futuro lejano. Son particularmente difíciles de estimar en el momento del diseño. Sin embargo, la experiencia puede servir como guía, incluso aplicada únicamente en términos de porcentajes del coste inicial. Los costes reales que se producirán, se compensarán en alguna forma con el valor en ese momento de los componentes recuperados y de los materiales reciclados. La diferencia es lo que debe estimarse durante el diseño del sistema.

2.5. La estructura de desglose del coste

En general, los costes a lo largo del ciclo de vida se dividen en categorías, de acuerdo con la actividad organizativa necesaria para concebir el sistema. Estas categorías y sus elementos constituyentes componen una estructura de desglose o descomposición del coste (Cost Breakdown Structure, CBS) como ilustra la Figura 4 [3]. Las categorías principales de coste son:

1. Coste de investigación y desarrollo: planificación inicial, análisis de mercado, investigación del producto, análisis de requisitos, diseño de ingeniería, datos y documentación de diseño, «software», pruebas y evaluación de los modelos de ingeniería, y funciones de gestión asociadas.
 2. Coste de producción y construcción: ingeniería industrial y análisis de operaciones, producción (fabricación, montaje y pruebas), construcción de instalaciones, desarrollo del proceso, operaciones de producción, control de calidad y requisitos iniciales de apoyo a la logística (por ejemplo, apoyo inicial al cliente, producción de repuestos, producción de equipo de pruebas y apoyo, etc.).
-

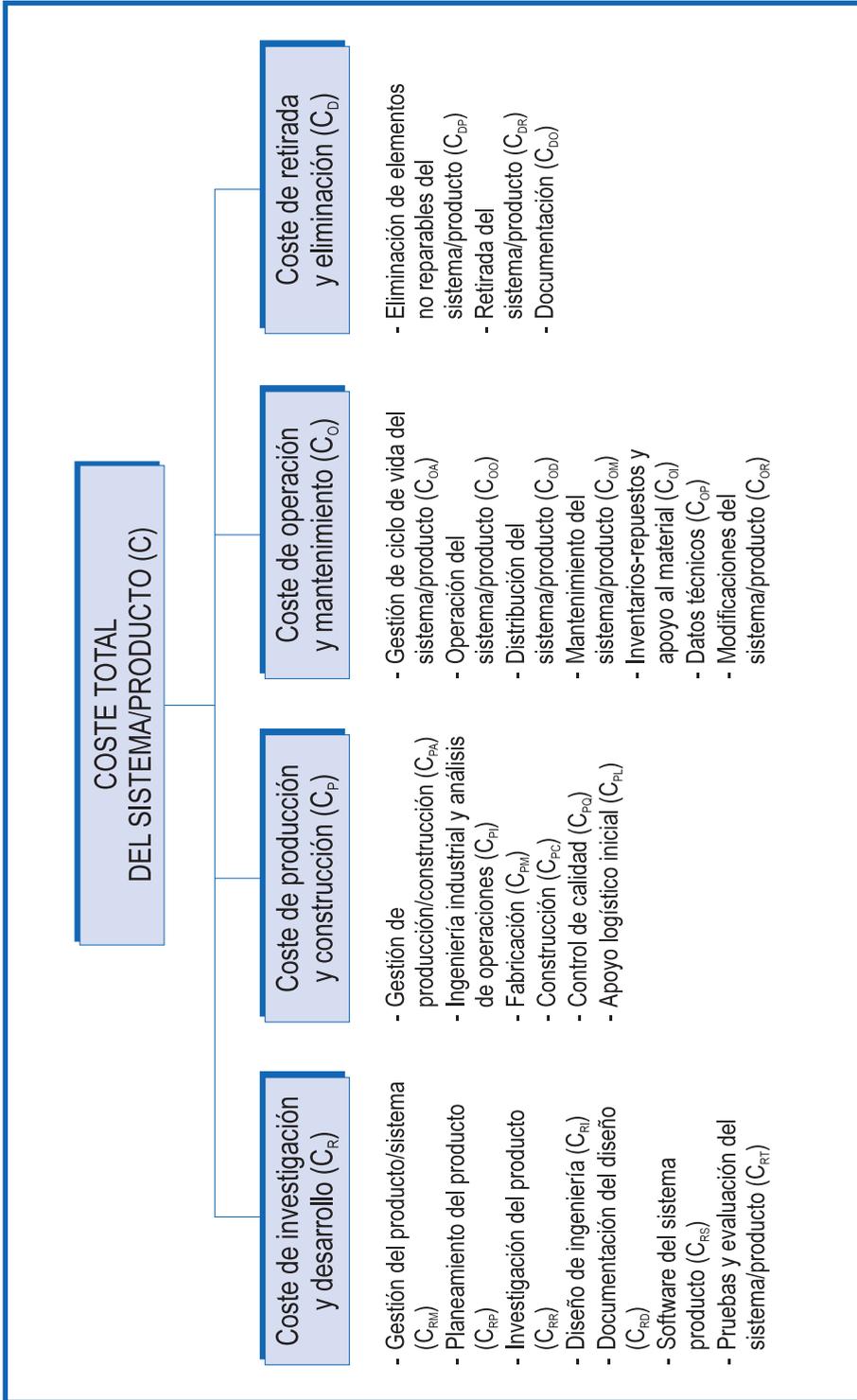


Figura 4 - UNA ESTRUCTURA DE DESGLOSE DEL COSTE -

3. Coste de operación y apoyo: operaciones del sistema o producto por parte del consumidor o usuario, distribución del producto («marketing» y ventas, transporte y gestión de tránsito), y mantenimiento y apoyo logístico durante el ciclo de vida del sistema o producto (por ejemplo, servicio al cliente, actividades de mantenimiento, apoyo de abastecimiento, equipos de prueba y apoyo, transporte y manejo, datos técnicos, instalaciones, modificaciones del sistema, etc.).
4. Coste de retirada y eliminación: eliminación de elementos no reparables a lo largo del ciclo de vida, retirada del sistema o producto, reciclaje de material y requisitos aplicables del apoyo logístico. La estructura de desglose del coste relaciona los objetivos y actividades con los requisitos de recursos de organización. Constituye una subdivisión lógica del coste por área de actividad funcional, elementos importantes del sistema, y/o una o más de las clases discretas de elementos comunes o semejantes. La CBS proporciona un medio para la asignación inicial de recursos, la vigilancia del coste y el control del coste.

2.6. Tratamiento del coste a lo largo del ciclo de vida

Una vez definida la estructura de desglose del coste del sistema o producto, y establecidos los métodos de estimación del coste, corresponde aplicar los datos resultantes al ciclo de vida del sistema. Para realizarlo, el analista de costes debe comprender los pasos necesarios para desarrollar perfiles de coste que incluyan los aspectos de inflación, los efectos de las curvas de aprendizaje, el valor futuro del dinero y otros aspectos.

Existe una variedad de procedimientos que pueden usarse para desarrollar un perfil de coste. Sin embargo, los siguientes pasos son esenciales:

1. Identificar todas las actividades que a lo largo del ciclo de vida generarán costes de un tipo u otro. Esto incluye funciones asociadas con la planificación, investigación y desarrollo, prueba y evaluación, producción o construcción, distribución del producto, uso operativo del sistema o producto, mantenimiento y apoyo logístico, etc.
 2. Relacionar cada actividad identificada anteriormente con una categoría específica de coste dentro de la estructura de desglose del coste. Todas las actividades del programa deben estar en una o más categorías de la CBS.
 3. Establecer para cada actividad de la CBS los factores apropiados del coste en valores constantes de la moneda (por ejemplo, pesetas constantes de 1997) donde el valor constante refleja el poder adquisitivo general de la moneda en el momento de la decisión (esto es, hoy). Los costes relacionados, expresados en términos de monedas constantes, permitirán una comparación directa de los niveles de actividad de año en año, antes de la introducción de factores inflacionarios del coste, cambios en los niveles de precios, efectos económicos de acuerdos contractuales con los proveedores, etc., que a menudo pueden causar alguna confusión durante la evaluación de alternativas.
 4. Proyectar al futuro los elementos individuales del coste dentro de cada categoría del coste de la CBS, año a año a lo largo del ciclo de vida, según corresponda. El resultado debe ser un flujo de costes en monedas constantes para las actividades que se incluyan.
 5. Introducir los factores inflacionarios apropiados, los efectos económicos de las curvas de aprendizaje, los cambios en los niveles de precios, etc. para cada categoría de costes de la CBS y para cada año aplicable del ciclo de vida. Los valores
-

modificados constituyen un nuevo flujo de costes y reflejan los costes realistas tal como se anticipan para cada año del ciclo de vida (esto es, los costes esperados de 1998 en 1998, los costes de 1999 en 1999, etc.). Estos costes pueden utilizarse directamente para la preparación de las necesidades presupuestarias futuras, ya que reflejan las necesidades monetarias reales, anticipadas para cada año durante el ciclo de vida.

6. Resumir los flujos individuales de costes por categorías principales de la CBS y desarrollar un perfil de costes a nivel superior.

Los resultados de la secuencia de pasos anteriormente mencionada se presentan en la Figura 5. El perfil representa una estimación presupuestaria de las necesidades futuras de recursos para cada fase del ciclo de vida.

Es posible, y a menudo beneficioso, evaluar el flujo a lo largo del ciclo de vida del coste de actividades individuales tales como investigación y desarrollo, producción, operación y apoyo, etc. En segundo lugar, estos flujos de coste individuales pueden acumularse para desarrollarse el perfil de coste total. Finalmente, el perfil de coste total puede ser observado desde el punto de vista del flujo lógico de actividades y del nivel adecuado y oportuno del gasto dinerario.

La Figura 6 ilustra los perfiles del coste del ciclo de vida para varias alternativas. Cuando se trata con dos o más configuraciones alternativas de diseño del sistema, cada una exigirá diferentes niveles de actividad, diferentes métodos de diseño, diferentes requisitos de mantenimiento y de apoyo logístico, etc. Dos alternativas de un sistema nunca serán idénticas. De esta forma, para cada alternativa se desarrollarán perfiles individuales que finalmente se compararán sobre una base equivalente. Esto se realiza usando las técnicas de análisis económico presentadas en el Apéndice A e ilustradas en los ejemplos del Capítulo 5. Véase también [3, 6, 7].

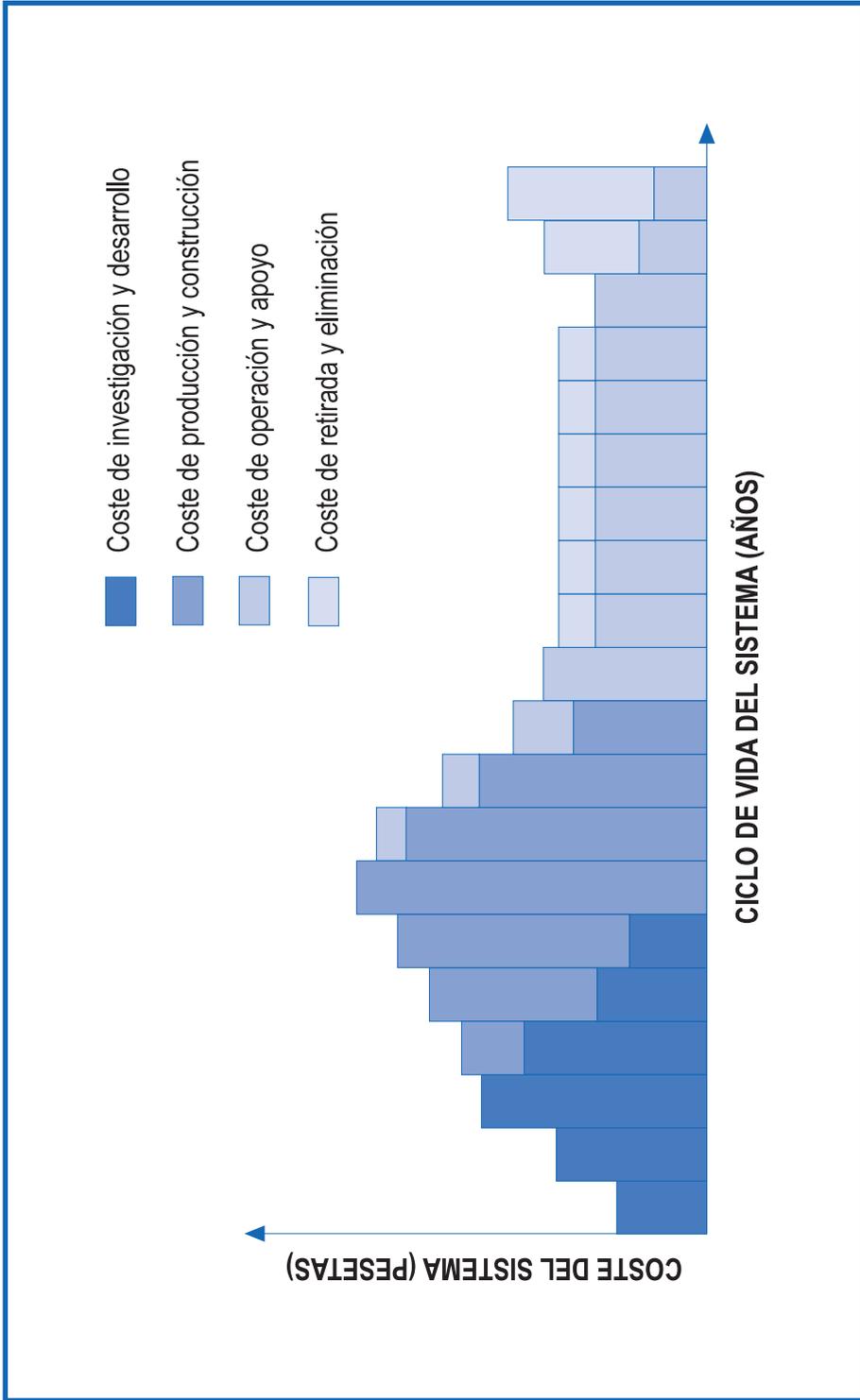


Figura 5 - UN PERFIL ACUMULADO DEL COSTE DEL CICLO DE VIDA -

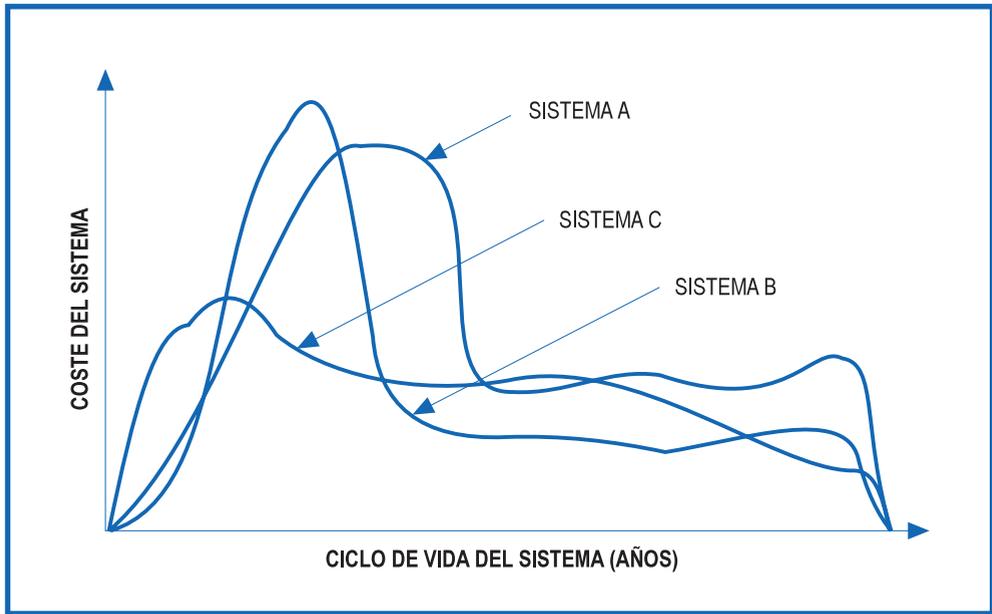


Figura 6 - PERFILES DEL COSTE DEL CICLO DE VIDA PARA VARIAS ALTERNATIVAS -

3

Estimación de los elementos del coste

ce Conta
56.256-N
69-58.123-7
rus 12.654-
39--3.698-1
isque in aet
umoz c8



4-25.210-34)
987-254-12.
ca et salial
um15.235-5
ab aternio
enim Doi

En el entorno físico la estimación se aproxima a la certeza en muchas situaciones. Ejemplos de ello son: la presión que alcanzará un gas encerrado en un recipiente bajo una temperatura dada, la corriente que circula a través de un conductor en función del voltaje y de la resistencia, o la velocidad de caída de un cuerpo en un momento dado. En el entorno económico, en el que debe realizarse el cálculo del coste del ciclo de vida, la certeza es mucho menor. Las leyes económicas dependen del comportamiento de la gente, mientras que las leyes físicas dependen de relaciones bien ordenadas de causa y efecto. La estimación del coste es una tarea inexacta que únicamente producirá como resultado una aproximación a lo que va a ocurrir. En este Capítulo se dirige la atención a métodos y técnicas para estimar el coste y otros elementos económicos.

3.1. Métodos de estimación del coste

Una estimación del coste es una opinión basada en el análisis y el buen juicio sobre el coste de un producto, sistema o servicio. Esta opinión puede alcanzarse de manera formal o informal mediante varios métodos que asumen que la experiencia es una buena base para predecir el futuro. En muchos casos, la relación entre la experiencia pasada y el resultado futuro es bastante directa y obvia; en otros casos es confusa, debido a que el producto, sistema o servicio propuesto difiere de sus predecesores de forma significativa. El reto consiste en proyectar desde lo conocido hasta lo desconocido, utilizando la

experiencia adquirida con entidades existentes. Las técnicas usadas para la estimación del coste varían desde la intuición en un extremo, hasta el análisis matemático detallado en el otro.

3.1.1. Estimación mediante procedimientos de ingeniería

La estimación mediante procedimientos de ingeniería implica el examen de segmentos aislados con un nivel profundo de detalle. El estimador comienza con un diseño completo y especifica cada tarea de producción o construcción, el equipo y herramientas necesarias, y los requisitos de material. Después se asignan costes a cada elemento, con el mayor nivel de detalle. Por fin, se combinan esos costes para obtener un total para producto y sistema.

Existen tablas preestablecidas de tiempos de las operaciones de producción para muchas tareas corrientes. Han sido establecidas normalmente por ingenieros de la industria y constituyen el tiempo mínimo necesario para completar una determinada tarea, empleando una capacitación normal del operario y unas herramientas corrientes. La aplicación de estas tablas es óptima en el caso de procedimientos de estimación de ingeniería en los que se considera una serie grande y estable de elementos idénticos de producción. No suelen ser útiles cuando se lleva a cabo la estimación de sistemas complejos en los que se va a fabricar sólo un elemento de cada tipo. Por ejemplo, las series de los sistemas militares y espaciales avanzados son habitualmente pequeñas, con una evolución constante y rápida de su configuración de diseño y de sus requisitos de producción.

Los procedimientos de estimación de ingeniería pueden exigir más horas de trabajo y más datos de lo que se dispone cuando se estudia el desarrollo de algunos sistemas o productos. Además, la combinación de millares de estimaciones detalladas en una única estimación global puede desembocar en un resultado erróneo, ya que a menudo, el todo resulta ser mayor que la suma de sus partes. El

estimador trabaja a partir de croquis, planos o descripciones de algunos elementos que no han sido completamente diseñados. Únicamente puede asignar costes a las actividades que conoce. El efecto de estimaciones sin refinar puede agravarse, porque la estimación detallada se realiza únicamente sobre parte del trabajo. Algunos elementos de la labor de producción o construcción, tales como planificación, modificación, coordinación y pruebas, se asientan normalmente como un porcentaje de las estimaciones detalladas. Otros elementos de coste, tales como mantenimiento, inspección, y control de producción se asientan como un porcentaje de la labor de producción necesaria. De esta forma, errores pequeños en las estimaciones detalladas pueden conducir a errores grandes en la estimación total del coste.

Otra fuente de error en las estimaciones realizadas mediante el método de ingeniería es la gran variabilidad que se produce en la fabricación de unidades sucesivas. Las series de producción de modelos similares pueden tener un tamaño limitado y a menudo estar sometidas a cambios de diseño. En el caso de sistemas de defensa, las tasas de producción varían con frecuencia y de forma inesperada. La proporción de componentes nuevos puede variar significativamente en los modelos de años sucesivos, a medida que el fabricante intenta adaptar un producto a las necesidades del mercado. A veces, el efecto de estos factores puede representarse mediante funciones matemáticas o estadísticas que describen el progreso tecnológico.

3.1.2. Estimación por analogía

Cuando una empresa entra en una nueva área, puede ser muy eficaz la estimación por analogía. Por ejemplo, las industrias aeronáuticas que competían en programas de misiles en los años 50 establecieron analogías entre aviones y misiles como base para la estimación. Se realizaron los ajustes apropiados en lo que se refiere a las diferencias de tamaño, número de motores y prestaciones. Es un ejemplo de estimación por analogía, a nivel macroscópico.

La estimación por analogía puede darse también a nivel microscópico. Las horas de mano de obra directa necesarias para fabricar un componente pueden estimarse recurriendo a las horas que fueron necesarias para trabajos similares. La base para la estimación es la similitud que existe entre el elemento conocido y la pieza propuesta. Algunos estimadores con experiencia, tales como mecánicos, fabricantes de herramientas o técnicos, pueden estimar los tiempos necesarios con mucha precisión. Por tanto, se les suele consultar cuando se necesita una estimación rápida.

A veces el coste de mano de obra directa se estima en relación con el coste de la materia prima directa. Estas relaciones se conocen con relativa precisión para distintos tipos de actividades. Por ejemplo, el coste de mano de obra para colocar 1.000 ladrillos es aproximadamente igual al coste de los ladrillos y del mortero necesario.

A todos los niveles de detalle, muchas estimaciones se realizan por analogía. Por ejemplo, el proyecto A necesitó 10.000 horas de mano de obra directa y 4.000 horas de equipos. Dadas las similitudes y diferencias entre el proyecto A y el proyecto B propuesto, el número de horas de mano de obra directa y de horas de equipos pueden estimarse en 8.000 y 3.200 respectivamente. Aplicando la tarifa actual de las horas de mano de obra y las de equipos, y una tarifa global de gastos generales, puede estimarse un coste total del proyecto. O bien el estimador puede encontrar elementos del proyecto A que sean análogos a elementos del proyecto B, de lo que puede estimarse el coste del proyecto B. En este ejemplo, la analogía pasa a formar parte del método de estimación de ingeniería.

Un inconveniente importante de la estimación por analogía es el alto grado de conocimientos exigido. Se necesita una considerable experiencia y pericia para identificar y usar las analogías apropiadas, y para hacer ajustes en las diferencias percibidas. Sin embargo, como el coste de la estimación por analogía es bajo, puede usarse como comprobación de otros métodos. A menudo es el único método que

puede utilizarse, porque el producto, sistema o servicio está sólo en una etapa preliminar del desarrollo.

3.1.3. Métodos paramétricos de estimación

El método paramétrico de estimación del coste puede usar técnicas estadísticas que varían desde un simple ajuste gráfico de curvas hasta un análisis de correlación múltiple. En cualquier caso, el objetivo es encontrar una relación funcional entre los cambios en el coste y el factor o factores de los que depende el coste, como la tasa de producción, el peso, el tamaño del lote, etc.

Aunque las técnicas paramétricas de estimación del coste son las preferidas en la mayoría de las situaciones, hay casos en que son precisos los métodos de ingeniería o la estimación por analogía porque no existen datos con una base histórica sistemática. El producto puede utilizar algunos métodos de fabricación nuevos poco conocidos, invalidando así el uso estadístico de datos de un artículo producido con anterioridad.

Habrán siempre situaciones en las que se necesitan métodos de analogía o de ingeniería, pero el método estadístico se considera suficiente en planificaciones a largo plazo. El coste total puede estimarse directamente en función de la potencia, peso, metros cuadrados, volumen, etc. Se pueden tratar estadísticamente los datos conocidos del ramo o la experiencia de mantenimiento o la energía consumida, y añadirse a los costes estimados estadísticamente asociados al propio elemento.

