

Técnicas de estimación de costos

Los objetivos de este capítulo son: 1. estudiar el enfoque integral que se usa en el desarrollo de flujos de efectivo para las alternativas que se analizan en un estudio, y 2. delinear e ilustrar técnicas selectas que serán de utilidad al realizar dichas estimaciones.

En este capítulo se estudian los siguientes temas:

- Un enfoque integral para desarrollar flujos de efectivo
- Definición de una estructura de desglose de trabajo
- La estructura del costo y el ingreso
- Técnicas de estimación (modelos)
- Estimación paramétrica de costos
- Descripción del efecto de la curva de aprendizaje
- Estimación de costos durante el proceso de diseño
- Estimación de los flujos de efectivo para un pequeño proyecto típico

7.1 Introducción

En el capítulo 1 se estudió el procedimiento de análisis de la ingeniería económica en términos de siete etapas, que se listan aquí una vez más:

1. Reconocimiento y formulación del problema.
2. Desarrollo de las alternativas factibles.
3. Desarrollo del flujo neto de efectivo (y otros eventos prospectivos) de cada alternativa.
4. Selección de un criterio (o criterios) para determinar la alternativa preferible.
5. Análisis y comparación de las alternativas.

6. Selección de la alternativa preferible.
7. Vigilancia del rendimiento y postevaluación de los resultados.

En los capítulos 3 a 6 se desarrolló y demostró la metodología necesaria para llevar a cabo las etapas 4, 5 y 6. En este capítulo se vuelve a la etapa 3.

Como los estudios de ingeniería económica tienen que ver con resultados que se extienden hacia el futuro, una etapa fundamental del procedimiento de análisis es la estimación de los flujos de efectivo futuros para las alternativas factibles. Una decisión basada en el análisis es adecuada sólo en la medida en que las estimaciones de dichos costos e ingresos sean representativos de lo que ocurrirá en la posteridad.

En la etapa 1 del procedimiento, se identificó la necesidad de hacer un análisis; la situación específica (oportunidad de mejora, proyecto de diseño, negocio nuevo, etcétera) se definió en forma explícita; se desarrollaron los eventos deseables en términos de metas, objetivos y otros resultados; y se delinearón cualesquiera condiciones especiales y restricciones que se necesitara satisfacer. Luego, en la etapa 2, se seleccionaron las alternativas factibles por analizar en el estudio de ingeniería económica, y se describieron usando el enfoque de sistemas.

Entonces, para la etapa 3, *ya se han seleccionado las alternativas* por analizar, y se han *resaltado* las diferencias entre ellas. Desde las primeras dos etapas ya se contaba con otra información importante (resultados por alcanzar y requerimientos por satisfacer) necesaria para el análisis.

Una parte importante de la práctica de la ingeniería es la aplicación de los conceptos y la metodología que se estudian en este capítulo. Como base para algunos de los ejemplos del capítulo 7 se utiliza un proyecto de edificación comercial. Hubiera sido posible elegir cualquier otro proyecto de ingeniería, tal como la expansión de una planta de procesamiento químico o el diseño de un centro de conmutación para un sistema de distribución eléctrica.

7.2 Un enfoque integrado

En la figura 7.1 se muestra un enfoque integrado para desarrollar los flujos netos de efectivo para las alternativas factibles del proyecto (etapa 3). Se usará el término *proyecto* para hacer referencia a aquello que constituye el objeto del análisis. Este enfoque integrado incluye tres componentes básicos:

1. *Estructura de desglose del trabajo (EDT)*. Ésta es una técnica para definir en forma explícita los elementos de trabajo de un proyecto y sus interrelaciones, con niveles de detalle sucesivos (lo que a veces se llama *estructura de los elementos de trabajo*).
2. *Estructura del costo y el ingreso (clasificación)*. Se hace la delineación de las categorías de costo e ingreso para las estimaciones de los flujos de efectivo en cada nivel de la EDT.
3. *Técnicas de estimación (modelos)*. Se usan modelos matemáticos seleccionados para estimar los costos e ingresos futuros durante el periodo de análisis.

Estos tres componentes básicos, junto con las etapas integradoras del procedimiento, proporcionan un enfoque organizado para desarrollar los flujos de efectivo de las alternativas.

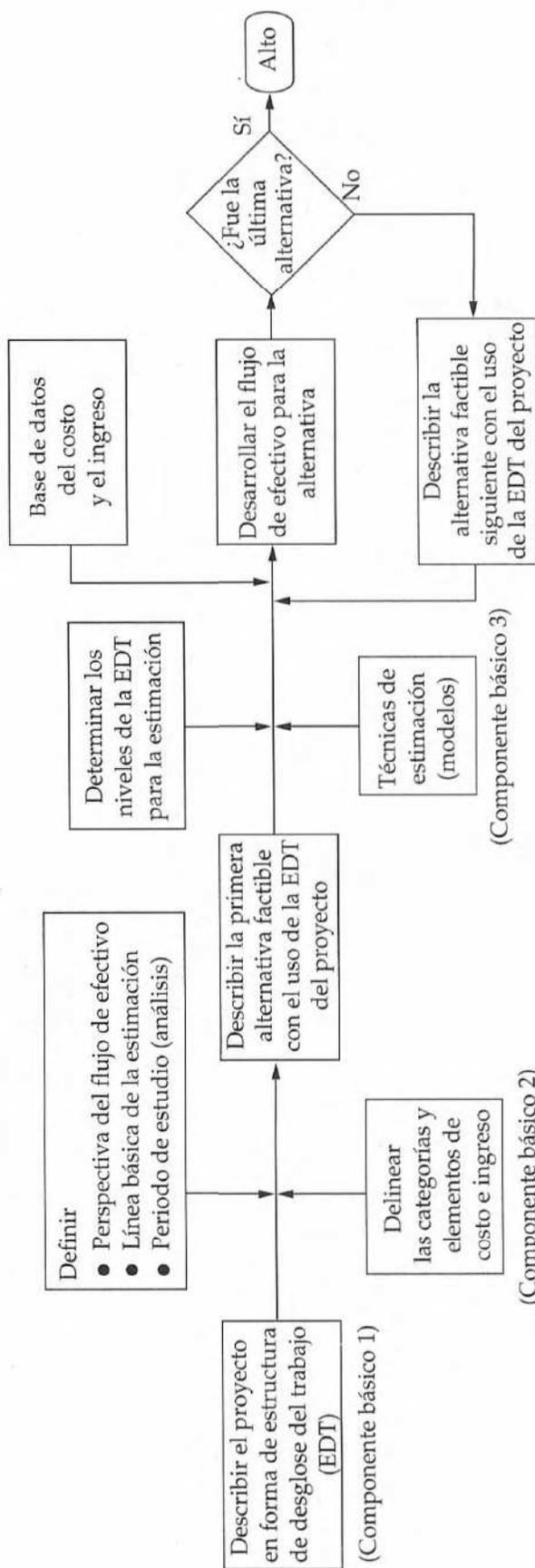


Figura 7.1 Enfoque integrado para desarrollar los flujos de efectivo de las alternativas

Como se aprecia en la figura 7.1, el enfoque integrado comienza con una descripción del proyecto en términos de una EDT. Esta EDT del proyecto se usa para describir al proyecto y las características únicas de cada alternativa en términos de diseño, mano de obra, requerimientos de material, etcétera. Luego, estas variaciones en diseño, requerimientos de recursos y otras características se reflejan en los costos e ingresos futuros estimados (flujo neto de efectivo) para la alternativa en cuestión.

Para estimar los costos e ingresos futuros de una alternativa, se debe establecer la perspectiva (punto de vista) del flujo de efectivo, y definir una línea base de estimación y periodo de análisis. Es normal que los flujos de efectivo se desarrollen desde el punto de vista del propietario.

El flujo neto de efectivo de una alternativa representa aquello que se supone va a ocurrir a los ingresos y costos futuros desde la perspectiva que se esté empleando. Por lo tanto, los cambios estimados en los ingresos y costos asociados con una alternativa tienen que ser relativos a una línea de base que se use en forma consistente para todas las alternativas que se estén comparando. Esta línea de base se define y se aplica en cualquiera de dos formas.