Las técnicas paramétricas de estimación variarán según el objetivo del estudio y la información disponible. En el diseño conceptual, es deseable tener un procedimiento que dé el coste total esperado del producto o sistema. Las reservas para imprevistos sirven para compensar los cambios que puedan surgir. Posteriormente, a medida

que el producto o sistema se acerca al diseño detallado, es deseable tener un procedimiento que ofrezca estimaciones de sus componentes. Entonces pueden aplicarse esfuerzos de ingeniería adicionales que reduzcan el coste de aquellos componentes que resultan ser de alta contribución en el coste total.

3.1.4. Aplicación de los métodos de estimación

Cuando se planifica, pueden obtenerse las tarifas de mano de obra y gastos generales en el ramo industrial correspondiente a partir de publicaciones estadísticas y usarlas para dar una estimación aproximada del coste de un elemento dado. A medida que el elemento se aproxima al momento del lanzamiento en su ciclo de diseño, pueden usarse los datos específicos para un determinado contratista o una localización particular. A medida que el conocimiento aumenta, pueden usarse más datos estadísticos específicos, como en el caso de un producto que ya está en producción. En esta etapa del producto, pueden utilizarse registros contables para obtener un valor relativamente preciso del coste.

Cuando se preparan los datos de costes, los requisitos pueden variar considerablemente, dependiendo de la fase del programa, del alcance de la definición del sistema o producto, y del tipo y profundidad del análisis que se está realizando. Durante las etapas iniciales de planificación y diseño conceptual del desarrollo del sistema, los datos disponibles son limitados, y el análisis del coste debe depender principalmente del uso de las distintas técnicas paramétricas de estimación del coste, como muestra la Figura 7. A medida que el diseño del sistema progresa, se dispone de información más completa del diseño y el analista es capaz de desarrollar las estimaciones del coste, comparando las características del nuevo sistema con sistemas similares en que se dispone de datos históricos de costes. La generación de datos de costes se basan en métodos de estimación por analogía. Finalmente, cuando la configuración del diseño del sistema se consolida, se obtienen los

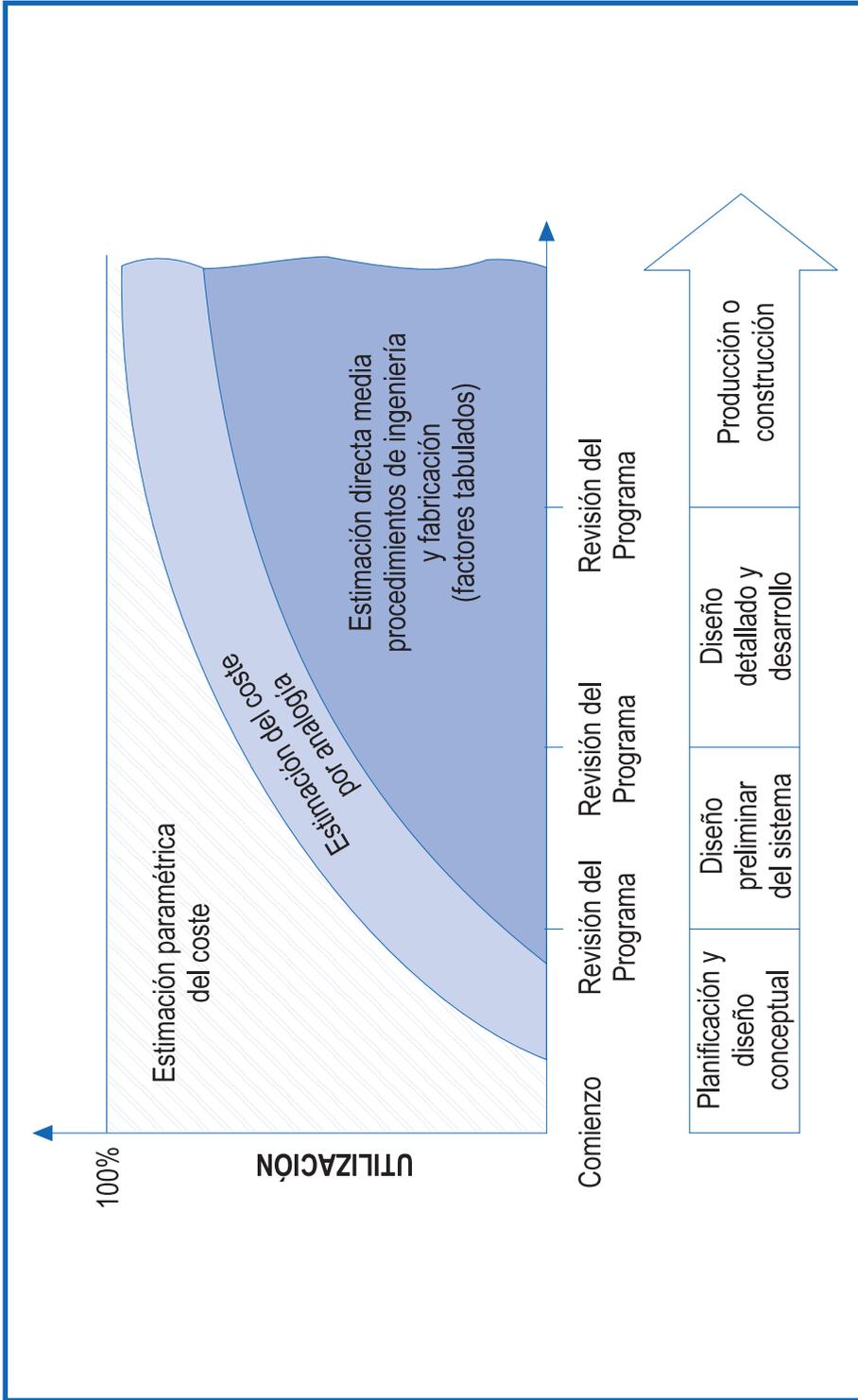


Figura 7 - MÉTODOS DE ESTIMACIÓN SEGÚN LAS FASES DEL PROGRAMA -

datos de diseño (para incluir gráficos, especificaciones, listas de componentes, predicciones, etc.) que permiten el desarrollo de estimaciones de ingeniería detallada, fabricación y apoyo logístico.

3.2. Desarrollo de los datos de costes

Durante el desarrollo de los datos de costes para un análisis de coste del ciclo de vida, el analista debe investigar inicialmente todas las fuentes posibles de datos con el fin de determinar de cuáles dispone para su aplicación directa en apoyo de los objetivos del análisis. Si no dispone de los datos necesarios, puede ser apropiado el uso de técnicas paramétricas de estimación del coste. Sin embargo, el analista debe antes determinar lo que puede deducirse de los bancos de datos existentes, los datos de la planificación inicial del sistema, la documentación del proveedor, las predicciones de fiabilidad y mantenibilidad, los análisis de apoyo logístico, los datos de pruebas, etc. En esta Sección se consideran algunas de estas fuentes de datos.

3.2.1. Requisitos de los datos de costes

La obtención del tipo adecuado de datos en el momento oportuno y su presentación en un formato manejable, es uno de los pasos más importantes en el proceso global del análisis del coste del ciclo de vida. Los requisitos de los datos deben definirse cuidadosamente, ya que la aplicación de muy pocos datos, de demasiados datos, del tipo equivocado de datos, etc. puede invalidar el análisis global, dando como resultado decisiones erróneas que pueden resultar muy costosas a largo plazo. Además, debe hacerse todo lo posible para evitar malgastar recursos costosos generando datos que pueden resultar totalmente innecesarios. A menudo, hay tendencia a llevar a cabo ejercicios analíticos detallados para obtener factores cuantitativos precisos, en momentos en que sólo se necesitan estimaciones superficiales a nivel de sistema para satisfacer las necesidades.

Normalmente, la definición de los objetivos y líneas maestras del análisis, junto con la identificación de los criterios específicos de evaluación, dictarán los requisitos de los datos para el análisis del coste del ciclo de vida (es decir, el tipo de datos deseados a partir del análisis y el formato en que se desea presentar los datos). Una vez definidos los requisitos de salida del análisis, el analista de costes desarrolla las metodologías y relaciones necesarias para producir los resultados deseados. Esto se realiza mediante el establecimiento de la estructura de desglose del coste y la selección del modelo de costes, donde se identifican los parámetros del sistema, las relaciones de estimación y los factores de los costes. La cumplimentación de estas etapas conduce a la identificación de los datos de entrada necesarios para llevar a cabo el análisis del coste.

3.2.2. Fuentes de obtención de los datos de costes

Las fuentes de obtención de los datos de costes son numerosas y variadas, como muestra la Figura 8. En esta Sección se presentan de forma resumida cinco fuentes principales de datos para el cálculo del coste de ciclo de vida a fin de suministrar una visión global de lo que debe buscar el analista de costes. Al avanzar en los requisitos de los datos, el analista encontrará que se ha ganado mucha experiencia en la determinación de los costes de investigación y desarrollo, y de producción o construcción. Sin embargo, dispone de muy pocos datos históricos de costes en el área de operaciones y apoyo.

Bancos de datos existentes. Puede usarse cuando sea aplicable la información histórica correspondiente a sistemas existentes, de configuración y función similares al elemento(s) que se desarrolla. A menudo es posible emplear tales datos y aplicar los factores de ajuste necesario para compensar cualquier diferencia en la tecnología, la configuración, el entorno operativo proyectado y el marco temporal. Se incluyen en esta categoría de datos ya existentes, los factores de coste usuales que se han deducido de la experiencia histórica que pueda

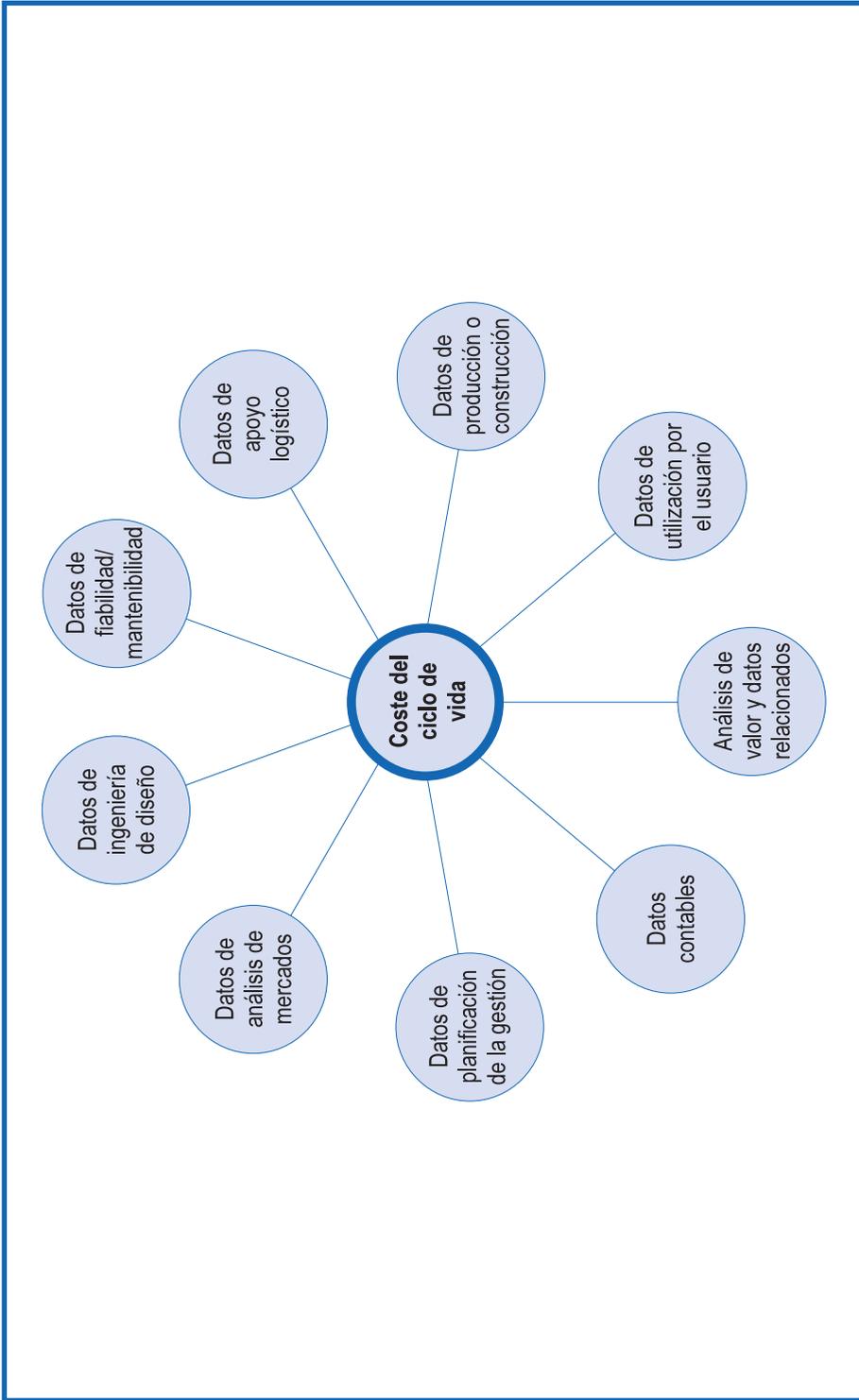


Figura 8 - ALGUNAS FUENTES DE DATOS DE COSTES -

aplicarse a funciones o actividades específicas. Los factores de coste usuales pueden cubrir áreas como:

1. El coste de ingeniería - pesetas por hora de trabajo del ingeniero principal, del ingeniero superior, del técnico, etc.
2. El coste de mano de obra de fabricación por categorías - pesetas por hora y por categoría.
3. Índice de costes generales - pesetas (o porcentaje) por coste de mano de obra directa.
4. Coste de adiestramiento - pesetas por semana de formación.
5. Coste de transporte - pesetas por kilogramo y por kilómetro.
6. El coste del combustible - pesetas por litro.
7. El coste de gestión de inventario - porcentaje del valor del inventario por año.
8. El coste de las instalaciones - pesetas por metro cúbico de ocupación.
9. El coste de la materia prima x - pesetas por kilogramo o por metro.

Cuando pueden aplicarse valores cuantitativos reales, normalmente todos estos factores y otros comparables se establecen a partir de tarifas y costes conocidos del mercado, y constituyen una entrada directa del análisis. Sin embargo, debe tenerse cuidado para asegurar que se incorporan de forma anual los ajustes inflacionistas y deflacionistas necesarios.

Datos de planificación avanzada del producto. Los datos de

planificación avanzada del sistema o producto que se evalúa, incluyen habitualmente los datos de análisis del mercado, la definición de los requisitos operativos del sistema y el concepto de mantenimiento, los resultados de estudios de viabilidad técnica y los datos de gestión del programa. El analista de costes necesita información acerca de la configuración física propuesta y las características de prestaciones más importantes del sistema, la misión que se prevé se realizará y los factores de utilización asociados, los parámetros de efectividad del sistema, la localización geográfica y los aspectos ambientales del sistema, el concepto de mantenimiento y la filosofía de apoyo logístico, etc. Esta información sirve como base en que se apoyan todas las actividades subsiguientes del programa. Si no se dispone de la información básica, el analista debe hacer algunas suposiciones y proceder en consecuencia. Ahora bien, estas suposiciones deben estar documentadas perfectamente.

Estimaciones y predicciones individuales del coste. Durante las fases iniciales de un programa, las estimaciones de costes se producen habitualmente en una forma más o menos continua. Estas estimaciones pueden englobar actividades de investigación y desarrollo, actividades de producción o construcción, y/o actividades operativas y de apoyo al sistema. Las actividades de investigación y desarrollo, que son básicamente no recurrentes por naturaleza, vienen cubiertas habitualmente por las estimaciones iniciales del coste de ingeniería o predicciones del coste hasta la obtención. Tales proyecciones reflejan principalmente los costes laborales e incluyen factores inflacionistas, aumentos del coste debidos a los cambios de diseño, etc.

Las estimaciones del coste de producción se representan a menudo en términos de costes no recurrentes y de costes recurrentes. Los costes no recurrentes se tratan de manera similar a los costes de investigación y desarrollo. Por otro lado, los costes recurrentes se basan con frecuencia en tablas de costes individualizados de fabricación, datos de ingeniería de costes, normas de ingeniería de la industria, etc. Bastante a menudo, los factores individualizados tabulados de costes se

documentan por separado y se revisan periódicamente para reflejar los efectos inflacionistas sobre la mano de obra y la materia prima, cambios en los precios de los proveedores, efectos del aprendizaje, etc.

Los costes operativos y de apoyo al sistema se basan en actividades proyectadas para la fase de uso operativo y de apoyo logístico del ciclo de vida, y son normalmente los más difíciles de estimar. Los costes operativos son función de los requisitos de la misión del sistema o producto, y de sus factores de utilización. Los costes de apoyo son básicamente función de las características inherentes de fiabilidad y mantenibilidad de diseño del sistema, y de los requisitos logísticos necesarios para apoyar todas las acciones de mantenimiento programado y no programado a lo largo del ciclo de vida proyectado. Los requisitos de apoyo logístico incluyen el personal de mantenimiento y su adiestramiento, el abastecimiento (repuestos, recambios e inventarios), equipos de prueba y apoyo, transporte y facturación, instalaciones, recursos informáticos, y ciertas facetas de datos técnicos. De esta forma, las estimaciones individualizadas del coste de apoyo del sistema se basan en la frecuencia prevista del mantenimiento o el valor medio del factor de mantenimiento, y en los recursos de apoyo logístico necesarios cuando se producen acciones de mantenimiento. Estos costes se deducen de los datos de predicción de fiabilidad y mantenibilidad, de los datos del análisis de apoyo logístico, y de otra información de apoyo, todo ello respaldado por los datos de diseño de ingeniería del sistema o producto.

Documentación y datos del proveedor. Cuando sea apropiado, pueden usarse como fuente de datos las propuestas, catálogos, datos del diseño e informes que traten sobre estudios especiales realizados por los proveedores (o los potenciales proveedores). Bastante a menudo, los elementos principales de un sistema se obtienen por adquisición en el mercado o se desarrollan mediante un acuerdo de subcontratación de algún tipo. Los potenciales proveedores presentarán propuestas que pueden incluir no sólo el coste de adquisición sino también a veces previsiones del coste del ciclo de vida. Si se usan los

datos de costes del proveedor, el analista de costes debe tener absoluta consciencia de lo incluido y lo no incluido. No deben presentarse omisiones ni repetición de costes.

Datos de prueba y operación. Durante las últimas fases del desarrollo y producción del sistema, y cuando el sistema o producto está sometido a pruebas o en uso operativo, la experiencia obtenida representa la mejor fuente de datos para el análisis y la evaluación definitivos. Esos datos se recogen y utilizan como entrada para el análisis del coste del ciclo de vida. Asimismo, los datos de operación se usan en la medida de lo posible para evaluar el impacto en el coste del ciclo de vida que puede producirse a causa de cualquier modificación propuesta en el equipo principal, el «software» y/o los elementos del apoyo logístico.

3.3. Ajuste de los datos de costes

Los datos deben ser coherentes y comparables si han de ser útiles para el procedimiento de estimación. A menudo la incoherencia es propia de los datos de costes a causa de diferencias entre las definiciones y los volúmenes de producción, ausencia de ciertos elementos de coste, inflación, etc. En esta Sección se presentan algunos métodos que han demostrado ser útiles para enfrentarse con esta inconsistencia inherente.

3.3.1. Categorías de los datos de costes

Las diferentes prácticas contables hacen necesario el ajuste de los datos básicos de costes. Las distintas organizaciones registran sus costes de maneras diferentes; a menudo se les exige remitir los costes a organismos de la Administración en categorías distintas de las usadas internamente. Estas categorías también cambian de vez en cuando. Debido a estas diferencias de definición, el primer paso en la estimación del coste debe ser ajustar todos los datos a la definición en uso.

Asimismo se necesita consistencia en la definición de las características físicas y de las prestaciones. El peso de un elemento depende de lo que se incluye en él. Por ejemplo, en los aviones se emplea el peso bruto, el peso neto y el peso de la estructura, diferenciándose cada término en su significado exacto. La velocidad puede definirse de muchas formas: velocidad máxima, velocidad de crucero, etc. Estas diferencias pueden conducir a estimaciones de coste erróneas cuando se obtienen estadísticamente en función de una característica física. Cuando los datos de coste se obtienen de varias fuentes, es importante una adecuada interpretación tanto de las definiciones de las características físicas y de prestaciones como de los elementos del coste.

Otra área que exige una clara definición es la de los costes recurrentes y no recurrentes. Los costes recurrentes son función del número de unidades producidas, mientras que los costes no recurrentes no lo son. Si el esfuerzo de investigación y desarrollo de productos nuevos se considera como un gasto cargado a la producción actual, no se repercutirá en el nuevo producto. En este caso, el coste de iniciar un producto nuevo quedará subestimado y el coste de los productos existentes se verá sobreestimado. Deben separarse los costes no recurrentes y los recurrentes mediante un ajuste a la baja de los costes de producción de los productos existentes y el establecimiento de una partida para recoger los costes de investigación y desarrollo del nuevo producto.

Además del coste inicial necesario para construir o producir una nueva estructura o sistema, existen costes recurrentes de magnitud considerable asociados a la operación, el mantenimiento y la eliminación. La energía, el combustible, los lubricantes, los recambios, el abastecimiento en general durante la vida operativa, la formación del usuario, la mano de obra de mantenimiento y el apoyo logístico son algunos de estos costes recurrentes. Cuando se multiplica la vida de muchos sistemas complejos por costes recurrentes de este tipo, se

encuentra un gasto total que puede ser grande comparado con el coste inicial. A menudo se aplica poca dedicación a la estimación de los costes asociados a la operación y al mantenimiento. Esto es un error, ya que el coste del ciclo de vida de la estructura o sistema es la única base correcta para juzgar acerca de su valor.

3.3.2. Cambios del nivel de precios

El precio de los bienes y servicios y de la mano de obra, de la materia prima y de la energía necesaria para su producción, cambia con el tiempo. Las presiones inflacionistas han actuado para aumentar el precio de la mayoría de los artículos. Estos aumentos han sido muy importantes en los últimos años. Los precios sólo han descendido durante períodos muy cortos.

La Tabla 1 muestra el cambio en el salario horario medio de los trabajadores en distintas industrias a lo largo de 20 años. La tasa horaria en la industria de fabricación se ha multiplicado aproximadamente por un factor de 3,0 entre 1970 y 1990. De esta forma, si la componente del coste de mano de obra de un automóvil era de 1.500 dólares en 1970, en 1990 sería de casi 4.500 dólares. Afortunadamente, el incremento en la productividad ha mantenido el coste de mano de obra del automóvil aproximadamente en el mismo porcentaje durante este período de 20 años.

Los cambios de niveles de precios dependen del país en cuestión, con algunas diferencias dentro de un país dado. La Tabla 2 muestra la comparación de los costes horarios medios de mano de obra para un grupo de países industrializados (por categoría de industria), con EE.UU. = 1,00.

La Tabla 3 muestra un índice de los costes de creación de factorías por países en los últimos años, con EE.UU. = 1,00. Este índice es un ejemplo de cómo pueden agruparse los costes de mano de obra, materias primas y otros elementos en un índice compuesto.

ANÁLISIS DEL COSTE DEL CICLO DE VIDA DE LOS SISTEMAS

AÑO Y MES	CONSTRUCCIÓN	INDUSTRIA DE FABRICACIÓN	SERVICIOS	TRANSPORTE Y SERV. PÚBLICO	TOTAL SECTOR PRIVADO
1970	5,24	3,35	2,81	3,85	3,23
1971	5,69	3,57	3,04	4,21	3,45
1972	6,06	3,82	3,27	4,65	3,70
1973	6,41	4,09	3,47	5,02	3,94
1974	6,81	4,42	3,75	5,41	4,24
1975	7,31	4,83	4,02	5,88	4,53
1976	7,71	5,22	4,31	6,45	4,86
1977	8,10	5,68	4,65	6,99	5,25
1978	8,66	6,17	4,99	7,57	5,69
1979	9,27	6,70	5,36	8,16	6,16
1980	9,94	7,27	5,85	8,87	6,66
1981	10,82	7,99	6,41	9,70	7,25
1982	11,63	8,49	6,92	10,32	7,68
1983	11,94	8,83	7,31	10,79	8,02
1984	12,13	9,19	7,59	11,12	8,32
1985	12,32	9,54	7,90	11,40	8,57
1986	12,48	9,73	8,18	11,70	8,76
1987	12,71	9,91	8,49	12,03	8,98
1988	13,01	10,18	8,91	12,32	9,29
1989	13,37	10,47	9,39	12,57	9,66
1990	14,04	10,99	9,86	13,20	10,14

ORIGEN: U.S. Bureau of Labor Statistics, Employment and Earnings

Tabla 1 - SALARIOS HORARIOS MEDIOS DE TRABAJADORES EN LOS EE.UU. (1970 - 1990) -

PAÍS	INDUSTRIA	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988
EE.UU.	1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
CANADÁ	1	0,72	0,72	0,72	0,67	0,63	0,64	0,62	0,74
	2	0,88	0,91	0,88	0,83	0,76	0,76	0,81	0,88
	3	0,99	0,99	0,85	0,79	0,73	0,71	0,80	0,85
REINO UNIDO	1	0,58	0,53	0,48	0,40	0,47	0,55	0,59	0,72
	2	0,58	0,57	0,50	0,42	0,51	0,51	0,63	0,79
	3	0,45	0,41	0,37	0,33	0,38	0,41	0,48	0,59
JAPÓN	1	0,72	0,59	0,66	0,62	0,70	0,99	1,00	1,22
	2	0,72	0,60	0,66	0,62	0,70	0,96	0,98	1,20
	3	0,53	0,42	0,48	0,48	0,53	0,74	0,77	0,94
ALEMANIA OCC.	1	0,81	0,74	0,67	0,56	0,63	0,86	0,94	1,05
	2	0,90	0,84	0,77	0,65	0,75	1,02	1,13	1,28
	3	0,70	0,63	0,59	0,51	0,57	0,74	0,85	0,93
SUECIA	1	N/A							
	2	0,84	0,84	0,64	0,64	0,72	0,85	0,95	1,14
	3	0,78	0,78	0,59	0,59	0,67	0,84	0,96	1,13

ORIGEN: Engineering Costs and Production Economics, Julio 1989. Obsérvese que para todos los años menos 1987 y 1988 se dan valores para Octubre. Para 1987 y 1988 corresponden al mes de Diciembre.

CÓDIGO DE INDUSTRIA:

1. Industria química.
2. Fabricación de maquinaria, excepto la eléctrica.
3. Construcción.

Tabla 2 - COMPARACIÓN DE COSTES HORARIOS MEDIOS DE LA MANO DE OBRA, CON EE.UU. = 1,0 -

PAÍS	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988
EE.UU.	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
CANADÁ	0,90	0,90	0,92	0,92	0,86	0,81	0,76	0,80	0,84
REINO UNIDO	0,94	1,08	0,86	0,79	0,68	0,59	0,70	0,81	0,92
JAPÓN	0,79	0,77	0,73	0,60	0,62	0,58	0,65	0,94	0,99
ALEMANIA OCC.	1,20	1,13	0,88	0,85	0,76	0,64	0,73	1,01	1,09
SUECIA	1,26	1,29	0,99	0,90	0,76	0,70	0,79	1,03	1,16

ORIGEN: Engineering Costs and Production Economics, Julio 1989. Obsérvese que todos los índices corresponden a 1 de enero.

Tabla 3 - COMPARACIÓN DE COSTES DE CREACIÓN DE FACTORÍAS POR PAÍSES, CON EE.UU.: 1,0 -

No siempre es sencillo el ajuste de los costes para aumentos de los precios iniciales con base en los índices. Mientras que la tasa media de la mano de obra puede aumentar en un 6% en un año dado, la tasa de la mano de obra de una determinada empresa puede ser mayor o menor. Además, puede no disponerse de los índices de materiales específicos o de ciertos componentes adquiridos. Un tercer problema surge cuando se realizan gastos durante un número de años para un proyecto de larga duración. En este último caso, en los años iniciales los costes necesitarán menos ajustes que en los años finales.

Cuando se consideran cambios del nivel de precios, debe considerarse el hecho de que el aumento en la productividad tiende a compensar los aumentos en los costes de mano de obra. El aumento en la productividad no es uniforme en todas las empresas o incluso dentro de una determinada compañía. Sin embargo, es un hecho reconocido en economía que el límite superior de los aumentos de salarios viene impuesto por el aumento alcanzable en la productividad. Los aumentos de salarios que excedan de los aumentos en la productividad tienden a disminuir los beneficios y/o a aumentar los precios, lo que a su vez, aumenta la inflación.

3.3.3. Mejoras debidas al aprendizaje

El aprendizaje lo realiza un individuo o una organización en función del número de unidades producidas. Es de aceptación común que la cantidad de tiempo necesario para completar una tarea dada o para producir una unidad, será menor cada vez que se lleve a cabo la tarea de nuevo. El tiempo por unidad disminuirá a un ritmo decreciente, y esta disminución del tiempo seguirá una pauta que se puede predecir.

La evidencia empírica que apoya el concepto de la curva de aprendizaje se detectó por primera vez en la industria aeronáutica. Se

observó la disminución de las horas de mano de obra directa necesarias para construir un avión y se comprobó que esta disminución era predecible. Desde entonces, se han encontrado aplicaciones de la curva de aprendizaje en otras industrias como medio de ajuste de los costes de los elementos producidos a partir del primero.

La mayoría de curvas de aprendizaje se basan en la suposición de que las horas de mano de obra directa necesarias para completar una unidad del producto disminuirán en un porcentaje constante cada vez que se duplica la cantidad de producción. Una tasa de mejora típica en la industria aeronáutica es de un 20% al duplicar la cantidad. Ello equivale a una función de aprendizaje del 80% lo que significa que el número de horas de mano de obra directa necesarias para construir el segundo avión será el 80% del número de horas necesarias para construir el primero. El cuarto avión necesitará el 80% del número de horas que exigía el segundo avión, el octavo avión necesitará el 80% del número de horas que el cuarto, etc. Esta relación se muestra en la Tabla 4.

NÚMERO DE LA UNIDAD	HORAS DE MANO DE OBRA POR UNIDAD	HORAS DE MANO DE OBRA DIRECTA ACUMULADAS	VALOR MEDIO DE HORAS DE MANO DE OBRA DIRECTA ACUMULADAS
1	100,00	100,00	100,00
2	80,00	180,00	90,00
4	64,00	314,21	78,55
8	51,20	534,59	66,82
16	40,96	892,01	55,75
32	32,77	1,467,86	45,87
64	26,21	2,392,45	37,38

Tabla 4 - HORAS DE MANO DE OBRA DIRECTA POR UNIDAD, ACUMULADAS Y MEDIA ACUMULADA PARA UNA FUNCIÓN DEL 80%, CON LA PRIMERA UNIDAD A 100 HORAS -

Puede desarrollarse una expresión analítica de la curva de aprendizaje. Sea:

- x = el número de unidades;
- Y_x = el número de horas de mano de obra directa necesarias para producir la x -ésima unidad;
- K = el número de horas de mano de obra directa necesarias para producir la primera unidad;
- ϕ = el parámetro de la pendiente de la curva de aprendizaje.

Suponiendo un porcentaje constante de disminución del número de horas de mano de obra directa cuando se duplica la producción de unidades,

$$\begin{aligned} Y_x &= K\phi^0 & \text{donde } x &= 2^0 = 1 \\ Y_x &= K\phi^1 & \text{donde } x &= 2^1 = 2 \\ Y_x &= K\phi^2 & \text{donde } x &= 2^2 = 4 \\ Y_x &= K\phi^3 & \text{donde } x &= 2^3 = 8 \end{aligned} \quad (3.1)$$

Por tanto,

$$Y_x = K\phi^d \quad \text{donde } x = 2^d \quad (3.2)$$

Tomando logaritmos decimales, obtenemos:

$$\log Y_x = \log K + d \log \phi \quad (3.3)$$

donde:

$$\log x = d \log 2 \quad (3.4)$$

despejando d , obtenemos:

$$d = \frac{\log Y_x - \log K}{\log \phi} \quad (3.5)$$

y ya que:

$$d = \frac{\log x}{\log 2} \quad (3.6)$$

se deduce que

$$\frac{\log Y_x - \log K}{\log \phi} = \frac{\log x}{\log 2} \quad (3.7)$$

Sea

$$n = \frac{\log \phi}{\log 2} \quad (3.8)$$

Por tanto,

$$\log Y_x - \log K = n \log x \quad (3.9)$$

Tomando antilogaritmos en ambos lados, tenemos:

$$\begin{aligned} \frac{Y_x}{K} &= x^n \\ Y_x &= Kx^n \end{aligned} \quad (3.10)$$

La aplicación de la ecuación (3.10) puede ilustrarse refiriéndose al ejemplo de una función de progreso del 80% con la primera unidad a 100 horas de mano de obra directa. Resolviendo para obtener Y_8 , vemos que el número de horas de mano de obra directa necesarias para construir la octava unidad será

$$\begin{aligned} Y_8 &= 100(8)^{\log 0,8 / \log 2} \\ &= 100(8)^{-0,322} \\ &= \frac{100}{1,9535} = 51,2 \end{aligned} \quad (3.11)$$

La información de la curva de aprendizaje puede extenderse a las estimaciones del coste de la mano de obra multiplicando por la

tarifa adecuada de la mano de obra. Al proceder así, el analista debe tener en cuenta que las unidades posteriores pueden completarse meses o años después de las unidades iniciales. Puede ser necesario realizar ajustes en los aumentos de las tarifas de mano de obra de la misma forma que el ajuste por aprendizaje propio de la aplicación de este tipo de curva.

3.4. Relaciones de estimación del coste

Normalmente, las estimaciones de un resultado serán más precisas si se basan en estimaciones de los factores que tienen relación con el resultado, que si el resultado se estima directamente. Por ejemplo, la estimación del volumen de una habitación será más precisa si se estiman las distintas dimensiones de la habitación y se calcula el volumen, que si se estima el volumen directamente. Se aplica el mismo razonamiento en la estimación de costes y de otros elementos económicos.

A menudo los métodos de estimación de costes desembocan en funciones ajustadas matemáticamente llamadas relaciones de estimación del coste (Cost Estimating Relationships, CER). Una relación de estimación del coste es un modelo funcional que describe matemáticamente el coste de una estructura, sistema o servicio en función de una o más variables independientes. Por supuesto, debe existir una relación lógica o teórica de las variables con el coste, una significación estadística de la contribución de las variables, e independencia entre las variables consideradas.

3.4.1. *Funciones paramétricas de estimación*

Las relaciones paramétricas de estimación del coste son básicamente reglas empíricas que establecen correspondencias entre distintas categorías de variables determinantes del coste o explicativas

de cualquier tipo. Normalmente estas variables explicativas representan características de las prestaciones del sistema, características físicas, factores de efectividad, o incluso otros elementos del coste. Las relaciones de estimación pueden tomar formas distintas (a saber, continuas o discontinuas, matemáticas o no matemáticas, lineales o no lineales, etc.). En los párrafos siguientes se presentan algunas de estas relaciones.

Funciones lineales simples. Una función de estimación lineal simple se representa como:

$$y = a + bx \quad (3.12)$$

donde y, x son las variables dependiente e independiente, y a, b son parámetros. Las funciones lineales son útiles porque muchas relaciones de coste tienen esta forma. A veces se establecen relaciones lineales empleando técnicas de ajuste de curvas (por ejemplo, mínimos cuadrados) o análisis de regresión. Tales funciones lineales se usan para predecir resultados y pueden relacionar dos parámetros de coste, un parámetro de coste con un parámetro que no sea de coste, y/o dos parámetros que no son de coste. En la Figura 9 se muestran dos ilustraciones.

Funciones simples no lineales. No todas las funciones son lineales. Algunas relaciones de coste pueden ser, por naturaleza, exponenciales, hiperbólicas, o adaptarse a otro tipo de curva. Ejemplos de formas no lineales con una única variable explicativa son:

$$\begin{aligned} y &= ab^x && \text{(exponencial)} \\ y &= a + bx - cx^2 && \text{(parabólica)} \\ y &= \frac{1}{a + bx} && \text{(hiperbólica)} \end{aligned} \quad (3.13)$$

La Figura 10 muestra dos aplicaciones no lineales.

Funciones escalón discontinuas. Las relaciones de estimación introducidas implican una función continua con variables de coste y de

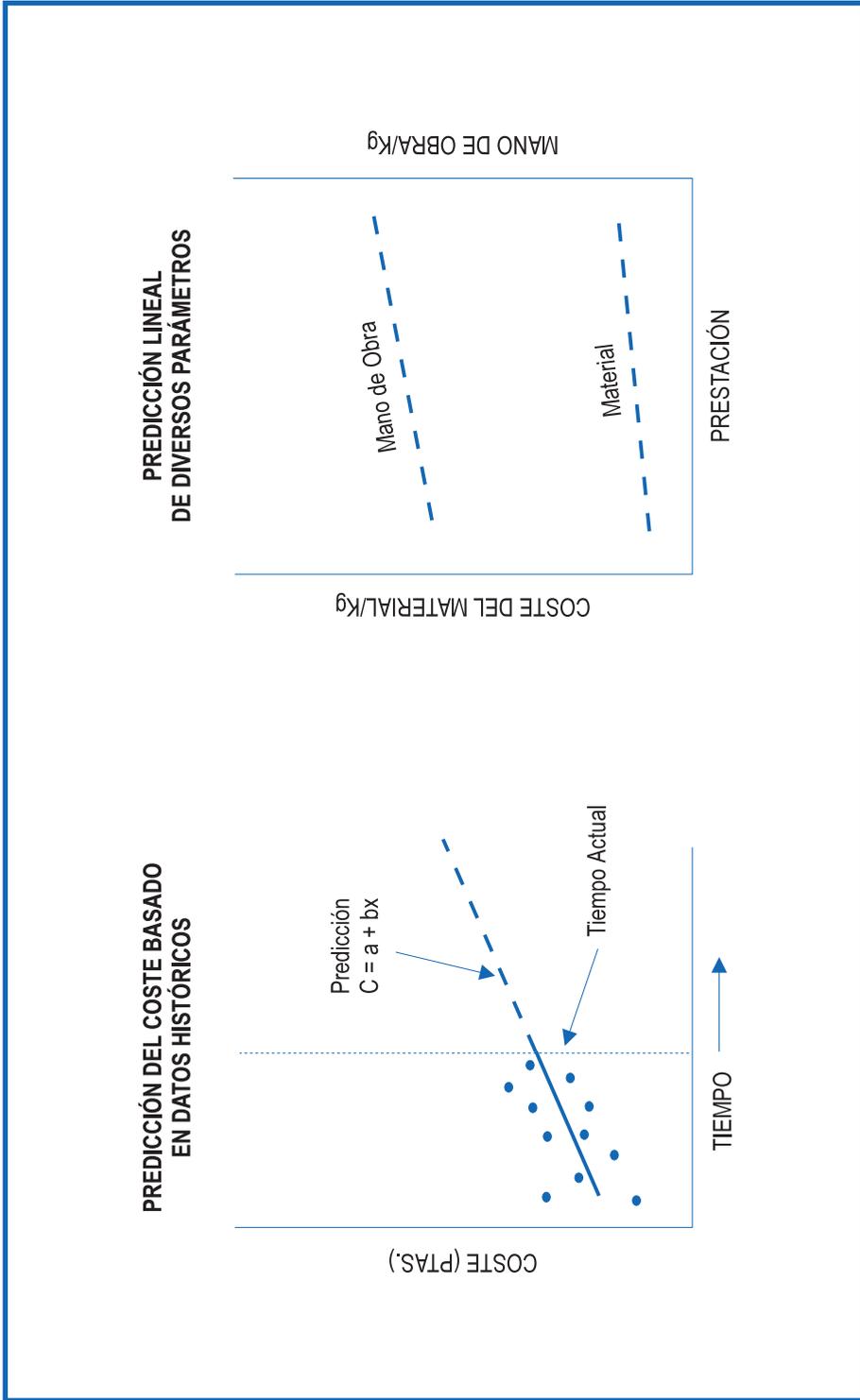


Figura 9 - RELACIONES LINEALES SIMPLES DE ESTIMACIÓN DEL COSTE -

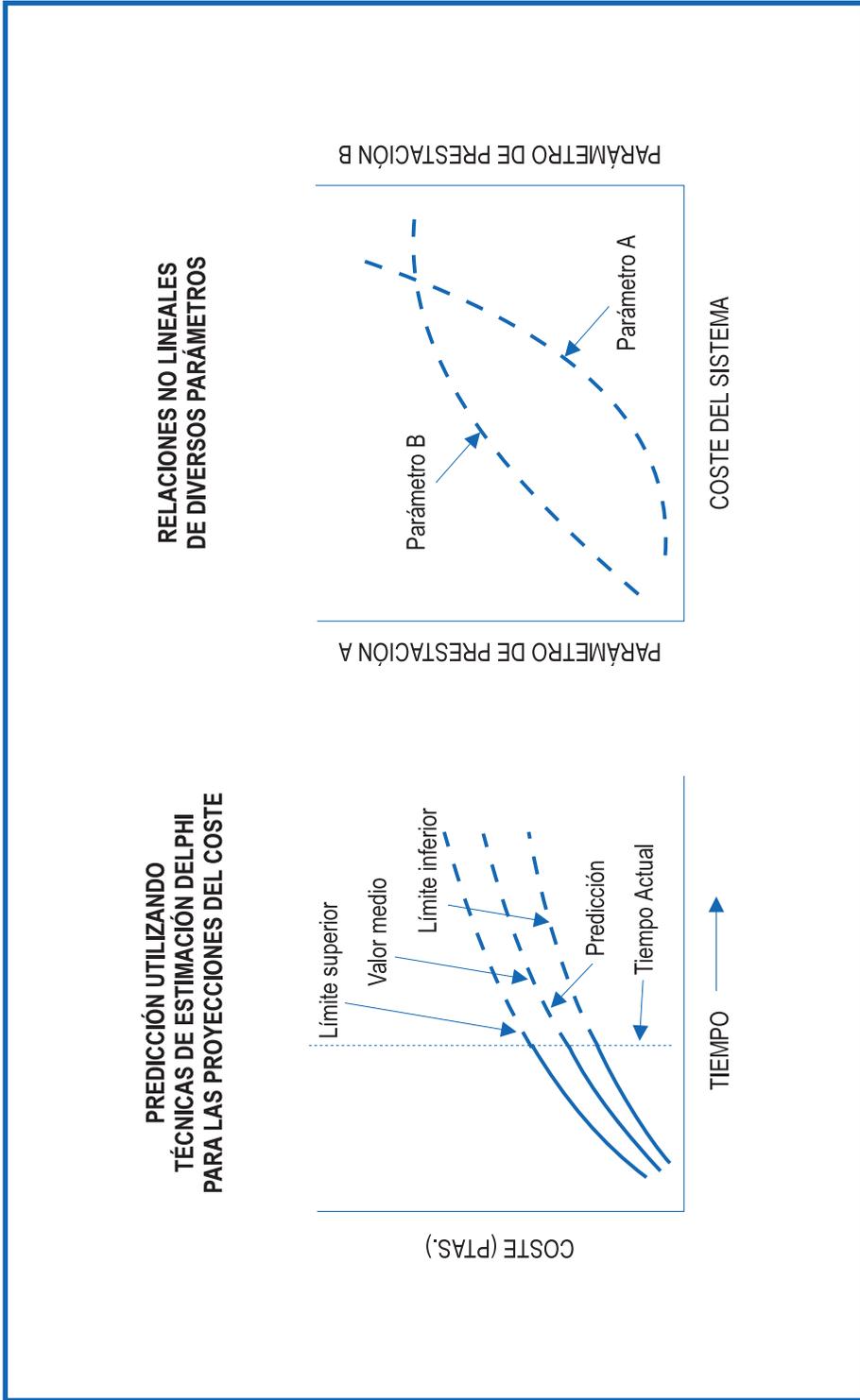


Figura 10 - RELACIONES NO LINEALES SIMPLES DE ESTIMACIÓN DEL COSTE -

otro tipo. Sin embargo, en muchas ocasiones, el coste puede ser constante en un intervalo específico de la variable explicativa y aumentar bruscamente a un nivel superior en algún punto, permanecer constante de nuevo, volver a aumentar a otro nivel, etc. La Figura 11 ilustra este tipo de relación, llamada función escalón. Estos tipos de funciones son útiles para ilustrar el comportamiento del coste de adquisición de unidades cuantificables para la producción, de las actividades de apoyo que se representan por pequeños incrementos discontinuos, de las relaciones precio-cantidad, etc.

Funciones de distribución estadística. Cuando se analizan los datos históricos de coste, se encuentra que el coste real de una actividad dada varía cuando se realiza varias veces. Esta variación puede tomar cualquier forma de distribución, como ilustra la Figura 12. En la predicción de costes futuros de las actividades comparables en un programa nuevo, el analista de costes puede desear adoptar una distribución y determinar la mediana, el valor medio, la varianza, la desviación típica, etc. para evaluar el riesgo en términos de probabilidad de las posibles variaciones del coste. Las distribuciones asociadas con los costes históricos facilitarán esta tarea.

Otras formas de estimación. De forma más general, el analista puede utilizar analogías como forma de estimación. Se pueden emplear los datos históricos de casos en el pasado para establecer estimaciones futuras, fundándose en la similitud. Tales estimaciones pueden usarse directamente o bien pueden factorizarse hasta cierto punto para compensar pequeñas diferencias.

Otro método puede implicar la estimación de coste por el orden de rango. Se evalúa el coste de una serie de actividades comparables y después se clasifican de acuerdo con esa característica (es decir, desde la actividad de mayor coste hasta la actividad de menor coste). Después de realizar la clasificación, se examina cada actividad comparándola con las demás, pudiendo ajustarse los valores iniciales del coste si las relaciones específicas parecen ser poco realistas. Esto puede exigir un proceso iterativo.