El primer método es el *enfoque del ingreso y costo totales*. Es decir, en el conjunto de alternativas se incluye de manera explícita la alternativa del no cambio (no hacer nada), y se estiman los ingresos y costos totales para ella. Así, cuando se usa el enfoque de la línea de base del costo e ingreso totales, el flujo neto de efectivo para la alternativa de no cambiar representa los ingresos y costos proyectados de la operación o situación actual. De un modo similar se estima el flujo neto de efectivo para cada una de las demás alternativas factibles.

El segundo método que se usa con frecuencia es el *enfoque diferencial*. Con el uso de éste, el flujo de efectivo de la alternativa de no cambiar se define como igual a cero sea o no una de las alternativas factibles. Entonces, el flujo de efectivo de las otras alternativas factibles representa las diferencias estimadas (cambios) en los ingresos y costos relativos a la situación actual (alternativa del no cambio).

Cualquiera que sea el enfoque de la línea base que se emplee en un estudio, debe aplicarse de modo consistente para todas las alternativas factibles. *Un error común es usar en forma inadvertida ambas definiciones de línea base cuando se desarrollan los flujos de efectivo individuales*. Por ejemplo, el enfoque del ingreso y costo totales es útil para estimar los costos de mantenimiento de la alternativa de no cambiar, pero en el resto de ellas dichos costos podrían estimarse considerando las diferencias a partir de las operaciones actuales.

Antes de desarrollar los flujos de efectivo, es necesario llevar a cabo otras etapas de procedimiento. En primer lugar, se debe decidir cuál(es) nivel(es) de la EDT se va(n) a usar para desarrollar las estimaciones de costo e ingreso. En esta decisión, un factor primordial será el propósito del estudio. Si el estudio es el análisis de factibilidad de un proyecto, la estimación del costo y el ingreso será menos exacta que para el análisis económico de detalle que se utilizaría para tomar la decisión final acerca de un proyecto. (Esto se analiza con más profundidad en la sección 7.2.3).

A continuación, hay que organizar la información de costo e ingreso que proviene de fuentes internas y externas a la organización, y ordenar los datos relevantes para el estudio. Estos datos se van a usar junto con las técnicas de estimación seleccionadas (modelos) para obtener las estimaciones.

7.2.1 La estructura de desglose del trabajo (EDT)

En la sección 7.2 se definió en forma breve una estructura de desglose del trabajo (estructura de los elementos del trabajo), y se identificó ésta como el componente fundamental en el enfoque integrado para desarrollar flujos de efectivo.