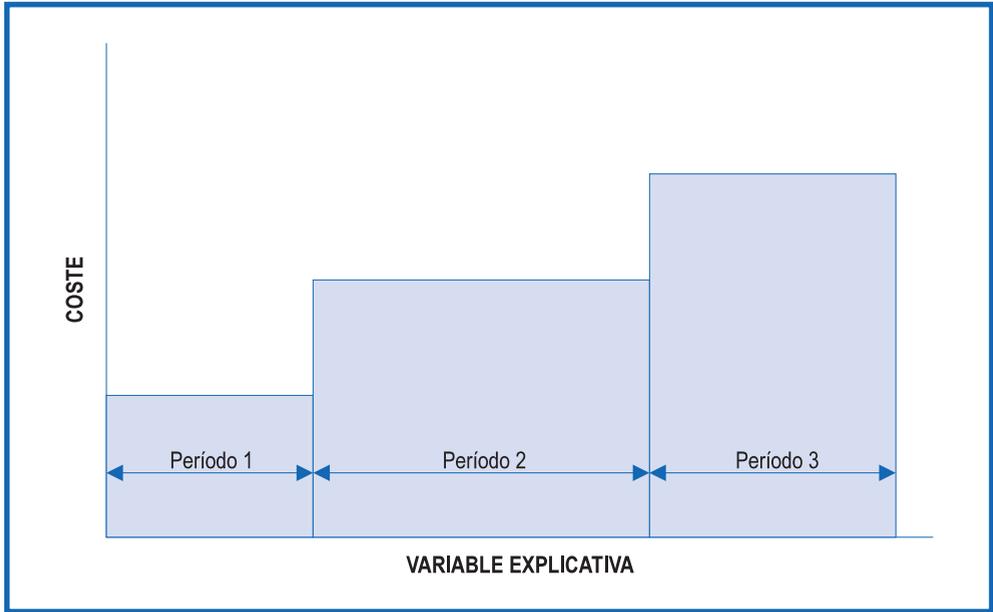


Figura 11 - FUNCIÓN DISCONTINUA EN ESCALONES -

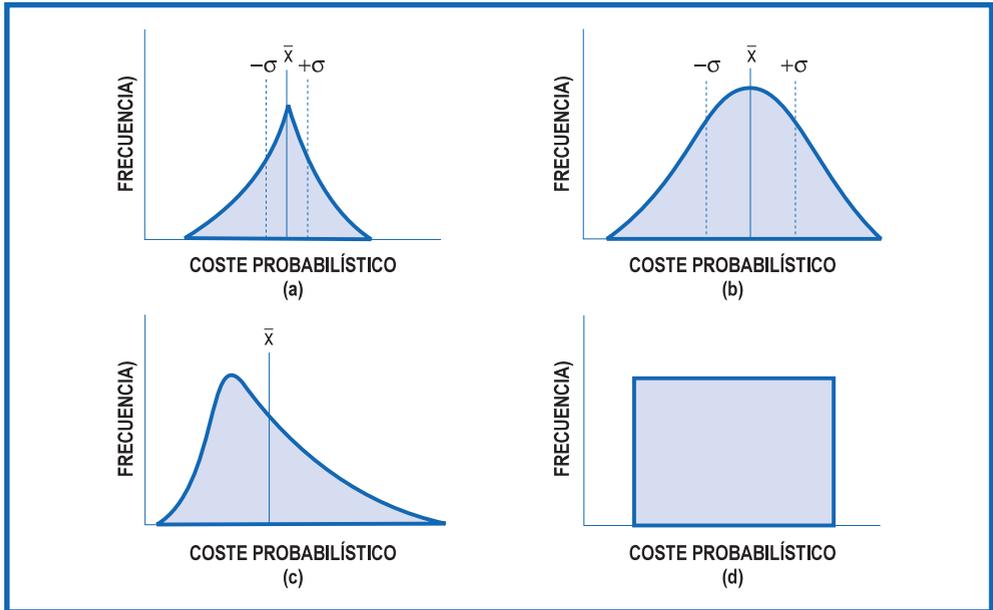


Figura 12 - DISTRIBUCIONES DE COSTE -

3.4.2. Algunos ejemplos de CER

Pueden representarse muchos ejemplos de relaciones de estimación del coste que sigan una o más de las categorías ya citadas. En esta sección se explican e ilustran de forma numérica dos relaciones generalmente aplicables. Para la estimación del coste, la primera utiliza la curva de aprendizaje y la segunda usa el modelo a escala.

Determinación del coste del elemento que implica aprendizaje. Como ejemplo del desarrollo de una relación de estimación del coste, consideremos la producción de una serie de N unidades. El número acumulado de horas de mano de obra directa necesarias para producir N unidades puede expresarse como:

$$T_N = Y_1 + Y_2 + \Delta + Y_N = \sum_{x=1}^n Y_x \quad (3.14)$$

donde Y_x es el número de horas de mano de obra directa necesarias para producir la unidad x -ésima y que se expresa por

$$Y_x = Kx^n \quad (3.15)$$

Podemos hacer una aproximación en el número de horas acumuladas de mano de obra directa, dada por

$$\begin{aligned} T_N &\equiv \int_0^N Y_x dx \\ &\equiv \int_0^N Kx^n dx \\ &\equiv K \left(\frac{N^{n+1}}{n+1} \right) \end{aligned} \quad (3.16)$$

Dividiendo por N obtenemos una aproximación del número medio acumulado de horas de mano de obra directa, expresado por

$$V_N \equiv \frac{1}{n+1} (KN^n) \quad (3.17)$$

El coste del elemento por unidad puede expresarse por medio del coste de mano de obra directa, el coste de la materia prima directa y los costes generales. Sean

LR = tasa horaria de la mano de obra directa;

DM = coste unitario de la materia prima directa;

OH = tasa de gastos generales expresada como fracción decimal de la tasa horaria de mano de obra directa.

El coste unitario del elemento, C_i , puede expresarse como

$$C_i = V_N(LR) + DM + V_N(LR)(OH) \quad (3.18)$$

o, sustituyendo el valor de V_N ,

$$C_i = \frac{KN^n}{n+1}(LR)(1+OH) + DM \quad (3.19)$$

Como ejemplo de aplicación de esta relación de estimación del coste, consideremos una situación en la que deben producirse 8 unidades. La tasa de mano de obra directa es de 9 dólares por hora, el coste unitario de la materia prima directa por unidad es de 600 dólares y la tasa de gastos generales es de 0,90. Se estima que la primera unidad necesitará 100 horas de mano de obra directa y que se aplica una curva de aprendizaje del 80%. Por tanto, el coste del elemento por unidad se obtiene a partir de la última ecuación

$$\begin{aligned} C_i &= \left[\frac{100(8)^{-0,322}}{-0,322 + 1} \right] (\$9)(1,90) + \$600 \\ &= \left[\frac{\$51,19}{0,678} \right] (\$9)(1,90) + \$600 \\ &= \$1,291 + \$600 = \$1,891 \end{aligned} \quad (3.20)$$

Esta relación de estimación del coste proporciona el coste unitario

como función del coste de mano de obra directa, el coste de la materia prima directa y los costes generales. Asimismo, ajusta las horas de mano de obra directa de acuerdo con el aprendizaje según un índice estimado.

Modelo a escala. A menudo, la estimación del coste de equipos puede realizarse utilizando un modelo a escala. El equipo al que se aplica esta relación de estimación del coste debe ser similar en tipo y variar únicamente en tamaño. Las economías de escala por razón del tamaño se expresan según la relación

$$C = C_r \left(\frac{Q_c}{Q_r} \right)^m \quad (3.21)$$

donde:

- C = coste del tamaño del diseño Q_c ;
- C_r = coste conocido del tamaño de referencia Q_r ;
- Q_c = tamaño del diseño;
- Q_r = tamaño del diseño de referencia;
- m = exponente de correlación, $0 < m < 1$.

Si $m = 1$, existe una relación lineal y no se aplican las economías de escala. Para la mayoría de los equipos, m será aproximadamente de 0,5, y para los equipos de tratamiento de productos químicos, es aproximadamente de 0,6.

Como ejemplo de aplicación de la ecuación (3.21), supongamos que un reactor de 200 galones con revestimiento y sobrecubierta vidriados cuesta 9.500 dólares en 1980. Se necesita una estimación de lo que costaría comprar e instalar un reactor de 300 galones en 1990. El índice de precios en 1980 era 180 y se espera que sea 235 en 1990. Una estimación del exponente de correlación para este tipo de equipo es de 0,50. Por tanto, el coste estimado en dólares de 1980 es:

$$C_{1990} = \$9.500 \left(\frac{300}{200} \right)^{0,5} = \$11.635 \quad (3.22)$$

y el coste en dólares de 1986 será

$$C_{1990} = \$11.635 \left(\frac{235}{180} \right) = \$15.190 \quad (3.23)$$

Esta relación de estimación del coste hace corresponder un coste conocido con un coste futuro mediante una relación exponencial. La determinación del exponente es esencial para el proceso de estimación.

Otras relaciones de estimación. El uso extendido de las relaciones de estimación revela su valor en un gran número de situaciones. Estas relaciones existen en forma de ecuaciones, conjuntos de curvas, nomogramas y tablas.

En la industria aeronáutica y de defensa es habitual expresar el coste de la estructura del avión, de los motores, de la aviónica, etc. en función del peso, empuje, velocidad, etc. Normalmente el interés se presenta para la siguiente generación de aviones o misiles. El coste estimado se determina mediante una extrapolación de los valores conocidos de un grupo de muestra al vehículo propuesto desconocido. Después esta información se utiliza en los estudios de coste-efectividad y en los requisitos de presupuestos.

Los equipos de control de contaminación tales como las plantas depuradoras pueden estimarse a partir de funciones que relacionan el coste de inversión con su capacidad, expresada en litros por día. Un municipio que considera una planta con capacidad de tratamiento de dos escalones, puede utilizar relaciones de estimación basadas en otras plantas ya construidas. El estimador realizará dos ajustes, uno para la diferencia en el coste de la construcción, debida al paso del tiempo desde que se estableció la relación, y el otro para las diferencias en el coste basadas en la localización.

Las relaciones de estimación del coste son probablemente más

utilizadas en la estimación del coste de edificios. Estas relaciones se basan normalmente en la superficie y/o el volumen. Tienen en cuenta los costes debidos a las diferencias en la mano de obra según la localización. Aquel que comience a especular sobre la construcción de una nueva vivienda siempre pensará primero en el coste por metro cuadrado.

Los costes de ingeniería de proyectos complejos se establecen en función del coste de instalación de la estructura o sistema en diseño. Estos costes se expresan como un porcentaje del coste de instalación de proyectos como edificios de oficinas y laboratorios, centrales eléctricas, sistemas de tratamiento de aguas, y plantas químicas. En cada caso, el coste de ingeniería es un porcentaje decreciente a medida que aumenta el coste de instalación del proyecto.

3.5. El buen juicio en la estimación

Se discute con frecuencia la importancia del buen juicio como ingrediente esencial del proceso de estimación. Aunque su necesidad es evidente, un problema que se solía presentar era el de excesiva confianza en el buen juicio y escasa en los métodos analíticos.

Ya que la aplicación del buen sentido implica a las personas, surge el problema del sesgo personal. El puesto o función asignado a una persona parece influir en sus previsiones. De esta forma, aparece una tendencia a la baja en las estimaciones de aquellos a cuyos intereses sirven, principalmente los proponentes de un nuevo producto, estructura o sistema. Similarmente, las estimaciones realizadas por personas cuyos intereses son servidos más cautamente, tienden a ser más altas de lo que serían de otra forma.

El uso principal del buen juicio debe ser para decidir si puede usarse o no una relación de estimación. Después, el buen juicio debe

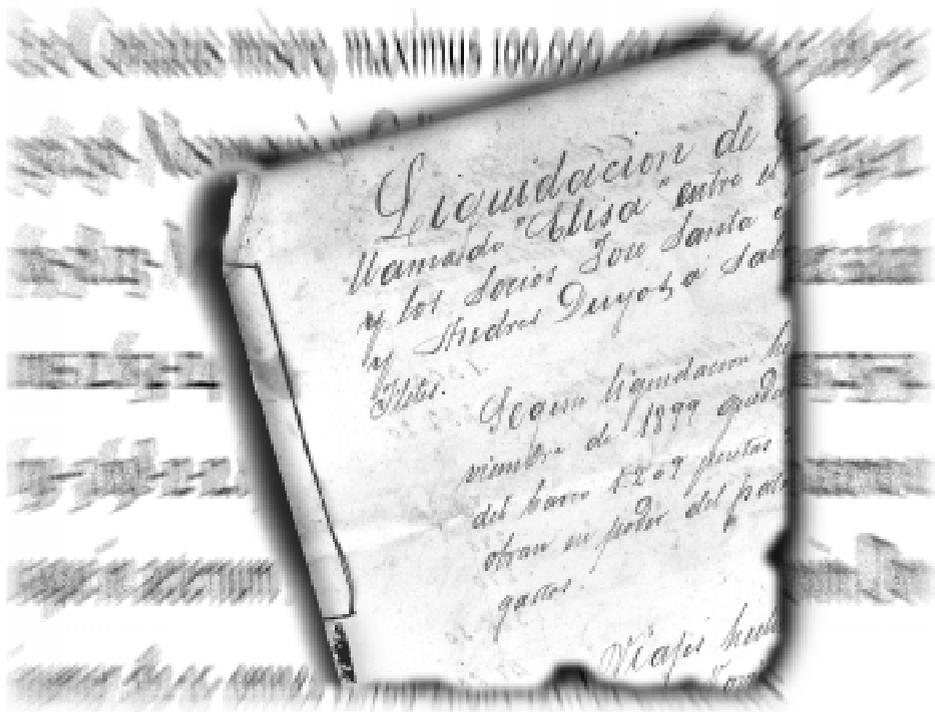
determinar qué ajustes serán necesarios para tener en cuenta el efecto de una tecnología que no está presente en la muestra. También es necesario para decidir si los resultados obtenidos a partir de una relación de estimación son razonables o no, en comparación con el coste de elementos similares en el pasado.

Cuando un proyecto propuesto tiene una incertidumbre considerable, a menudo es acertado mantener en un mínimo la inversión de capital en equipos hasta que los resultados estén más claros, a pesar de que tal decisión pueda dar lugar a costes de mantenimiento y operación más elevados para el sistema actual. Tal acción conduce a una decisión de incurrir en costes más elevados temporalmente para reservarse el privilegio de tomar una segunda decisión cuando la situación sea más clara.

La precisión de las estimaciones con respecto a los acontecimientos del futuro es, hasta cierto punto, inversamente proporcional al intervalo de tiempo entre la estimación y el acontecimiento. A menudo es apropiado incurrir en gastos para tener el privilegio de aplazar la decisión hasta que puedan realizarse estimaciones mejores.

4

Conceptos de coste-efectividad



La aplicación de los conceptos y métodos del cálculo del coste del ciclo de vida durante el diseño y desarrollo del producto o sistema, se hace mediante la realización del análisis del coste del ciclo de vida (Life-Cycle Cost Analysis, LCCA). El análisis del coste del ciclo de vida puede definirse como un proceso analítico sistemático de evaluación de distintos diseños (o vías alternativas de acción) con el objetivo de escoger la mejor forma de emplear recursos escasos. Para lograrlo se exige la aplicación de varios conceptos básicos y metodologías de evaluación. Algunos de ellos se presentan en este capítulo. Otros pueden encontrarse en los Apéndices y en las Referencias, especialmente en [3, 6, 7].

4.1. Objetivos del análisis del coste

El decisor puede tener que considerar muchas cuestiones. Puede haber un único objetivo global del análisis (por ejemplo, diseño con el mínimo coste del ciclo de vida) y cualquier número de sub-objetivos. Pero la pregunta principal debe ser siempre: ¿cuál es la finalidad del análisis del coste, y qué debe averiguarse mediante el trabajo de análisis y de evaluación?

En muchos casos, la naturaleza del problema parece ser obvia, mientras que su precisa definición puede ser la parte más difícil de todo el proceso. El problema del diseño debe definirse clara y precisamente, y presentarse de tal manera que lo puedan comprender fácilmente todos

los implicados. De otra manera, es dudoso que tenga sentido cualquier tipo de análisis. El analista debe tener cuidado para asegurar que se establecen objetivos realistas al principio del proceso, y de que estos objetivos permanecen a la vista según se desarrolla el proceso.

Cuando existe una solución alternativa factible para un problema específico y se necesita una decisión para la selección de la solución preferible, debe seguirse un proceso de análisis formal. El analista debe definir específicamente la necesidad del análisis, establecer el método a seguir, generar la información apropiada de cada alternativa considerada, evaluar cada alternativa y recomendar una solución propuesta que responda al problema.

4.2. Líneas maestras y limitaciones del análisis

Después de la definición del problema y de sus objetivos, el análisis del coste debe definir las líneas maestras y las restricciones (o limitaciones) dentro de las que debe completarse. Las primeras se establecen a partir de la información relativa a factores tales como los recursos disponibles para llevar a cabo el análisis (por ejemplo, la experiencia laboral necesaria, la disponibilidad del «software» adecuado, etc.), el programa de calendario para la realización del análisis y/o la política o dirección de gestión correspondientes, en lo que puedan afectar al análisis.

En algunas ocasiones, el decisor o gestor puede que no comprenda completamente el problema o el proceso del análisis, y ordene que se realicen ciertas tareas de una forma, o en un intervalo de tiempo que no sea compatible con los objetivos del análisis. En otras ocasiones, un gestor puede tener una idea preconcebida sobre la consecuencia de una determinada decisión e imponer que el análisis apoye esa decisión. Además, pueden existir factores externos restrictivos que condicionen la validez del análisis. En tales casos, el analista de costes debe esforzarse en aliviar el problema enseñando al gestor.

Si queda algún problema sin resolver, el analista del coste debe documentarlo y relacionar sus efectos con los resultados del análisis.

Con referencia a las características técnicas de un sistema o producto, el resultado del análisis puede verse restringido por condiciones de contorno (o límites) establecidas por la definición de los factores de prestaciones del sistema, de los requisitos operativos o del concepto de mantenimiento así como de la planificación del programa. Por ejemplo, puede existir un requisito de peso máximo para un producto dado, un requisito de mínima fiabilidad, admitirse un valor máximo para el coste unitario de producción, un valor mínimo para la capacidad nominal, etc. Estas condiciones de contorno o limitaciones, deben determinar soluciones de compromiso al evaluar alternativas. Los candidatos que caigan fuera de esas limitaciones no son admisibles.

4.3. Identificación de alternativas

Dentro de las limitaciones establecidas puede haber una gran cantidad de métodos que conduzcan a una posible solución de diseño. Deben considerarse todas las alternativas factibles, seleccionando los candidatos más probables para una posterior evaluación.

Deben proponerse alternativas para su análisis, incluso aunque parezca que exista poca probabilidad de que lleguen a ser factibles. Esto hay que realizarlo con la idea de que es mejor considerar demasiadas alternativas que pasar por alto una que pueda ser muy buena. Las alternativas no consideradas no podrán llegar a adoptarse, por muy deseables que demuestren después parecer.

4.4. Aplicación de la estructura de desglose del coste

La aplicación de la estructura de desglose del coste es uno de los pasos más importantes en el cálculo del coste del ciclo de vida. La

CBS constituye la armazón para definir las categorías del coste del ciclo de vida y proporciona la vía de comunicación para informes de coste, análisis, y control último del coste.

Durante el desarrollo de la CBS se necesita proceder hasta la profundidad exigida a fin de suministrar la información necesaria para una evaluación fidedigna y válida del coste del ciclo de vida del sistema o producto, para identificar los elementos determinantes de costes elevados y permitir la investigación de las relaciones entre causa y efecto, y para poner de manifiesto los distintos parámetros del coste y su aplicación en el análisis. Se requiere identificar la relación entre la característica determinante del coste del ciclo de vida a nivel del sistema, con el factor específico que se aplica como entrada.

4.5. Aplicación del modelo de flujo monetario

El modelo de flujo monetario es fundamental dentro del campo de la economía aplicada a la ingeniería. Este aspecto de la economía ha estado siempre asociado con el tiempo; el valor del dinero en el momento considerado, los ingresos y desembolsos a lo largo del tiempo, etc. El «modelo» central de esa disciplina es el diagrama de flujo monetario, representación de las estimaciones de ingresos y desembolsos a lo largo del tiempo, como se muestra en el Apéndice A [6, 7].

El ciclo de vida del producto o sistema es el generador del flujo monetario subyacente. Cubre tanto las fases de adquisición como las de uso, como se muestra en la Figura 13 para una situación hipotética. La representación de la forma general del flujo monetario durante el ciclo de vida es sencilla para la obtención mediante compra (Figura 13 apartado a). En este ejemplo, la obtención ocurre instantáneamente, con F_0 como coste de adquisición o inversión inicial. Los beneficios o ingresos netos se obtienen al final de cada año durante ocho años, de F_1 a F_8 . Si hay algún valor o coste residual se incluye en el F_8 .

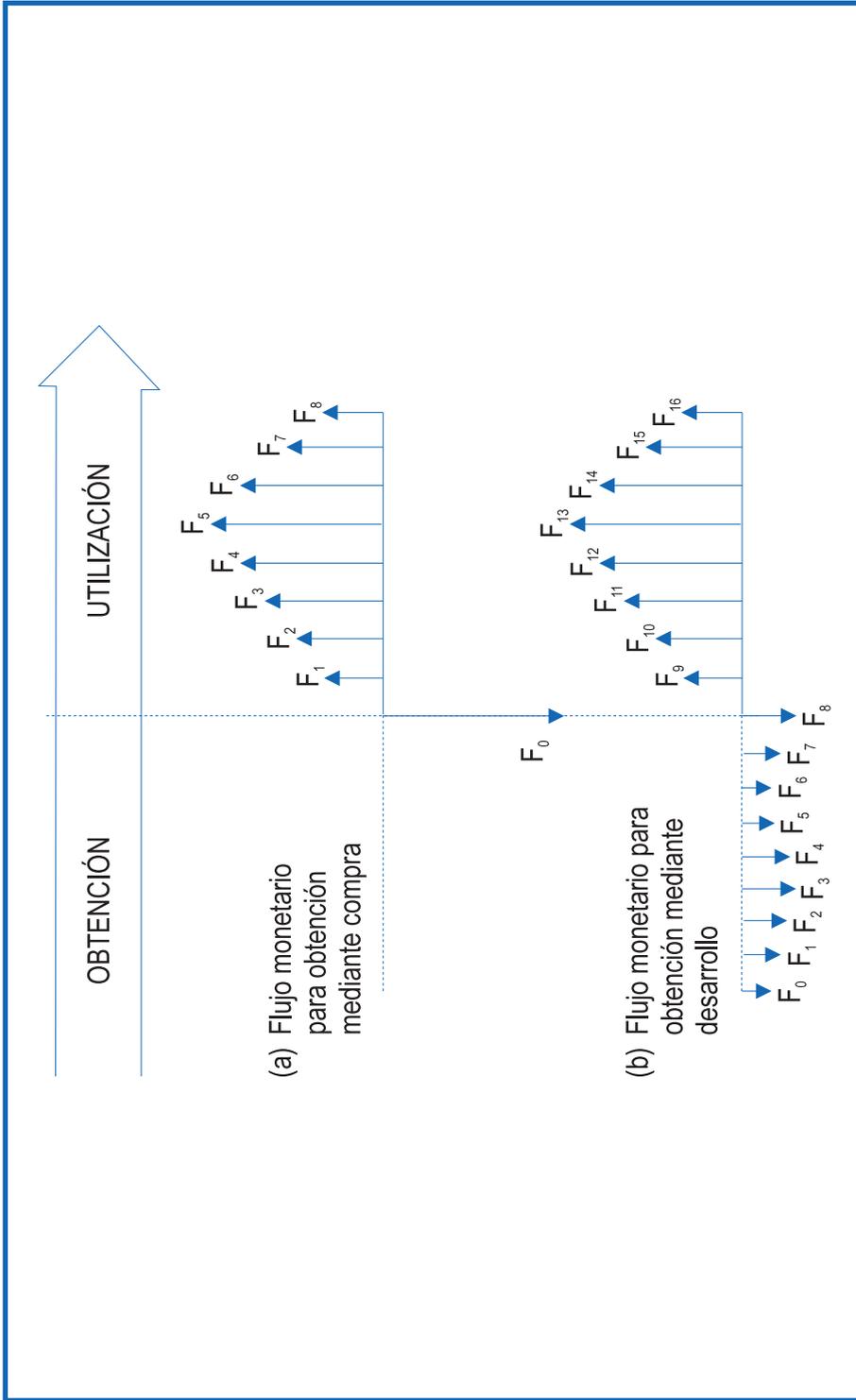


Figura 13 - FORMAS GENERALES DEL FLUJO MONETARIO -

La representación de la forma general del flujo monetario es más compleja cuando la obtención exige gastos para el diseño y el desarrollo (Figura 13 apartado b). En esta situación hipotética, la obtención se extiende durante un cierto número de años, con gastos representados de F_0 a F_8 (de F_1 a F_3 para el diseño conceptual y preliminar, de F_4 a F_6 para el diseño detallado y desarrollo, y de F_7 a F_8 para la producción y/o construcción). Los beneficios o ingresos netos se producen al final de cada año a lo largo de ocho años, de F_9 a F_{16} . Si hay algún valor o coste residual se incluye en el F_{16} .

Se necesita una comprensión más profunda de la «causa y efecto» que asocia las actividades de inversión de la fase de obtención con los beneficios de la fase de uso, como se presenta en la Figura 13 apartado b. El problema del «acoplamiento» que se muestra en la Figura 13 apartado a, relativamente más simple, también necesita un estudio posterior.

Las expresiones algebraicas del valor actual equivalente (Present Equivalent, PE), del valor anual equivalente (Annual Equivalent, AE) y del valor futuro equivalente (Future Equivalent, FE), así como las expresiones de la tasa de rentabilidad y del período de amortización son bien conocidas en el campo de la economía aplicada a la ingeniería. En el Apéndice A se presenta una explicación de la equivalencia, así como las fórmulas de cálculo de intereses que se aplican. Se puede representar una función general de la equivalencia económica de la siguiente forma:

$$PE, AE, \text{ o } FE = f(F_t, i, n) \quad (4.1)$$

Las cantidades PE, AE y FE pueden servir como bases consistentes para la evaluación de una única alternativa, o para la comparación de alternativas mutuamente exclusivas. En el Apéndice B se presentan el significado y la aplicabilidad de estos métodos de comparación de alternativas. Puede usarse cualquiera de ellos, de acuerdo con la función general de equivalencia económica dada en

la ecuación (4.1). En el Capítulo 5 se presenta un ejemplo de su aplicación.

4.6. Evaluación de las alternativas de diseño del sistema

La evaluación del diseño por medio del coste del ciclo de vida y de la efectividad del sistema puede facilitarse adoptando el método basado en parámetros dependientes del diseño. Este método es una forma matemática de relacionar las acciones de diseño con los resultados operativos. Utiliza la función de evaluación de diseño

$$E = f(X; Y_d, Y_i) \quad (4.2)$$

donde se aplican las definiciones de los siguientes términos:

- E = una medida de evaluación completa del ciclo de vida (normalmente el coste equivalente del ciclo de vida; PE, AE o FE)
- X = variables de diseño (por ejemplo, número de unidades desplegadas, edad de retirada, canales de reparación, empuje nominal, grosor del blindaje, etc.)
- Y_d = parámetros dependientes del diseño (por ejemplo, peso, capacidad, fiabilidad, vida de diseño, producibilidad, mantenibilidad, etc.)
- Y_i = parámetros independientes del diseño (por ejemplo, coste de la energía, precio del dinero, tasas de producción, coste unitario del material, penalización por penuria, etc.)

Esta función de evaluación del diseño, junto con sus parámetros dependientes e independientes, facilita la optimización del diseño. Suministra la base para la aclaración de la diferencia entre las alternativas (miembros del espacio de diseño) y la optimización (un aspecto del espacio de búsqueda). En el Capítulo 5 se presentará un ejemplo de su aplicación.

4.7. Consideración de criterios múltiples

La efectividad es una medida del cumplimiento de la misión de un producto o sistema respecto de una necesidad especificada. El cumplimiento de la misión puede expresarse mediante una o más características importantes, dependiendo del tipo de producto o sistema y de los objetivos a alcanzar. Algunas medidas comunes de efectividad se muestran en la parte derecha de la Figura 1.

En los análisis económicos del ciclo de vida del diseño surge la consideración de criterios múltiples, cuando se presentan simultáneamente en la evaluación elementos económicos y no económicos. En consecuencia, la evaluación del diseño en términos de coste del ciclo de vida y de la efectividad del sistema es un área que necesita una atención cuidadosa por parte de los ingenieros de sistemas, al tratar de satisfacer las necesidades de los clientes. En esta situación, puede ser de gran ayuda una representación gráfica de la evaluación de la decisión que muestre tanto las medidas del coste como de la efectividad. En la Figura 14 se ilustra una representación gráfica de carácter general de este tipo de evaluación.

Se pueden presentar simultáneamente el coste del ciclo de vida, mostrado en la parte izquierda de la Figura 1, y una o más medidas de la efectividad, como ayuda para la toma de decisiones. La representación gráfica de la evaluación de decisiones es un buen método. Nótese que en el gráfico se muestran los requisitos o umbrales de la efectividad, que son útiles para el cliente o para la persona que toma las decisiones, a fin de evaluar subjetivamente el grado en que cada alternativa satisface los criterios de efectividad y las restricciones de diseño.

El coste equivalente del ciclo de vida, representado en el eje horizontal, es una medida objetiva. Se busca seleccionar la alternativa de mínimo coste del ciclo de vida que satisfaga la mayoría de las medidas de efectividad. Habrá que realizar una labor de investigación

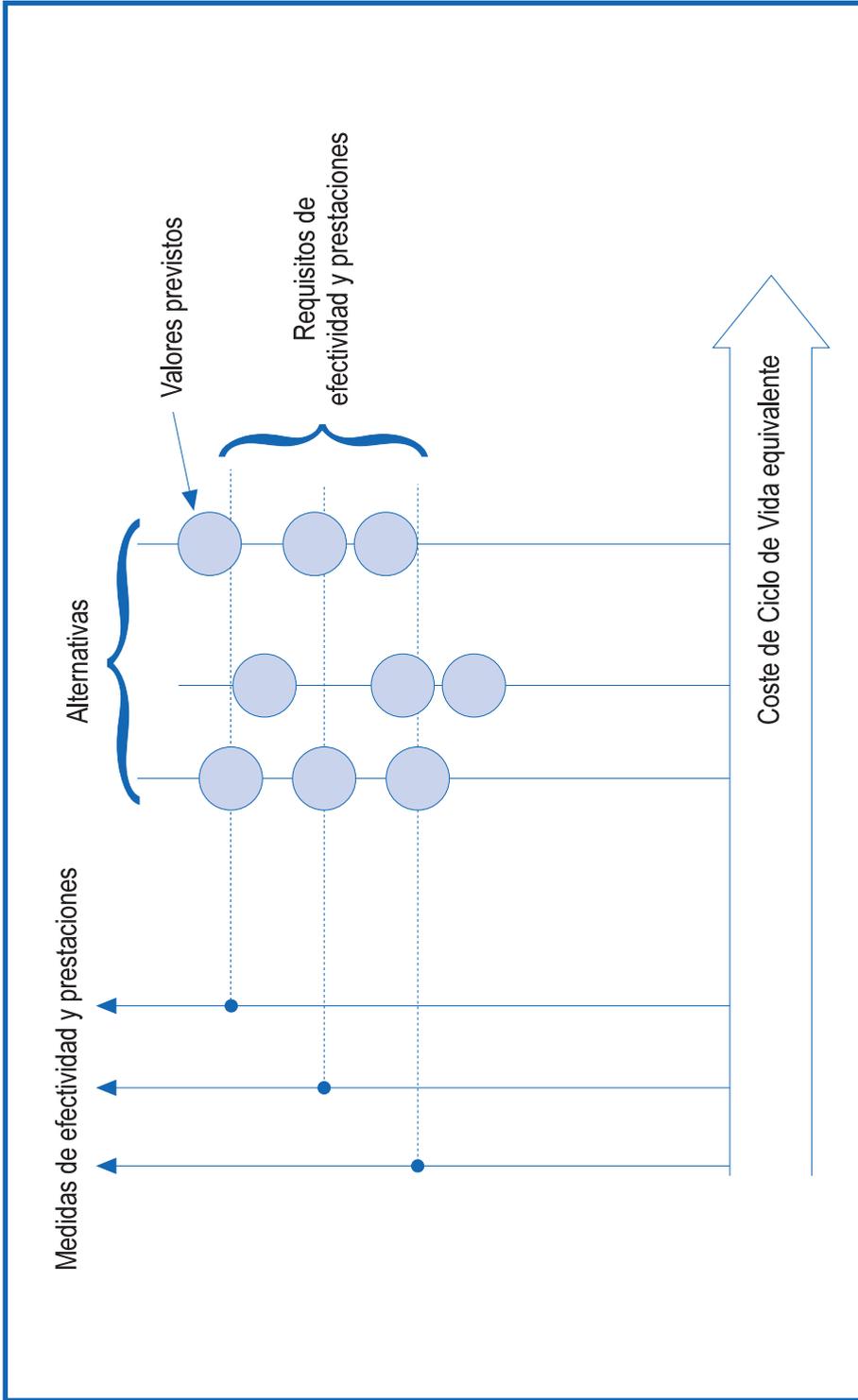


Figura 14 - UNA REPRESENTACIÓN GRÁFICA GENERAL DE LA EVALUACIÓN DEL DISEÑO -

para encontrar métodos basados en las preferencias y la utilidad, que combinen en una misma medida del valor del diseño criterios económicos y no económicos del ciclo de vida. Sin embargo, para la mayoría de las situaciones puede ser adecuado un simple gráfico.

En el análisis de coste-efectividad, la parte del coste es más fácil de tratar que la parte de efectividad. Combinar el coste y la efectividad en una única medida es un reto de difícil solución. Por consiguiente, en la mayoría de las aplicaciones es recomendable el método de representación gráfica de la evaluación de decisiones.

Los modelos y elementos esenciales presentados en este capítulo engloban toda la información que se muestra en una representación gráfica de la evaluación de decisiones. En el siguiente Capítulo se ilustrará con más profundidad su aplicación mediante dos ejemplos. En el primero se mostrará una evaluación del ciclo de vida de un programa. El segundo ejemplo trata de una población de equipos reparables desplegados para satisfacer una demanda. De esta forma se ilustrará la modelización económica y la optimización para la evaluación de coste-efectividad.

5

Ejemplos de coste-efectividad

et e Contatus misere, maximus 100.000 -324- 98.154-25.210-325
 3256.256- Nos 99 5.987-254-12.
 369-58.123- M stru nca et saliab
 urus 12.654-12 57 Beatis um 15.235-54
 639--3.698-12-12.852 Prp Patre Misericordia Domini ab atero e
 usque in aeternum super eun:29.784-126-365 custodit enim Don
 inum07.582-35- omnes 12.780-22.085-125.805-diligentes



En el análisis de coste-efectividad se dispone de dos métodos generales de modelización, tal como se expresó matemáticamente con las ecuaciones (4.1) y (4.2). El primero utiliza un método de desglose de costes y de flujo monetario para tratar el coste del ciclo de vida. El segundo también produce un resultado del coste del ciclo de vida, pero está basado en un modelo económico con optimización. Casi todos los análisis de coste-efectividad corresponderán a alguno de estos dos métodos. Por ello, este Capítulo presenta un ejemplo que ilustra el método de flujo monetario y otro que ilustra el método de optimización económica.

5.1. Evaluación de alternativas usando la CBS

Un vehículo ligero actualmente en desarrollo exige la incorporación de un equipo de comunicaciones y posicionamiento basado en satélite. Se precisa una decisión que establezca el tipo de equipo que se considerará más deseable desde el punto de vista de prestaciones, disponibilidad y coste del ciclo de vida. Las limitaciones de presupuesto exigen que el coste de desarrollo y producción (a lo largo de los primeros tres años del programa) no exceda de 3.000.000 de dólares.

La revisión de diversas fuentes de suministro indica que existen dos configuraciones de diseño que parecen alcanzar los requisitos de prestaciones y disponibilidad especificados (basados en los datos

preliminares del diseño). El objetivo es evaluar cada configuración a través de su coste del ciclo de vida y recomendar la configuración preferida.

Los requisitos establecidos para el vehículo y la electrónica incluyen los siguientes: el sistema permitirá la comunicación con otros vehículos en un radio de 200 millas, con aviones que vuelen en la zona a una altura de 10.000 pies, y con una instalación central de comunicaciones de área. El sistema debe tener un tiempo medio entre fallos (MTBF) de al menos 450 horas, un tiempo medio de mantenimiento correctivo (Mct) de 30 minutos, y un requisito de horas de trabajo de mantenimiento por hora operativa (MLH/OH) de 0,2. El plan operativo y de mantenimiento se ilustra en la Figura 15.

La planificación del programa indica que la dotación completa de vehículos debe estar en servicio cinco años después del comienzo del programa y que debe mantenerse este potencial hasta finalizar el año duodécimo. Los costes de investigación y desarrollo y los costes de inversión (o producción) se determinan a partir de las estimaciones del coste de ingeniería y producción preparadas por los proveedores respectivos. Los costes de operación y mantenimiento tienen también una base proporcionada por los informes de predicción de fiabilidad y mantenibilidad, y por los resultados del análisis de apoyo logístico. En la Figura 16 aparecen los hitos significativos del programa y el número previsto de unidades en uso operativo.

5.1.1. Análisis del coste del ciclo de vida

Una vez definido el problema (o la necesidad) y disponiendo de una descripción de los requisitos del sistema y del concepto de mantenimiento, procede ahora abordar los pasos específicos comprendidos en el análisis de coste del ciclo de vida para las configuraciones alternativas propuestas. En este apartado se presentan estos pasos que desembocan en la generación de los datos de coste.

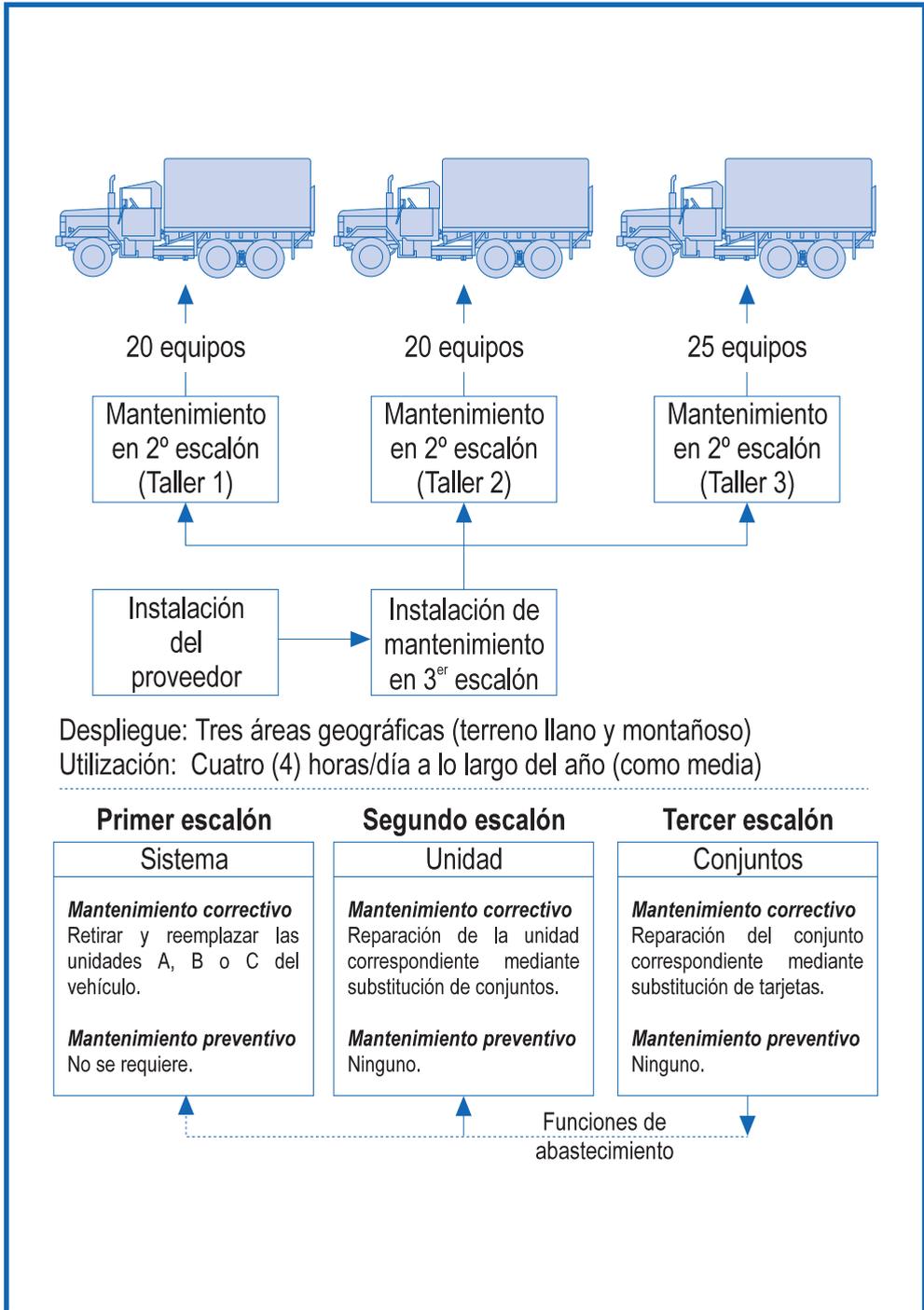


Figura 15 - SISTEMA OPERATIVO Y PLAN DE MANTENIMIENTO -

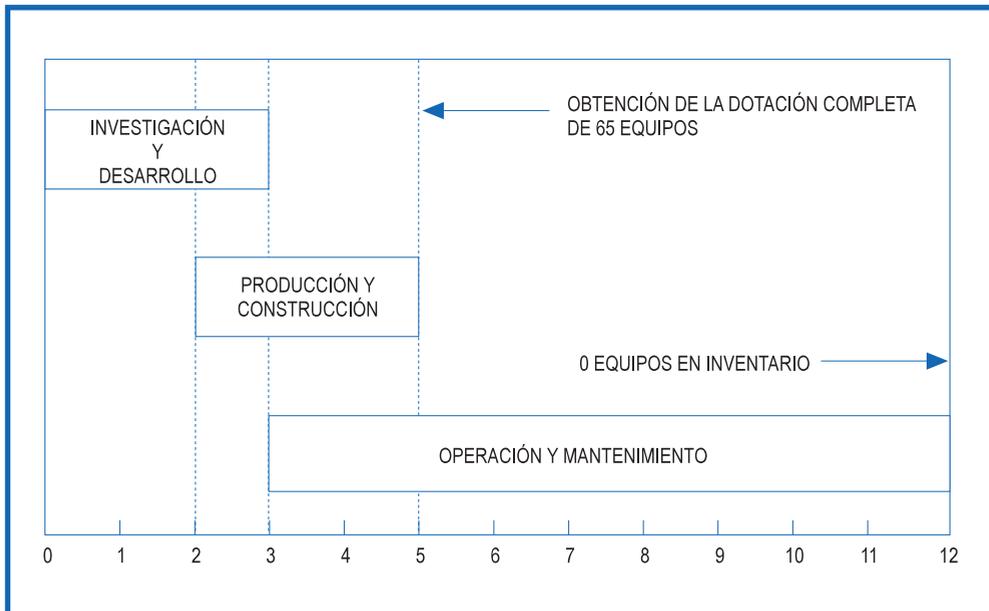


Figura 16 - PLAN DE PROGRAMA Y PERFIL DEL SISTEMA -

Nótese que en la Tabla 5 se toman como cantidades negativas los ingresos producidos, considerando como compensaciones del coste los resultados de la liquidación final del material.

El coste actual equivalente para la configuración A es

$$\begin{aligned}
 PE &= \$507.374 (0,9091) + \$794.604 (0,8265) + \\
 &+ \Lambda + \$109.188 (0,3186) = \$5.221.813
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

Para la configuración B, el coste actual equivalente es

$$\begin{aligned}
 PE &= \$434.294 (0,9091) + \$707.409 (0,8265) + \\
 &+ \Lambda + \$167.294 (0,3186) = \$5.505.398
 \end{aligned}
 \tag{5.2}$$

Es preferible la configuración A basándose en el coste total del ciclo de vida. En la Figura 17 se muestran los perfiles de coste para las

ACTIVIDAD DEL PROGRAMA	DESIGNACIÓN CATEGORÍA DE COSTE	COSTE POR AÑO DEL PROGRAMA (DÓLARES)					
		1	2	3	4	5	6
A. Alternativa A							
1. Investigación y desarrollo	C _R	507.374	529.733	718.088			
2. Producción y construcción	C _P		264.871	935.441	1.023.769	973.311	
3. Operación y mantenimiento	C _O			79.203	207.098	348.248	365.660
4. Retirada y eliminación	C _D						
Coste real total	C	507.374	794.604	1.732.732	1.230.867	1.321.559	365.660
Coste total equivalente actual	C (10%)	461.254	656.740	1.301.802	840.682	820.556	206.415
Coste acumulado equivalente actual		461.254	1.117.994	2.419.796	3.260.478	4.081.034	4.287.449
B. Alternativa B							
1. Investigación y desarrollo	C _R	434.294	408.019	597.719			
2. Producción y construcción	C _P		299.390	935.369	1.038.426	1.039.451	
3. Operación y mantenimiento	C _O			102.888	238.383	400.827	520.870
4. Retirada y eliminación	C _D						
Coste real total	C	434.294	707.409	1.635.976	1.276.809	1.440.278	520.870
Coste total equivalente actual	C (10%)	394.817	584.674	1.229.109	872.061	894.269	294.031
Coste acumulado equivalente actual		394.817	979.491	2.208.600	3.080.661	3.974.930	4.268.961

Tabla 5 - COSTE POR AÑO DEL PROGRAMA -

ACTIVIDAD DEL PROGRAMA	DESIGNACIÓN CATEGORÍA DE COSTE	COSTE POR AÑO DEL PROGRAMA (DÓLARES)						Coste total real (dólares)
		7	8	9	10	11	12	
A. Alternativa A								
1. Investigación y desarrollo	C _R							1.755.195
2. Producción y construcción	C _P							3.197.392
3. Operación y mantenimiento	C _O	383.945	403.122	423.297	444.466	466.685	159.288	3.281.012
4. Retirada y eliminación	C _D						-50.100	-50.100
Coste real total	C	383.945	403.122	423.297	444.466	466.685	109.188	8.200.169
Coste total equivalente actual	C (10%)	197.041	188.056	179.520	171.386	163.573	34.788	5.221.813
Coste acumulado equivalente actual		4.484.490	4.672.546	4.852.066	5.023.452	5.187.025	5.221.813	5.221.813
B. Alternativa B								
1. Investigación y desarrollo	C _R							1.440.032
2. Producción y construcción	C _P							3.312.636
3. Operación y mantenimiento	C _O	541.916	563.985	587.206	521.575	547.144	190.394	4.215.188
4. Retirada y eliminación	C _D						-23.100	-23.100
Coste real total	C	541.916	563.985	587.206	521.575	547.144	167.294	8.944.756
Coste total equivalente actual	C (10%)	278.111	263.099	249.034	201.119	191.774	53.300	5.505.400
Coste acumulado equivalente actual		4.547.072	4.810.171	5.059.205	5.260.324	5.452.098	5.505.398	5.505.398

Tabla 5 - COSTE POR AÑO DEL PROGRAMA (Continuación) -

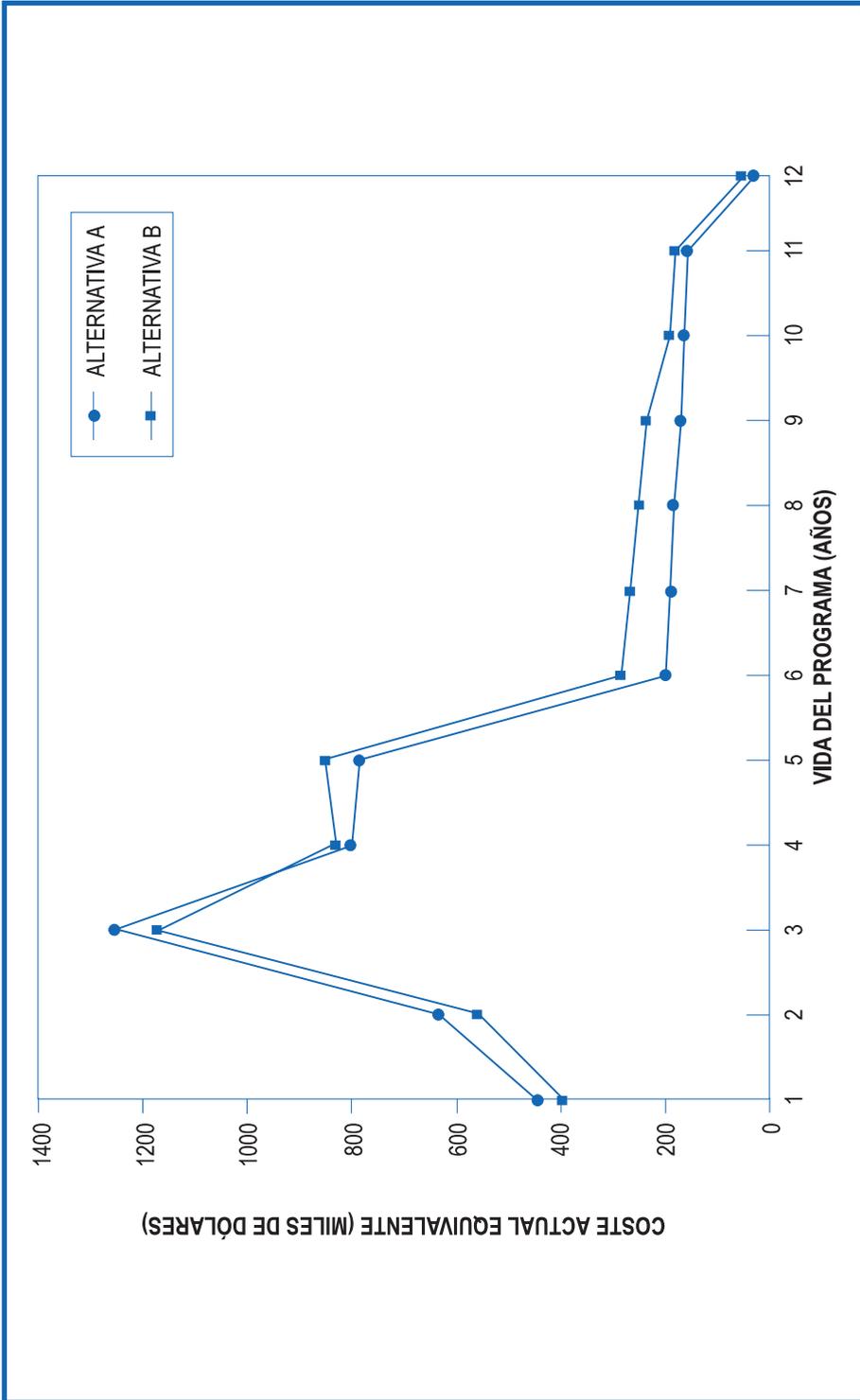


Figura 17 - PERFILES DE COSTE PARA LAS CONFIGURACIONES A Y B -

configuraciones A y B. Sin embargo, antes de la decisión final se debe llevar a cabo un análisis del momento en que se produce la equivalencia, a fin de determinar el instante en que la configuración A se hace más económica que la configuración B. La Figura 18 muestra que el punto de cambio de la decisión se presenta a los seis años.

5.1.2. Desarrollo de la estructura de desglose de costes

En la Figura 4 se mostró una estructura de desglose de costes. Aunque no todas las categorías de costes pueden ser significativas, esta CBS sirve como un buen punto de partida. Se requiere la evaluación de dos alternativas de configuraciones de equipo y la selección de una solución preferible. El analista debe considerar los siguientes pasos para realizar el análisis de coste del ciclo de vida:

1. Identificar todas las actividades previstas en el programa que produzcan costes a lo largo de del ciclo de vida para cada una de las alternativas.
2. Relacionar cada actividad identificada con una categoría específica de coste en la CBS. Cada actividad debe incluirse en una o más categorías.
3. Introducir los datos de costes para cada actividad aplicable identificada y anotar los resultados.

5.1.3. Evaluación de alternativas

En la Tabla 6 se presenta un desglose del coste del ciclo de vida, con los valores actuales correspondientes al año del programa. Nótese que el coste de adquisición (investigación y desarrollo, e inversión) es mayor para la configuración A, lo que se debe a tener un mejor diseño que utiliza componentes más fiables. El coste de operación

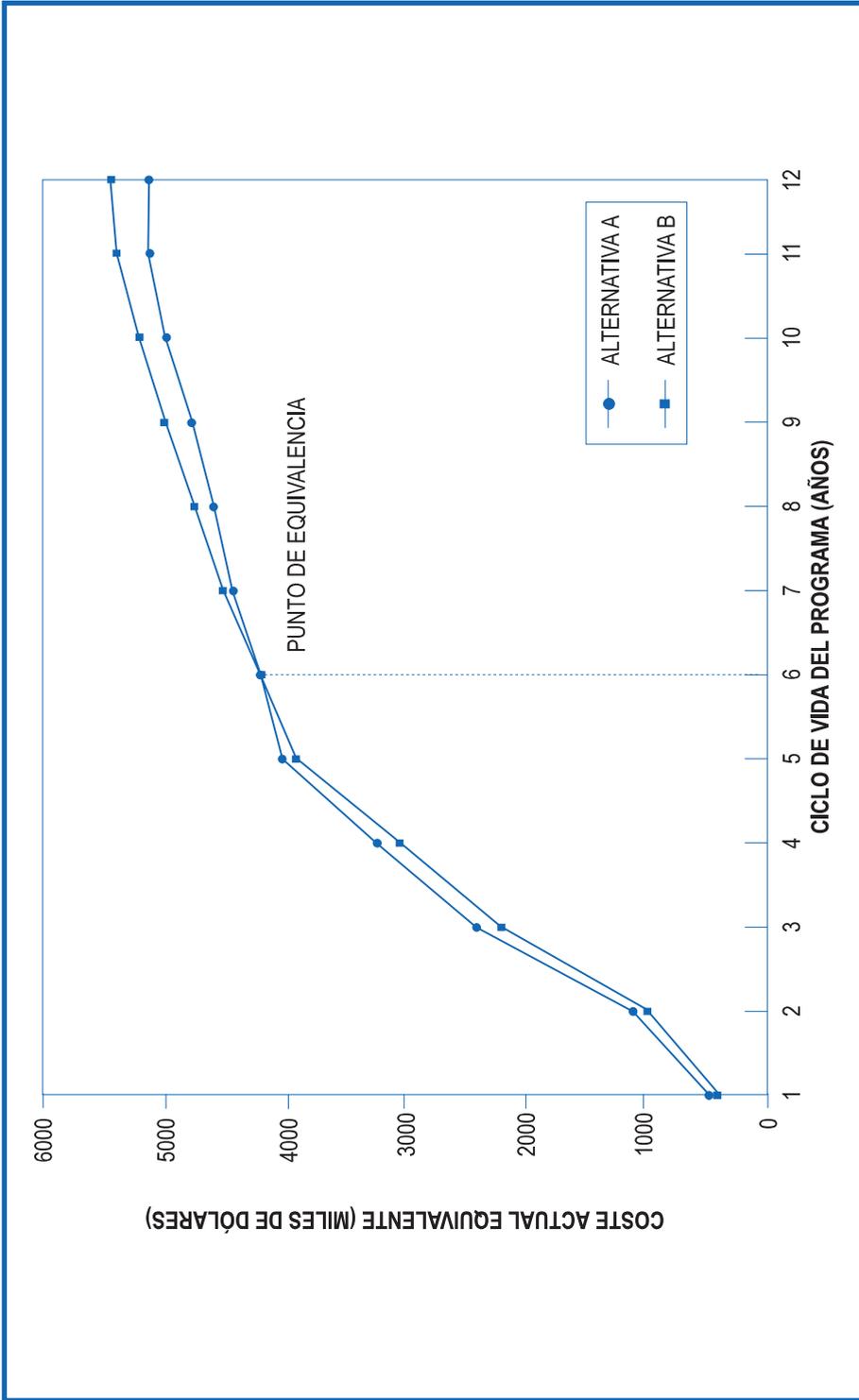


Figura 18 - ANÁLISIS DE EQUIVALENCIA ENTRE LAS CONFIGURACIONES A Y B -

CATEGORÍA DE COSTE	Alternativa A		Alternativa B	
	Coste actual equivalente	Porcentaje total	Coste actual equivalente	Porcentaje total
1. Investigación y desarrollo (C_R).				
a) Gestión del sistema/producto.	\$ 573.982	10,99	\$ 550.300	9,99
b) Planificación del producto.	150.000	2,87	41.500	0,75
c) Diseño de ingeniería.	532.126	10,19	456.789	8,29
d) Pruebas y evaluación.	90.372	1,73	45.455	0,82
e) Datos de diseño.	92.095	1,70	87.067	1,58
SUBTOTAL	1.438.575	27,48	1.181.111	21,53
2. Producción y construcción (C_P).				
a) Gestión del sistema/producto.	\$ 673.982	12,90	\$ 650.300	11,80
b) Análisis de operaciones.	350.000	6,70	341.500	6,20
c) Fabricación.	532.126	10,10	486.789	8,84
d) Construcción.	490.362	9,30	545.455	9,90
e) Control de calidad.	158.800	3,04	280.787	5,10
SUBTOTAL	2.225.300	42,04	2.304.831	41,82
3. Operación y apoyo (C_o).				
a) Personal de operación.	\$ 373.982	7,16	\$ 450.300	8,17
b) Transporte-distribución.	150.000	2,87	141.500	2,57
c) Mantenimiento no programado.	932.126	17,85	986.789	17,92
d) Abastecimiento.	90.372	1,73	345.455	6,27
e) Equipo de prueba y apoyo.				
- Repuestos.	17.535	0,33	80.086	1,45
- Calibración.	45.000	0,86	22.688	0,41
SUBTOTAL	1.573.901	30,80	2.026.818	36,79
4. Retirada y eliminación (C_b).				
a) Valor residual.	-15.963	-0,305	-7360	-0,13
SUBTOTAL	-15.963	-0,305	-7360	-0,13
GRAN TOTAL	5.221.813	100,00	5.505.400	100,00

Tabla 6 - ESTRUCTURA DE DESGLOSE DE COSTE -

y mantenimiento es mayor para la configuración B. El problema es seleccionar la mejor de las dos alternativas según el valor actual equivalente del total del coste del ciclo de vida.

Cuando se evalúan dos o más alternativas según una base relativa, se deben reducir las estimaciones de costes futuros de cada alternativa a sus valores actuales equivalentes. En la Tabla 6 se presentan los costes actuales equivalentes de las configuraciones A y B.

Mediante la consulta de la Tabla 6, el analista puede seleccionar fácilmente las partidas de alto coste (aquellas que contribuyen con más del 10 % del coste total). Esas son las áreas en que se impone un análisis más refinado y en que se necesita un mayor énfasis en proporcionar datos válidos. Por ejemplo, los costes de mantenimiento no programado contribuyen con el 17,85% del coste total de la configuración A. Estos elementos de alto coste exigen una evaluación del diseño en lo que se refiere al impacto en repuestos y personal de apoyo; de los métodos de predicción utilizados para determinar las frecuencias de mantenimiento y los requisitos de inventarios; del modelo analítico que asegura que se han establecido las adecuadas relaciones entre parámetros; y de los factores de costes tales como los costes laborales, los costes de repuestos, los costes de gestión de inventario, etc.

5.2. Evaluación de alternativas mediante optimización económica

Esta Sección presenta la optimización económica de la evaluación de coste-efectividad del ciclo de vida de distintas alternativas de fiabilidad y mantenibilidad para sistemas constituidos por equipos reparables (Repairable Equipment Population Systems, REPS). Muchas situaciones de coste del ciclo de vida encajan en la metodología de optimización económica.

Consideremos el siguiente ejemplo: se necesita constituir y

mantener una población finita de equipos reparables para satisfacer una demanda. A medida que las unidades fallan o se vuelven inservibles, se reparan y se vuelven a poner en servicio. Al envejecer, las unidades más antiguas se retiran del sistema y se sustituyen por unidades nuevas. El problema de diseño del sistema consiste en determinar el tamaño de la población, la edad de sustitución de las unidades, el número de canales de reparación, el tiempo medio entre fallos (MTBF) de diseño, y el tiempo medio de reparación (MTTR) de diseño, a fin de satisfacer los requisitos del diseño con un mínimo coste del ciclo de vida.

5.2.1. *Esquema y características de un REPS*

En la Figura 19 se muestra un esquema general de un REPS. En muchas instalaciones existen sistemas de equipos reparables. Tanto las compañías aéreas como las fuerzas armadas operan y mantienen los aviones de acuerdo con las características de los REPS. En el tráfico terrestre, vehículos tales como automóviles de alquiler, taxis y camiones comerciales forman sistemas de elementos reparables. Los tipos de equipos de producción como autoclaves, prensas taladradoras o telares son conjuntos de equipos que encajan en la clasificación de reparable. Pero el artículo reparable puede ser asimismo un conjunto de componentes de esos elementos de orden superior mencionados. Por ejemplo, las bombas hidráulicas de los aviones, los arrancadores y alternadores de los automóviles, los motores de los camiones, los motores eléctricos y los controladores electrónicos también constituyen sistemas de conjuntos de equipos reparables.

El sistema de equipos reparables mostrado en la Figura 19 se diseña y despliega para satisfacer una demanda. Las unidades del sistema se encuentran, bien en funcionamiento y disponibles para satisfacer la demanda o bien fuera de servicio y por ello no disponibles para satisfacerla. Se supone que las unidades no se descartan cuando fallan, sino que se reparan y se vuelven a poner en funcionamiento. A

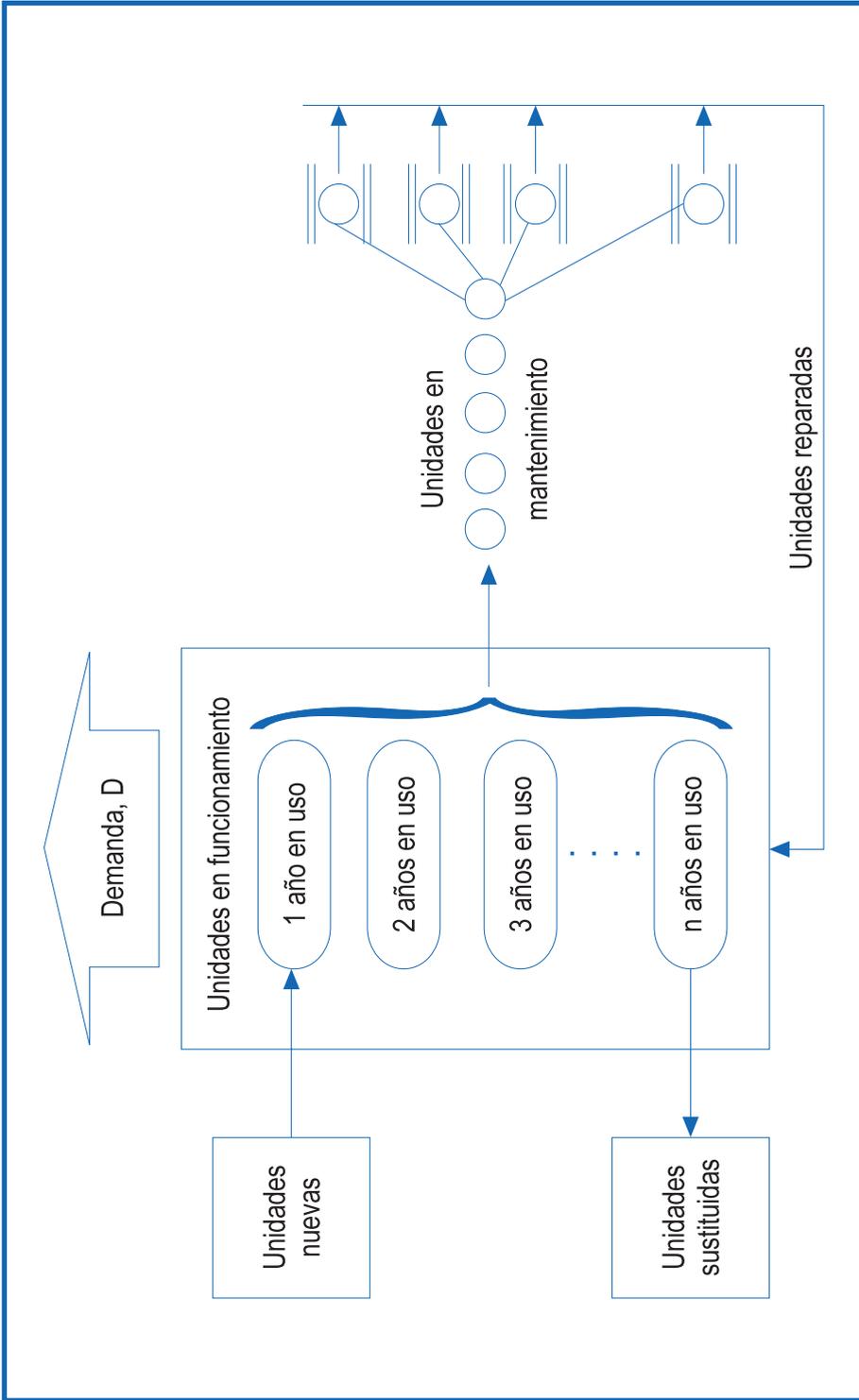


Figura 19 - SISTEMA DE CONJUNTOS DE EQUIPOS REPARABLES -

medida que las unidades envejecen, se vuelven menos fiables y aumentan sus costes de mantenimiento. Por consiguiente, es importante determinar la edad óptima de retiro. Se supone que el número de unidades nuevas adquiridas cada año es constante y que el número de unidades en cada grupo de edad es igual al cociente entre el número total necesario y el número deseado de grupos de edad. Aunque el análisis trata sobre el ciclo de vida de las unidades, el objetivo es optimizar el sistema total de que forman parte las unidades.

5.2.2. *Formulación de la función de evaluación de un REPS*

Mediante el uso de la ecuación (4.2) puede deducirse una función de evaluación del diseño de un sistema REPS. Esta función consolida el coste anual equivalente del ciclo de vida como la medida de evaluación expresada por

$$\text{AELCC} = \text{PC} + \text{OC} + \text{RC} + \text{SC} \quad (5.3)$$

donde:

- AELCC = coste anual equivalente del ciclo de vida.
- PC = coste anual equivalente de la población de equipos.
- OC = coste operativo anual.
- RC = coste anual de las instalaciones de reparación.
- SC = coste anual de penalización por penuria.

Las explicaciones de estas categorías de costes se dan en los párrafos siguientes.

Coste anual equivalente de la población. El coste anual equivalente del despliegue de una población de N unidades de equipo es

$$\text{PC} = C_i N \quad (5.4)$$

donde:

$$C_i = P_{(A/P,i,n)} - B_{(A/F,i,n)} \quad (5.5)$$

con los factores A/P y A/F tal como se definen en el Apéndice A.

El valor contable B en la Ecuación 5.5 se usa para representar el valor original de una unidad, menos la depreciación acumulada en cualquier momento del tiempo. La depreciación de una unidad a lo largo de su vida, establecida mediante el método de la línea recta, da una expresión para el valor de la unidad

$$B = P - n \left(\frac{P - F}{L} \right) \quad (5.6)$$

donde:

- C_i = coste unitario anual equivalente.
- P = coste unitario inicial o de obtención.
- F = valor residual unitario estimado.
- B = valor unitario contable al final del año n .
- L = vida estimada de cada unidad.
- N = número de unidades de la población.
- n = edad de retiro de las unidades, $n > 1$.
- i = tipo de interés anual.

Coste operativo anual. El coste anual de operación de una población de N unidades desplegadas es

$$OC = (EC + LC + PMC + \text{otros})N \quad (5.7)$$

donde:

- EC = coste anual de la energía consumida.
- LC = coste anual de la mano de obra en la operación.
- PMC = coste anual del mantenimiento preventivo.

Pueden surgir otros costes operativos anuales, que incluyen

todos los costes anuales recurrentes para mantener en servicio los equipos, como el coste de almacenamiento, las primas de seguros y los impuestos.

Coste anual de las instalaciones de reparación. El coste anual de disposición de una instalación de reparación para los equipos defectuosos es

$$RC = C_r M \quad (5.8)$$

donde:

C_r = coste anual fijo y variable de reparación por canal de reparación.

M = número de canales de reparación.

Si hay varios canales de reparación para componentes con diferentes vidas estimadas, C_r es la suma de sus costes anuales. Algunos de los elementos de coste de las instalaciones de reparación que pueden incluirse son: el coste del edificio, los suministros para el mantenimiento, los equipos de pruebas, etc., expresados para cada canal. Los costes administrativos, de mano de obra de mantenimiento y otros costes indirectos se calculan por año y canal.

Coste anual de penalización por penuria. En aquellos sistemas en que la población es de pequeño volumen en comparación con la tasa de llegada se deben aplicar modelos de colas con población finita. En estos sistemas, las unidades salientes afectan significativamente a las características de la población y a las probabilidades de llegada.

En este ejemplo de sistema de equipos reparables, se supone que tanto el tiempo entre demandas de servicio de una unidad de la población como los tiempos de servicio, se distribuyen exponencialmente. Cuando el número de equipos en estado defectuoso causa una caída de la fracción de la población en estado operativo por debajo de la demanda, se incurre en un coste de insatisfacción de la demanda o

de penuria. El coste anual de penuria es el producto entre el coste de penuria por unidad demandada no satisfecha y año, y el número esperado de unidades demandadas no satisfechas, expresado como

$$SC = C_s [E(S)] \quad (5.9)$$

donde:

C_s = coste de penuria por unidad de demanda no satisfecha y año.

$E(S)$ = número esperado de unidades demandadas no satisfechas.

Se define la cantidad $N - D$ como el número de unidades adicionales que hay que mantener en la población. Para $n = 0, 1, 2, \dots, N - D$ no hay penuria de unidades. Sin embargo, cuando:

$$\begin{aligned} n &= N - D + 1, \text{ existe una penuria de 1 unidad} \\ n &= N - D + 2, \text{ existe una penuria de 2 unidades} \\ &\vdots \\ n &= N \text{ existe una penuria de } D \text{ unidades} \end{aligned} \quad (5.10)$$

El número esperado de unidades de demanda no satisfecha, $E(S)$, puede hallarse multiplicando el número de unidades de demanda no satisfecha por la probabilidad de que ello ocurra

$$E(S) = \sum_{j=1}^D j P_{(N-D+j)} \quad (5.11)$$

donde los valores de P_n se obtienen de la Sección 11.6 de Blanchard y Fabrycky, 1990 (ver también el Apéndice B de Fabrycky y Blanchard, 1991).

5.2.3. Problema I de diseño de un REPS

En este ejemplo de diseño de un REPS, el decisor no tiene control

sobre los parámetros del sistema sino que sólo puede elegir el número de equipos a adquirir y desplegar, la edad a la que debe reemplazarse los equipos y el número de canales de la instalación de reparación. Supongamos que la demanda, D , es de 15 unidades idénticas. La Tabla 7 relaciona los parámetros de este ejemplo de diseño. La Tabla 8 muestra un conjunto de las variables de diseño del ejemplo considerado. Los cálculos siguientes del ejemplo se basan en estas variables y en los parámetros del sistema de la Tabla 7.

Coste anual equivalente de la población. Primero, calcúlese el valor contable, B , de las unidades en edad de retirada tras cuatro años de uso, mediante la ecuación 5.6.

$$\$52.000 - 4 \left(\frac{\$52.000 - \$7000}{6} \right) = \$22.000 \quad (5.12)$$

El coste unitario anual equivalente, según la ecuación (5.5), es

$$\begin{aligned} C_i &= \$52.000 \left[\frac{0,10(1,10)^4}{(1,10)^4 - 1} \right] - \$22.000 \left[\frac{0,10}{(1,10)^4 - 1} \right] \\ &= \$16.404 - \$4.740 = \$11.664 \end{aligned} \quad (5.13)$$

de donde se deduce que el coste anual equivalente de la población es

$$PC = \$11.664(19) = \$221.616 \quad (5.14)$$

Coste operativo anual. De la ecuación (5.7) se deduce que el coste anual operativo de la población desplegada es

$$OC = (\$500 + \$450 + \$400 + \$400)(19) = \$33.250 \quad (5.15)$$

Coste anual de las instalaciones de reparación. A partir de la ecuación (5.8), el coste anual equivalente del canal de reparación para tres canales es

$$RC = \$45.000(3) = \$135.000 \quad (5.16)$$

PARÁMETROS	VALOR
Coste de obtención unitario.	\$52.000
Vida de diseño.	6 AÑOS
Valor residual al final de la vida de diseño.	\$7.000
Coste operativo.	
- Energía y combustible	\$500
- Mano de obra de operación.	450
- Mantenimiento preventivo.	400
- Otros costes de operación.	400
Coste anual del canal de reparación.	\$45.000
Coste anual por demanda insatisfecha.	\$73.000
Tasa de interés anual	10%
Rangos de edad.	MTBF MTTR
- 0-1	0,20 0,03
- 1-2	0,24 0,04
- 2-3	0,29 0,05
- 3-4	0,29 0,05
- 4-5	0,26 0,06
- 5-6	0,22 0,07

Tabla 7 - PARÁMETROS DEL SISTEMA PARA EL PROBLEMA DE DISEÑO -

POBLACIÓN, N	CANALES DE REPARACIÓN, M	EDAD DE RETIRO, n
19	3	4

Tabla 8 - VARIABLES PARA EL PROBLEMA DE DISEÑO -

Coste anual de penuria. El cálculo del coste de penuria se basa en los valores del MTBF y del MTTR de la Tabla 7 para los años 1 al 4. De estos valores y del principio de superposición de los procesos de Poisson, se puede calcular el valor medio del MTBF y del MTTR (medidos en años) para la población considerada:

$$\begin{aligned} \text{MTBF} &= (1/4)(0,20 + 0,24 + 0,29 + 0,29) = 0,2550 \\ \text{MTTR} &= (1/4)(0,03 + 0,04 + 0,05 + 0,05) = 0,0425 \end{aligned} \quad (5.17)$$

Como las unidades son homogéneas, se puede calcular el valor medio del MTBF y del MTTR de la población como:

$$\begin{aligned} \text{MTBF} &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \text{MTBF}_j \\ \text{MTTR} &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \text{MTTR}_j \end{aligned} \quad (5.18)$$

donde el subíndice j representa grupos de edad y n es el número de estos grupos de edad. Esto es una consecuencia de la superposición de los procesos de Poisson.

De la ecuación (5.9) se deduce que el coste anual de penuria es

$$SC = \$73.000(1,00663) = \$73.484 \quad (5.19)$$

El coste anual equivalente total del sistema puede calcularse como

$$\begin{aligned} TC &= PC + OC + RC + SC \\ &= \$221.616 + \$33.250 + \$135.000 + \$73.484 \end{aligned} \quad (5.20)$$

Como puede verse en la Tabla 9, esta solución es realmente la óptima, con consideración de puntos próximos para distintos valores de N , M y n .

EDAD DE RETIRO, n	NÚMERO DE UNIDADES, N	NÚMERO DE CANALES DE REPARACIÓN, M		
		2	3	4
3	19	\$598.395	\$465.985	\$469.130
	18	592.920	464.770	465.755
4	19	600.720	463.350*	464.295
	20	610.775	466.610	468.755
5	19	643.050	480.375	467.735

* ÓPTIMO

Tabla 9 - PUNTOS EN LA REGIÓN DEL ÓPTIMO -

En el próximo apartado se considerará la adecuación de este diseño de partida respecto a los requisitos de diseño. Además, se presentarán y evaluarán otros candidatos alternativos.

5.2.4. Problema II de diseño de un REPS

En el problema II de diseño, el decisor tiene control sobre un conjunto de parámetros dependientes del diseño además del conjunto de variables de diseño. Los parámetros dependientes del diseño se alterarán respecto al diseño de partida de la Sección 5.2.3., para buscar un candidato REPS más aceptable que el diseño de partida.

Consideración de los requisitos de diseño. Se asume que el diseño de partida no satisface la totalidad de los siguientes requisitos de diseño:

1. El coste por unidad desplegada no debe exceder 50.000 dólares.
2. La probabilidad de satisfacer la demanda debe ser al menos de 0,70.
3. El MTBF medio de la unidad a lo largo de su vida debe ser al menos de 0,20 años.
4. No debe mantenerse un equipo en servicio más de cuatro años.

Nótese que el diseño de partida no satisface los requisitos 1 y 2, pero sí los requisitos 3 y 4. Además, el coste anual equivalente del ciclo de vida es de 463.350 dólares. La Figura 20 muestra una representación gráfica de la evaluación del diseño para esta situación. Se pone de manifiesto el diseño de partida. A continuación debe llevarse a cabo una investigación para desarrollar uno o más sistemas candidatos que satisfagan todos los requisitos del diseño, con un coste del ciclo de vida que sea aceptable.

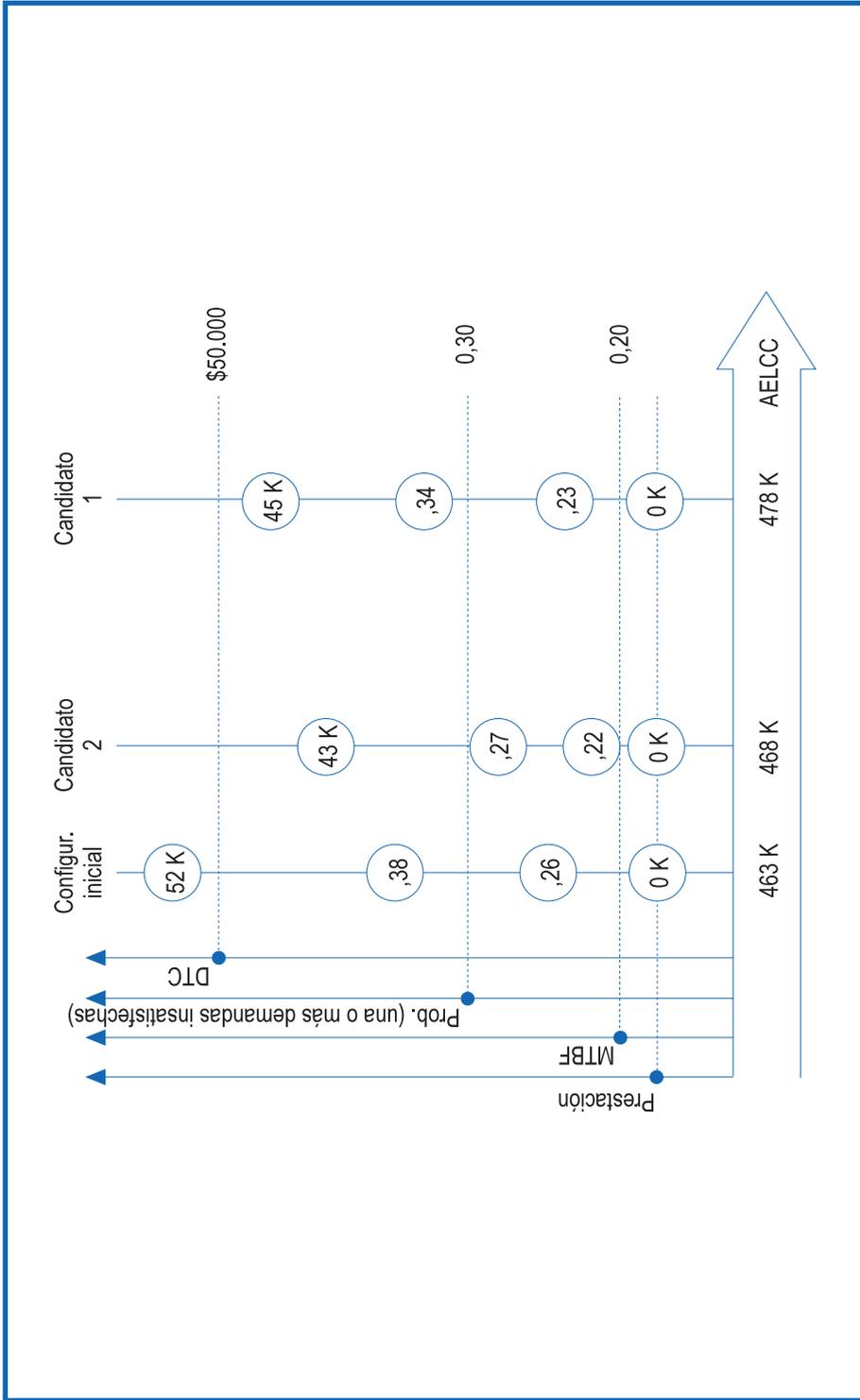


Figura 20 - REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA EVALUACIÓN DE LA DECISIÓN PARA UN REPS -

Generación de otros diseños candidatos. Supongamos que se conciben dos diseños candidatos para satisfacer la demanda de 15 equipos y los parámetros independientes del diseño de la Tabla 7. En la Tabla 10 se presentan los parámetros dependientes del diseño de estos candidatos. La optimización del tamaño de la población, el número de canales de reparación y la edad de sustitución, dan los resultados para el conjunto de parámetros dependientes del diseño resumidos en la Tabla 11 para los distintos candidatos. También se incluyen los resultados optimizados para el diseño de partida. Se hacen las siguientes observaciones:

1. Sólo el sistema candidato 2 satisface todos los requisitos de diseño.
2. El sistema candidato 2 tiene el mínimo coste unitario y por tanto el mínimo coste de inversión para la población desplegada.
3. El sistema candidato 2 tiene la mayor probabilidad de satisfacer la demanda de 15 unidades operativas de equipo.
4. El sistema candidato 2 es el que más energía consume y el que exige el mayor gasto de mano de obra operativa.
5. El sistema candidato 2 tiene un exceso de coste anual equivalente del ciclo de vida de $(468.825 - 463.350 = 5.475)$ dólares) por encima del diseño de partida, pero tiene un coste de inversión menor que el sistema candidato 1.

Puede haber otros sistemas candidatos que satisfagan todos los requisitos de diseño y que tengan costes del ciclo de vida iguales o menores que el coste del ciclo de vida del sistema candidato 2. El objetivo del problema II de diseño de un REPS es formalizar la evaluación de candidatos, caracterizando cada candidato por los valores de sus parámetros dependientes del diseño. La comparación entre los

PARÁMETROS	SISTEMA CANDIDATO 1	SISTEMA CANDIDATO 2
Coste de obtención unitario.	\$45.000	\$43.000
Vida de diseño.	6 AÑOS	6 AÑOS
Valor residual al final de la vida de diseño.	\$6.000	\$5.000
Coste operativo.		
- Energía y combustible	\$600	\$800
- Mano de obra de operación.	500	700
- Mantenimiento preventivo.	400	400
- Otros costes de operación.	400	400
Rangos de edad.	MTBF	MTBF
- 0-1	0,16	0,18
- 1-2	0,21	0,21
- 2-3	0,26	0,25
- 3-4	0,26	0,25
- 4-5	0,26	0,23
- 5-6	0,24	0,20
	MTTR	MTTR
	0,04	0,04
	0,04	0,04
	0,05	0,05
	0,06	0,05
	0,06	0,06
	0,06	0,06

Tabla 10 - PARÁMETROS DEPENDIENTES DEL DISEÑO PARA LOS CANDIDATOS CONSIDERADOS -

	CONFIGURACIÓN INICIAL	SISTEMA CANDIDATO 1	SISTEMA CANDIDATO 2
Número desplegado	19	20	20
Canales de reparación	3	4	4
Edad de retiro	4	5	4
Coste unitario	\$52.000	\$45.000	\$43.000
MTBF medio	0,26	0,23	0,22
Probabilidad de satisfacer la demanda	0,622	0,663	0,730
Coste anual equivalente del ciclo de vida	\$463.350	\$478.470	\$468.825

Tabla 11 - RESUMEN DE EVALUACIÓN DE LOS CANDIDATOS REPS -

candidatos se realiza únicamente después de obtener los valores optimizados (minimizados) del coste del ciclo de vida. La representación gráfica de la evaluación de la decisión de la Figura 20 ha demostrado ser un buen método para hacer la necesaria comparación.

5.3. Resumen de los ejemplos

El ejemplo de la Sección 5.1 ilustra la aplicación de un análisis del coste del ciclo de vida para apoyar una decisión de diseño en que se evalúan dos configuraciones alternativas en respuesta a una necesidad que se ha presentado. El objetivo era señalar la configuración que cumplía todos los requisitos de prestaciones y efectividad, manteniéndose dentro de las limitaciones de presupuesto y ofreciendo el menor coste del ciclo de vida.

La evaluación considera dos sistemas candidatos, cada uno de

los cuales cumple los requisitos de prestaciones y efectividad, y se encuentra dentro de los límites de presupuesto. Sin embargo, las dos configuraciones presentan diferentes prestaciones y efectividad. El objetivo es seleccionar la mejor a la vista de los múltiples criterios.

Una estructura de desglose de costes respalda los elementos individuales de coste en el ejemplo. Después se aplica la ecuación (4.1) a los costes producidos año a año para obtener el coste actual equivalente. A continuación se hace una elección basada en los valores obtenidos, tras considerar otros factores en la evaluación de la decisión.

En la Sección 5.2 se presenta un método de optimización económica. Gracias al mismo, se considera de forma explícita la interacción entre unidades de la población por medio de un modelo de colas finitas, lo que no era el caso en el ejemplo de la Sección 5.1. Se discutieron dos problemas de diseño para evaluar los sistemas candidatos 1 y 2. En el problema I de diseño del sistema se suponía que se adquirirían las unidades con un MTBF y un MTTR predeterminados, variando estos valores en función de la edad de las unidades. En el problema II de diseño del sistema se hacía una ampliación para considerar unidades con unas características de MTBF y MTTR que eran función del primer coste de las unidades. Se admite que se pueden obtener mejoras en el MTBF y el MTTR a cambio de un coste. Esto conduce a la aplicación múltiple de la rutina de optimización para el problema I de diseño: una aplicación a todos los valores posibles de MTBF y MTTR para las unidades a desplegar.

El cálculo del coste del ciclo de vida se aplica en todas las fases de diseño del sistema: diseño, desarrollo, producción, construcción, uso operativo y apoyo logístico. Al principio del ciclo de vida se pone énfasis en los aspectos de coste, al establecer ciertos factores cuantitativos de coste como requisitos propios del diseño.

A medida que transcurre el ciclo de vida, el coste se emplea como un parámetro de importancia en la evaluación de configuraciones de diseño alternativas y en la selección de una solución de preferencia. Por tanto, los datos del coste se preparan basándose en las características establecidas del diseño y la producción, y se usan en el desarrollo de la estimación del coste del ciclo de vida. A su vez, estas estimaciones se comparan con los requisitos iniciales para determinar el grado de cumplimiento y la necesidad de una acción correctiva. En esencia, el coste del ciclo de vida evoluciona desde una serie de estimaciones groseras hasta una metodología relativamente refinada, empleándose como una herramienta de gestión orientada a la toma de decisión.

Según va progresando la ingeniería a lo largo del ciclo de vida del sistema, aparecen nuevas oportunidades para una aplicación más eficaz del cálculo del coste del ciclo de vida, como se mostraba en la Figura 2. Este proceso del ciclo de vida proporciona un campo para que la ingeniería alcance su plena capacidad de evaluación conjunta del diseño, producción y operaciones. Hace falta disponer de una perspectiva amplia para asociar estrechamente el campo clásico de la economía aplicada a la ingeniería, con el diseño y el desarrollo propios

de la ingeniería de sistemas. Esa perspectiva debe abarcar tanto el coste del ciclo de vida como la efectividad del sistema [6, 7].

El cálculo del coste del ciclo de vida es una extensión de la clásica disciplina de la economía aplicada a la ingeniería, a fin de abarcar todo el ciclo de vida. Puede alcanzar su máxima efectividad durante el diseño conceptual y preliminar. Una vez que se ha completado el diseño, no se pueden modificar sustancialmente los resultados económicos. Es más, las consideraciones económicas relacionadas con el ciclo de vida deben plantearse durante el diseño de la producción y apoyo del sistema, si es que se quiere explotar totalmente las posibilidades de una ingeniería concurrente [3].

Será muy beneficioso conseguir un rápido conocimiento del sistema al principio del ciclo de vida. Hay que tener en cuenta que casi dos tercios del coste del ciclo de vida de un producto o sistema se ven ya determinados en la fase conceptual y de diseño preliminar, como se indica en la Figura 21. Este coste comprometido alcanza alrededor de un 80% a la finalización de la fase de diseño detallado y desarrollo.

Gracias a su amplia capacitación, los ingenieros de sistemas pueden contribuir a una adecuada toma de decisiones en el diseño conceptual y preliminar. El objetivo es estrechar la holgura entre el conocimiento disponible y el coste comprometido del ciclo de vida, mostrada en la Figura 21. Además, también debe evaluarse el coste-efectividad de posibles inversiones adicionales que aumenten la obtención de conocimiento del sistema. La investigación recae sobre los métodos y técnicas que permitan acelerar la curva de conocimiento y frenar la curva que representa el coste comprometido del ciclo de vida.

Se estima que los métodos y herramientas del cálculo del coste del ciclo de vida y de la efectividad del sistema van a tener un mayor uso, fuera del clásico ámbito de la defensa. Lo que ahí se ha aprendido puede adaptarse al sector comercial con un beneficio considerable.

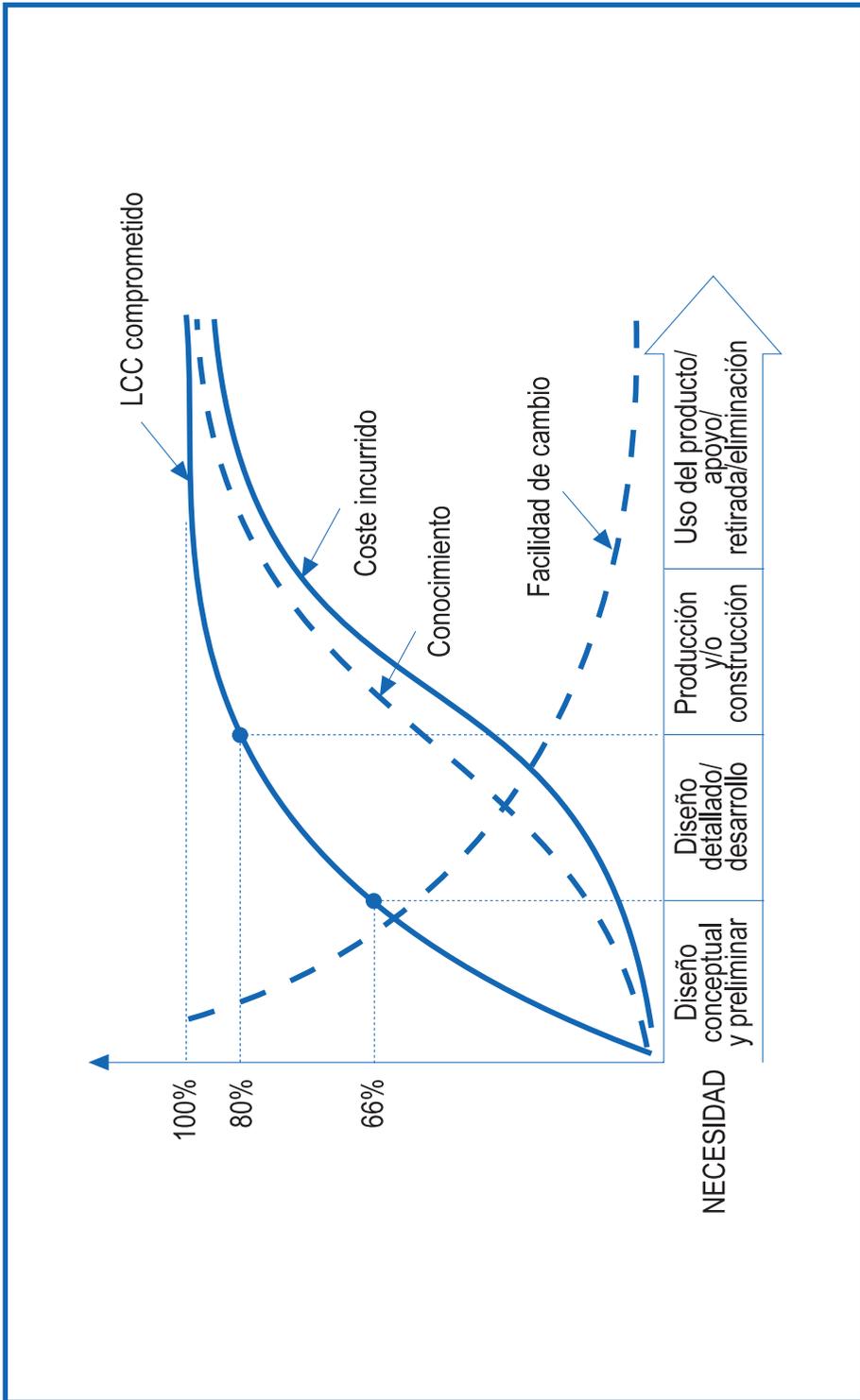


Figura 21 - EVOLUCIÓN DE MAGNITUDES A LO LARGO DEL CICLO DE VIDA -

Apéndice A

El interés del dinero y la equivalencia económica



El valor a lo largo del tiempo del dinero, expresado bajo la forma del tipo de interés, es un factor importante en la mayoría de las situaciones de decisión que implican un flujo monetario en el tiempo. El análisis de ese valor a lo largo del tiempo requiere una familiarización con el modelo de flujo monetario, las fórmulas de interés, las tablas de interés y el cálculo de la equivalencia, todas ellas presentadas en los apartados siguientes:

A.1. El modelo de flujo monetario

El modelo de flujo monetario puede presentarse usando una escala temporal, según muestra la Figura 22.

Este modelo de flujo monetario puede aplicarse a cualquier fase del ciclo de vida del producto y/o sistema, con vistas al análisis del coste del ciclo de vida y/o de los ingresos. Los símbolos se definen como:

P = un capital actual.

A = una sola anualidad en una serie de anualidades iguales.

F = un capital futuro.

n = el número de años.

i = el tipo de interés.

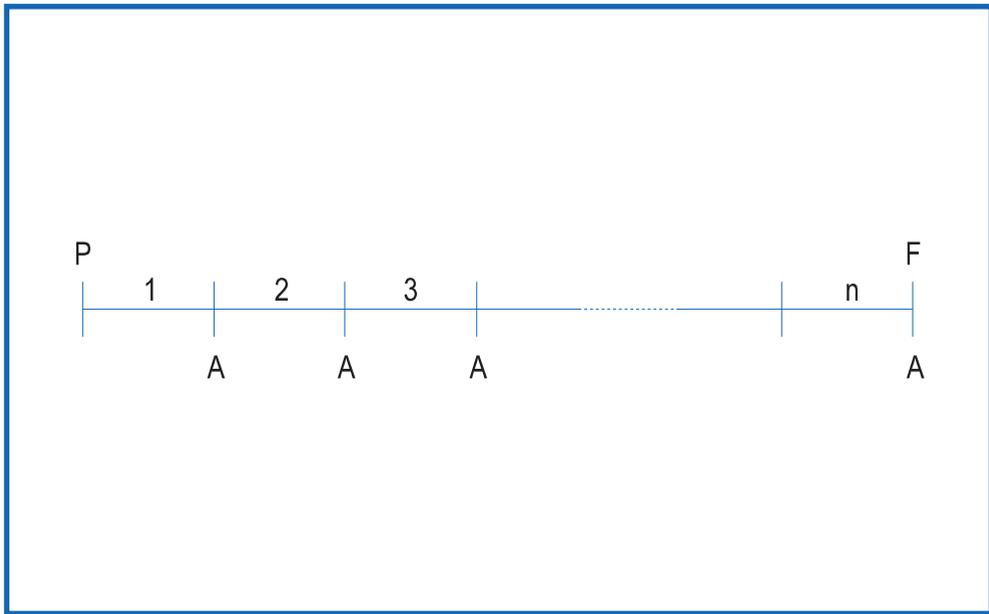


Figura 22 - MODELO DE FLUJO MONETARIO -

A.2. Fórmulas de interés

A partir del modelo de flujo monetario pueden obtenerse seis fórmulas útiles relacionadas con el interés. Dichas fórmulas se resumen en la Tabla 12.

A.3. Tablas de interés

Las tablas de interés que responden a los conceptos resumidos en la Tabla 12, hacen innecesario recordar el nombre de cada fórmula. Al final de este Apéndice se incluye una tabla para $i = 10\%$. En las referencias [3] y [6] se ofrecen otras tablas. Cada columna está encabezada por una designación que identifica la función del valor tabulado, como establece el modelo del flujo monetario. Cada tabla corresponde a un valor específico de i , a una banda de valores de n , y a cada una de las seis fórmulas. Está basado en 1 unidad monetaria.

NOMBRE DE LA FÓRMULA	FUNCIÓN	FÓRMULA	DESIGNACIÓN
PAGO SIMPLE CAPITAL FINAL	DADO P HALLAR F	$F = P(1+i)^n$	$F = P^{(FP,i,n)}$
PAGO SIMPLE VALOR ACTUAL	DADO F HALLAR P	$P = F \left[\frac{1}{(1+i)^n} \right]$	$P = F^{(PF,i,n)}$
ANUALIDADES IGUALES CAPITAL FINAL	DADO A HALLAR F	$F = A \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i} \right]$	$F = A^{(FA,i,n)}$
ANUALIDADES IGUALES FONDO DE AMORTIZACIÓN O "SINKING FUND"	DADO F HALLAR A	$A = F \left[\frac{i}{(1+i)^n - 1} \right]$	$A = F^{(AF,i,n)}$
ANUALIDADES IGUALES VALOR ACTUAL	DADO A HALLAR P	$P = A \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right]$	$P = A^{(PA,i,n)}$
ANUALIDADES IGUALES ANUALIDAD DE AMORTIZACIÓN	DADO P HALLAR A	$A = P \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right]$	$A = P^{(AP,i,n)}$

Tabla 12 - RESUMEN DE FÓRMULAS Y DESIGNACIONES -

Por ejemplo, si $i = 10\%$ y $n = 12$ años, 1 unidad monetaria se convertirá en 3,138, como indica la primera columna de la Tabla 13.

A.4. El cálculo de equivalencia

Dos cantidades monetarias son equivalentes cuando tienen el mismo valor de cambio. Existen tres factores en la equivalencia de sumas de dinero: (1) el montante de las cantidades, (2) el momento de aparición de las cantidades y (3) el tipo de interés. Con un tipo de interés del 10% y $n = 12$, un P de 1 peseta es equivalente a un F de 3,138 pesetas. Esto puede expresarse para un P de 1.000 pesetas como:

$$F = 1000 \overset{F/P, 10, 12}{(3,138)} = 3.138 \text{ ptas.} \quad (\text{A.1})$$

A continuación se presentan ejemplos de equivalencia usando las otras fórmulas de interés: si $i = 10\%$, $n = 4$ años, y $F = 200$ pesetas, el valor P que es equivalente a F es

$$P = 200 \overset{P/F, 10, 4}{(0,6830)} = 136,60 \text{ ptas.} \quad (\text{A.2})$$

Si $i = 12\%$, $n = 9$ años, y $A = 10$ pesetas, el valor F que es equivalente a A es

$$F = 10 \overset{F/A, 12, 9}{(14,776)} = 147,76 \text{ ptas.} \quad (\text{A.3})$$

Si $i = 10\%$, $n = 14$ años, y $F = 1.000$ pesetas, el valor A que es equivalente a F es

$$A = 1000 \overset{A/F, 10, 14}{(0,0358)} = 35,80 \text{ ptas.} \quad (\text{A.4})$$

Si $i = 10\%$, $n = 6$ años, y $A = 100$ pesetas, el valor P que es equivalente a A es

$$P = 100 \overset{P/A, 10, 6}{(4,3553)} = 435,53 \text{ ptas.} \quad (\text{A.5})$$

Si $i = 12\%$, $n = 7$ años, y $P = 10.000$ pesetas, el valor A que es equivalente a P es

$$A = 10.000 \overset{A/P, 12, 7}{(0,2191)} = 2.191,00 \text{ ptas.} \quad (\text{A.6})$$

ANÁLISIS DEL COSTE DEL CICLO DE VIDA DE LOS SISTEMAS

n	PAGO SIMPLE		ANUALIDADES IGUALES			
	Factor capital final	Factor valor actual	Factor capital final	Factor Sinking-Fund	Factor valor actual	Factor anualidad de amortización
	Para hallar F dado P F/P, i, n	Para hallar P dado F P/F, i, n	Para hallar F dado A F/A, i, n	Para hallar A dado F A/F, i, n	Para hallar P dado A P/A, i, n	Para hallar A dado P A/P, i, n
1	1,100	0,9091	1,000	1,0000	0,9091	1,1000
2	1,210	0,8265	2,100	0,4762	1,7355	0,5762
3	1,331	0,7513	3,310	0,3021	2,4869	0,4021
4	1,464	0,6830	4,641	0,2155	3,1699	0,3155
5	1,611	0,6209	6,105	0,1638	3,7908	0,2638
6	1,772	0,5645	7,716	0,1296	4,3553	0,2296
7	1,949	0,5132	9,487	0,1054	4,8684	0,2054
8	2,144	0,4665	11,436	0,0875	5,3349	0,1875
9	2,358	0,4241	13,579	0,0737	5,7950	0,1737
10	2,594	0,3856	15,937	0,0628	6,1446	0,1628
11	2,853	0,3505	18,531	0,0540	6,4951	0,1540
12	3,138	0,3186	21,384	0,0468	6,8137	0,1468
13	3,452	0,2897	24,523	0,0408	7,1034	0,1408
14	3,798	0,2633	27,975	0,0358	7,3667	0,1358
15	4,177	0,2394	31,772	0,0315	7,6061	0,1315
16	4,595	0,2176	35,950	0,0278	7,8237	0,1278
17	5,054	0,1979	40,545	0,0247	8,0216	0,1247
18	5,560	0,1799	45,599	0,0219	8,2014	0,1219
19	6,116	0,1635	51,159	0,0196	8,3649	0,1196
20	6,728	0,1487	57,275	0,0175	8,5136	0,1175
21	7,400	0,1351	64,003	0,0156	8,6487	0,1156
22	8,140	0,1229	71,403	0,0140	8,7716	0,1140
23	8,953	0,1117	79,543	0,0126	8,8832	0,1126
24	9,850	0,1015	88,497	0,0113	8,9848	0,1113
25	10,835	0,0923	98,347	0,0102	9,0771	0,1102
26	11,918	0,0839	109,182	0,0092	9,1610	0,1092
27	13,110	0,0763	121,100	0,0083	9,2372	0,1083
28	14,421	0,0694	134,210	0,0075	9,3066	0,1075
29	15,863	0,0630	148,631	0,0067	0,3696	0,1067
30	17,449	0,0573	164,494	0,0061	9,4269	0,1061
31	19,194	0,0521	181,943	0,0055	9,4790	0,1055

Tabla 13 - FACTORES DE INTERÉS PARA $i = 10\%$ -

A.5. Equivalencia a partir de varios factores

Como ilustración más detallada del concepto de equivalencia, consideremos el uso de los diversos factores para encontrar el valor al principio del año 1 de los ingresos futuros mostrados en la Figura 23.

A.6. Diagramas de función de equivalencia

¿Qué valor de i hará equivalente un P de 300 pesetas a un F de 700 pesetas, si $n = 9$?

$$700 = 300 \left(\frac{F}{P} \right)^{i,9}$$

$$\left(\frac{F}{P} \right)^{i,9} = \frac{700}{300} \quad (\text{A.7})$$

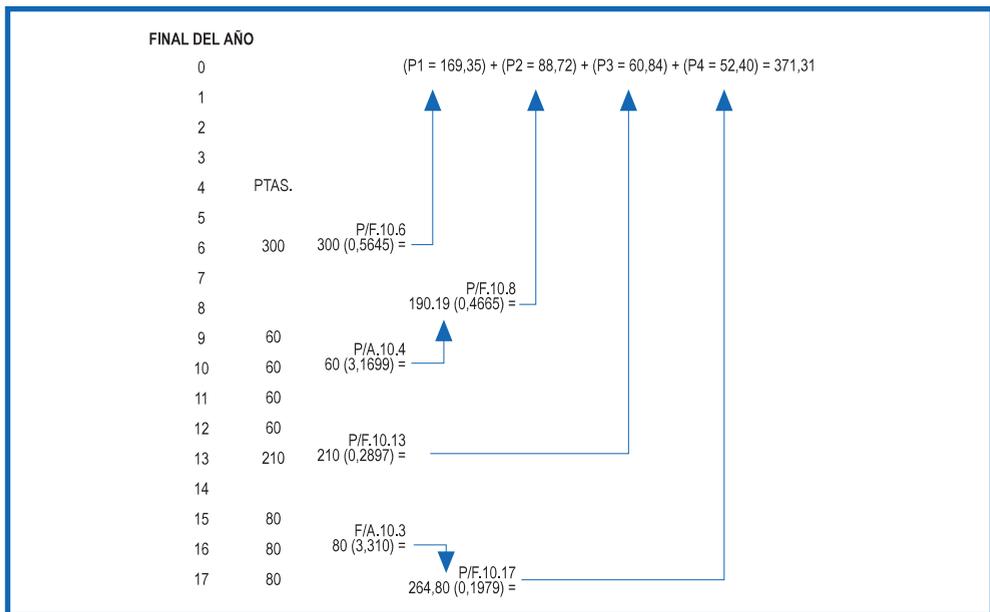


Figura 23 - EQUIVALENCIA DE INGRESOS FUTUROS -

El valor de i es ligeramente menor que un 10%. Esto puede ilustrarse gráficamente representando P en función de i , como se muestra en la Figura 24.

¿Qué valor de n hará equivalente un P de 400 pesetas a un F de 800 pesetas, si $i = 10\%$?

$$800 = 400 \left(\frac{F/P, 8, n}{2,000} \right) \quad (A.8)$$

El valor de n se encuentra entre 9 y 10 años. Esto puede ilustrarse gráficamente representando P en función de n , como se muestra en la Figura 25.

Los cálculos de equivalencia pueden hacerse siempre que se desconoce un elemento y vienen dados los otros tres, como se ilustró en los ejemplos anteriores.

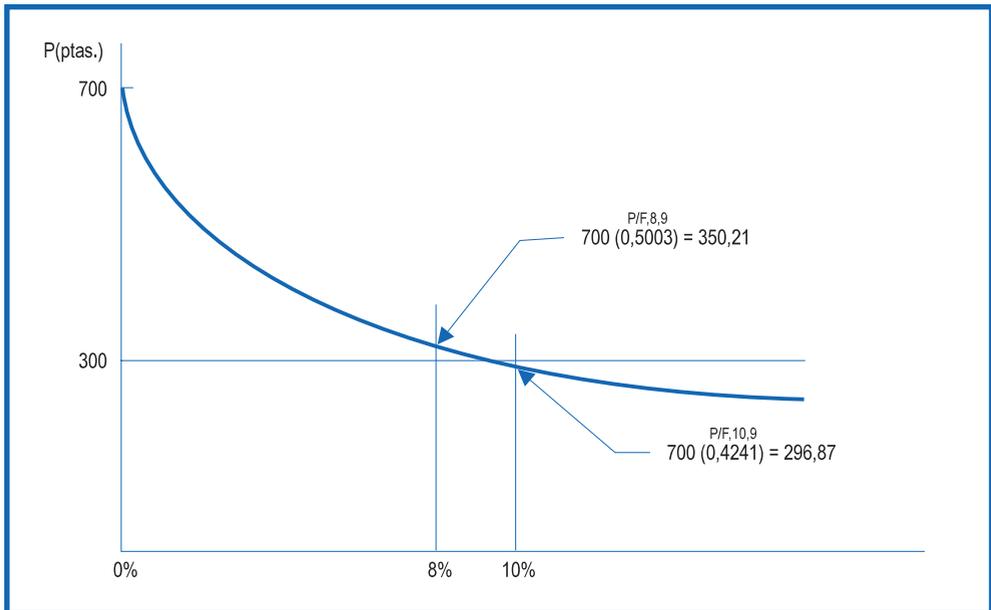


Figura 24 - VALORES ACTUALES DE CAPITAL EN FUNCIÓN DE LA INFLACIÓN -

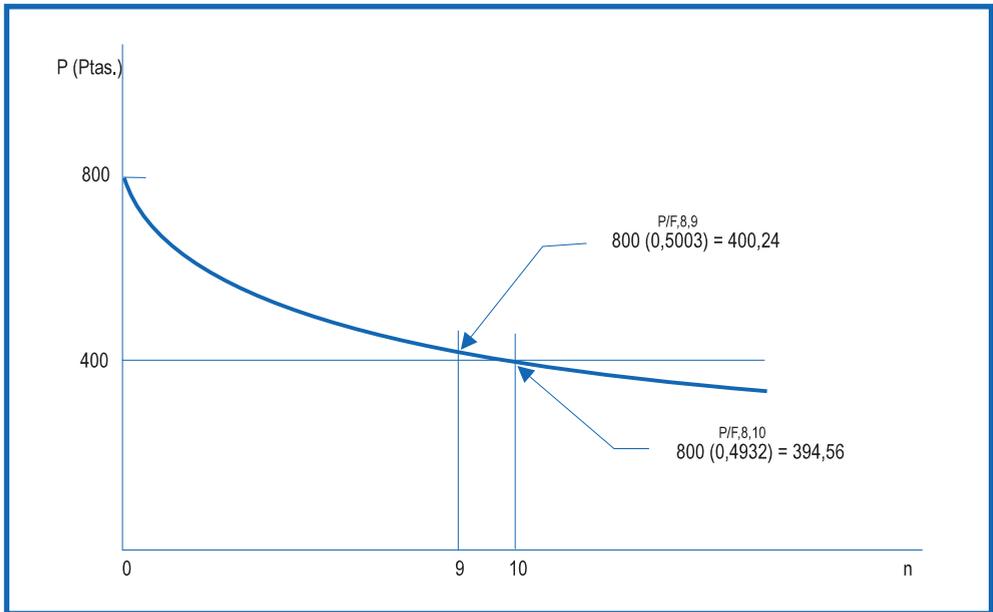


Figura 25 - VALORES ACTUALES DE CAPITAL EN FUNCIÓN DE NÚMERO DE AÑOS -

Apéndice B

Métodos de comparación de alternativas



Para que las diferencias aparentes se conviertan en diferencias reales es necesaria la reducción de las alternativas existentes a una base común, considerando el valor del dinero a lo largo del tiempo. Las diferencias reales son directamente comparables y pueden utilizarse para la toma de decisiones. Los métodos más comunes de comparación de alternativas son: el valor actual equivalente, el valor anual equivalente, la tasa de rentabilidad y la amortización. En los siguientes apartados se hace una presentación de los mismos.

B.1. Método del valor actual equivalente

Compárese el valor actual equivalente de 100 pesetas por año durante 8 años, con el de 1.000 pesetas al final de 8 años, si $i = 10\%$.

$$\begin{aligned} PE &= 100 \overset{P/A,10,8}{(5,3349)} = 533,49 \text{ ptas.} \\ PE &= 1000 \overset{P/F,10,8}{(0,4665)} = 466,50 \text{ ptas} \end{aligned} \tag{B.1}$$

B.2. Método del valor anual equivalente

Compárese el coste anual equivalente de un gasto de revisión general de 2.000 pesetas al cabo de 6 años, frente a unos gastos anuales de mantenimiento de 50 pesetas y una revisión general al cabo de 6 años con un importe de 400 pesetas, si $i = 12\%$.

$$AE = 2,000(0,1232)^{A/F,12,6} = 246,40 \text{ ptas.} \quad (\text{B.2})$$

$$AE = 50 + 400(0,1232)^{A/F,12,6} = 99,28 \text{ ptas.}$$

B.3. Método de la tasa de rentabilidad

Calcúlese la tasa de rentabilidad si un gasto de 8.000 pesetas implica un ahorro de 1.400 pesetas cada año durante 8 años.

$$8.000 = 1.400 \left(\frac{P/A,i,8}{5.714} \right) \quad (\text{B.3})$$

i es aproximadamente 8%.

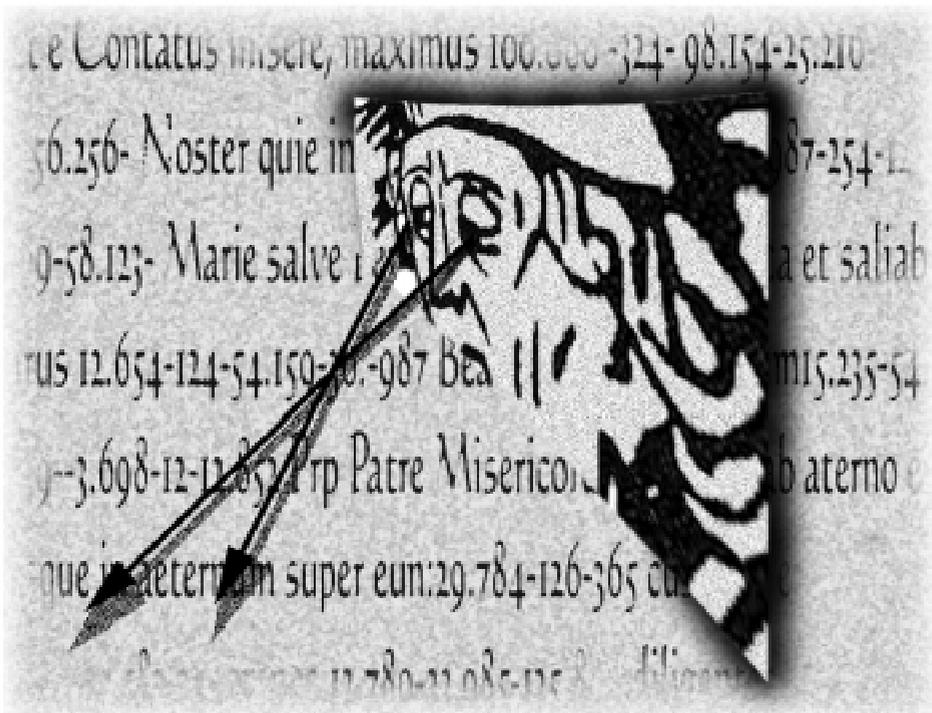
B.4. Método de la amortización

¿Cuánto tiempo se tardará en amortizar el coste de un dispositivo para ahorrar en mano de obra, cuyo coste es de 1.200 pesetas, si $i = 10\%$ y el ahorro anual es de 200 pesetas?

$$1.200 = 200 \left(\frac{P/A,10,n}{6,000} \right) \quad (\text{B.4})$$

n se encuentra entre 9 y 10 años.

Referencias



[1] Blanchard, B. S. y W. J. Fabrycky, Systems Engineering and Analysis, 2nd edition, Prentice Hall, Inc., 1990.

[2] Fabrycky, W. J. y B. S. Blanchard, Life-Cycle Cost and Economic Analysis, Prentice Hall, Inc., 1991.

[3] Thuesen, G. J. y W. J. Fabrycky, Engineering Economy, 8th edition, Prentice Hall, Inc., 1993.

[4] Thuesen, H. G., W. J. Fabrycky y G. J. Thuesen, Ingeniería Económica, Translation of Engineering Economy 5th Edition by Alberto León Betancourt, Prentice Hall International, 1981.

[5] Nachlas, J.A., Fiabilidad, Serie de Monografías de Ingeniería de Sistemas, Isdefe, Madrid, España, 1995.

[6] Thuesen, G. J. y W. J. Fabrycky, Engineering Economy, 8th edition, Prentice Hall, Inc., 1993.

[7] Fabrycky, W. J. y Thuesen, G. J., Decisiones económicas. Análisis y Proyectos, Prentice Hall Internacional, 1981.

Bibliografía



ANÁLISIS DEL COSTE DEL CICLO DE VIDA DE LOS SISTEMAS

- Berliner, C & J. Brimson:** *Cost Management for Today's Advanced Manufacturing - The CAM-I Conceptual Design*, Harvard Business School Press, Inc., Boston, Massachusetts, 1988.
- Brown, R. J. & R. R. Yanuck:** *Introduction to Life Cycle Costing*, AEE Energy Books, Dept. 64, 4025 Pleasantdale Road, Suite 340, Atlanta, Georgia 30324, 1985.
- Burk, K. B. & D. W. Webster:** *Activity Based Costing & Performance*, American Management Systems, Inc., Fairfax, Virginia, 1994.
- Canada, J. R. & W. G. Sullivan:** *Economic and Multiattribute Evaluation of Advanced Manufacturing Systems*, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1989.
- Canada, J. R., W. G. Sullivan & J. A. White:** *Capital Investment Analysis for Engineering and Management*, 2nd Edition, Prentice Hall, New Jersey, 1996.
- DARCOM P700-6 (Army), NAVMAT P5242 (Navy) & AFLCP/AFSCP 800-19 (Air Force):** *Joint-Design-to-Cost Guide, Life Cycle Cost as a Design Parameter*, Departments of the Army/Navy/Air Force, Washington, D.C.
- Dhillon, B. S.:** *Life Cycle Costing: Techniques, Models and Applications*, Gordon and Breach Science Publishers, New York, 1989.
- DOD Guide LCC-1:** *Life Cycle Costing Procurement Guide*, Department of Defense, Washington, D.C.
- DOD Guide LCC-2:** *Casebook, Life Cycle Costing in Equipment Procurement*, Department of Defense, Washington, D.C.
- DOD Guide LCC-3:** *Life Cycle Costing Guide for System Acquisitions*, Department of Defense, Washington, D.C.
- DOD-HDBK-766:** *Design to Cost*, Military Handbook, Department of Defense, Washington, D.C.
- Fabrycky, W. J. & B. S. Blanchard:** *Life-Cycle Cost and Economic Analysis*, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1991.
- Fabrycky, W. J. & G. J. Thuesen:** *Economic Decision Analysis*, 2nd Edition, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1980.
- Fisher, G. H.:** *Cost Considerations in System Analysis*, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1971.
- Fowler, T. C.:** *Value Analysis in Design*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.
- Grant, E. L., W. G. Ireson & R. S. Leavenworth:** *Principles of Engineering Economy*, 8th Edition, The Ronald Press Co., New York, 1990.
-

-
- Gulledge, T. R. & L. A. Litteral (Ed.):** *Cost Analysis Applications of Economics and Operations Research*, Springer-Verlag, New York, 1989.
- Gulledge, T. R. W. P. Hutzler & J. S. Lovelace (Ed.):** *Cost Estimating and Analysis: Balancing Technology and Declining Budgets*, Springer-Verlag, New York, 1992.
- Jelen, F. C. & J. H. Black:** *Cost and Optimization Engineering*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1983.
- McNichols, G. R. (Ed.):** *Cost Analysis*, Operations Research Society of America, Baltimore, Maryland, 1984.
- Michaels, J. V. & W. P. Wood:** *Design To Cost*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1989.
- MIL-HDBK-259:** *Life Cycle Cost in Navy Acquisitions*, Military Handbook, Department of Defense, Washington, D.C.
- MIL-STD-337:** *Design To Cost*, Department of Defense, Washington, D.C.
- MIL-STD-1390C:** *Level Of Repair*, Department of Defense, Washington, D.C.
- O'Guin, M. C.:** *The Complete Guide to Activity-Based Costing*, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1991.
- OMB Circular A-76:** *Cost Comparison Handbook*, Office of the Management of the Budget, Washington, D.C.
- Ostwald, P. F.:** *Engineering Cost Estimating*, 3rd Edition, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1992.
- Stewart, R. D.:** *Cost Estimating*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1991.
- Stewart, R. D. & A. L. Stewart:** *Cost Estimating With Microcomputers*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1980.
- Stewart, R. D. & R. M. Wyskida:** *Cost Estimator's Reference Manual*, 2nd Edition, John Wiley & sons, Inc., New York, 1995.
- Thuesen, G. J. & W. J. Fabrycky:** *Engineering Economy*, 8th Edition, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1983.
- Witt, P. R.:** *Cost Competitive Products: Managing Product Concept to Marketplace Reality*, Reston Publishing Co., Reston, Virginia, 1986.
-

Glosario



1. ANÁLISIS DEL COSTE-EFICACIA (CEA). CEA es una metodología para considerar simultáneamente tanto las medidas del coste como las de la eficacia

2. ESTRUCTURA DE DESGLOSE DEL COSTE (CBS). La CBS es una estructura para definir costes del ciclo de vida y suministrar los enlaces de comunicaciones del informe y análisis del coste y del control final del coste.

3. DISEÑO HACIA EL COSTE (DTC). El concepto de DTC establece el coste como una limitación del diseño del sistema o producto, junto con las medidas de prestación técnicas.

4. COSTE DEL CICLO DE VIDA (LCC). LCC se refiere a todos los costes asociados con el producto o sistema como está anticipado durante el ciclo de vida definido.

5. ANÁLISIS DEL COSTE DEL CICLO DE VIDA (LCCA). LCCA es un proceso analítico sistemático para evaluar las líneas de acción de varias alternativas con el objetivo de elegir la vía menos costosa para alcanzar un objetivo.

6. PERFIL DEL COSTE DEL CICLO DE VIDA (LCCP). El LCCP representa una estimación presupuestaria del coste de las necesidades futuras de recursos durante el ciclo de vida.

*Esta primera edición de
ANÁLISIS DEL COSTE DEL CICLO DE VIDA DE LOS SISTEMAS
de la serie de
Monografías de Ingeniería de Sistemas
se terminó de imprimir el día
3 de febrero de 1997.*