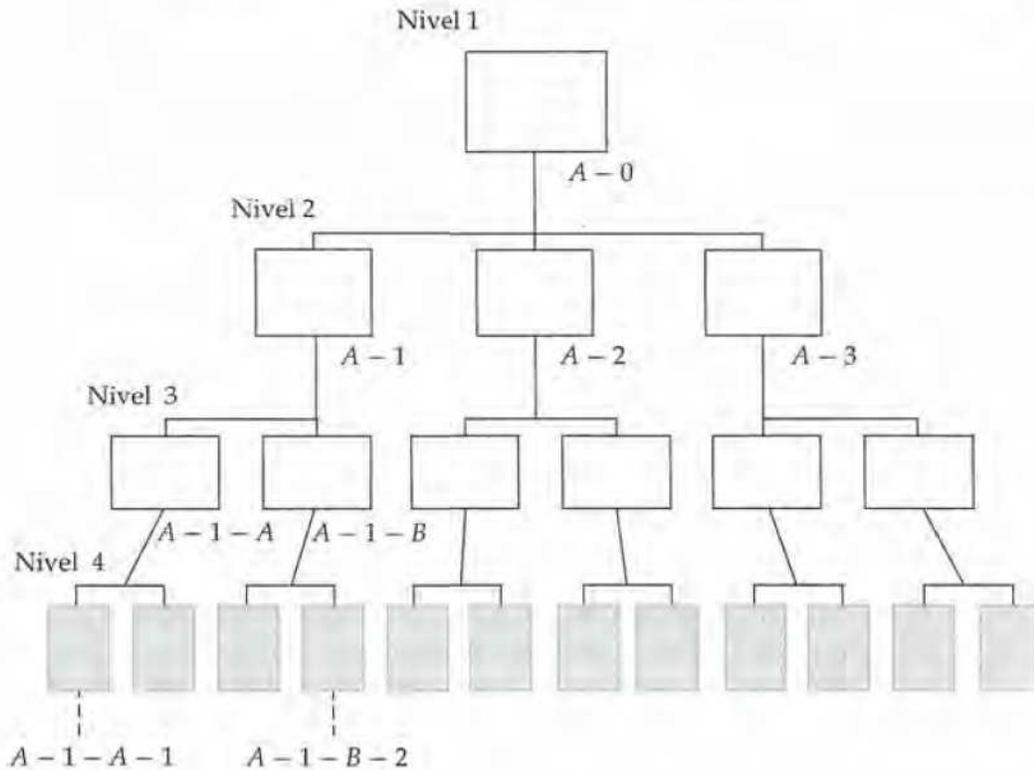


Figura 7.2 El diagrama EDT

La técnica EDT es una herramienta básica en la administración de proyectos, y es una ayuda fundamental en un estudio de ingeniería económica. La EDT sirve como marco de referencia para definir todos los elementos de trabajo del proyecto y las interrelaciones que guardan, para obtener y organizar información, desarrollar los datos relevantes de costo e ingreso, e integrar las actividades de administración del proyecto. Si no existe una EDT y el proyecto es de un tamaño mediano, el primer paso en la preparación de los flujos de efectivo debiera ser desarrollar una.

La EDT es esencial para garantizar que se incluyen todos los elementos de trabajo, eliminar duplicaciones y traslapes entre ellos, evitar actividades no relacionadas, e impedir la comisión de otra clase de errores que pudieran presentarse en el estudio. Para proyectos grandes, es frecuente que se prepare una definición de diccionario de la EDT para asegurar que cada elemento de trabajo de la jerarquía tenga una definición única.

La figura 7.2 muestra un diagrama de una estructura de desglose del trabajo típica de cuatro niveles. Se desarrolla desde la parte superior (nivel de proyecto) hacia la inferior en niveles de detalle sucesivos. El proyecto se divide en sus elementos de trabajo principales (nivel 2). Después se dividen estos elementos grandes para desarrollar el nivel 3, y así sucesivamente. Por ejemplo, un automóvil (primer nivel de la EDT) se divide en componentes de segundo nivel (o elementos de trabajo), tales como el chasis, transmisión y sistema eléctrico y, luego, subdividirse aún más cada componente del segundo nivel de la EDT en elementos del tercero. Por ejemplo, la transmisión puede subdividirse en componentes de tercer nivel tales como el motor, diferencial y flecha. Este proceso continúa hasta que se logra el detalle que se desea en la definición y descripción del proyecto o sistema.

Se dispone de diferentes esquemas de enumeración. Los objetivos que se persiguen al enumerar son indicar las relaciones que guardan en la jerarquía los elementos del trabajo, así como facilitar la manipulación e integración de los datos. El esquema que se ilustra en la figura 7.2 es un formato alfanumérico. Otro esquema que se emplea con frecuencia está constituido en su totalidad por números –nivel 1: 1.0; nivel 2: 1.1, 1.2, 1.3; nivel 3: 1.1.1, 1.1.2, 1.2.1, 1.2.2, 1.3.1, 1.3.2; y así sucesivamente (esto es similar a la organización de este libro). Por lo general, el nivel es igual (excepto para el nivel 1) al número de caracteres que indican el elemento de trabajo.

Otras características de la EDT de un proyecto son las siguientes:

1. En ella están incluidos elementos tanto de trabajo funcional (por ejemplo, planeación) como físico (por ejemplo, cimentación):
 - a) Los elementos de trabajo funcional son el apoyo logístico, administración del proyecto, mercadotecnia, ingeniería e integración de sistemas.
 - b) Los elementos de trabajo físico son las partes que conforman una estructura, producto, partes de equipo, sistema de armamento o elementos similares; para su producción o construcción se requiere mano de obra, materiales y otros recursos.
2. El contenido y requerimientos de recursos para un elemento de trabajo son la suma de las actividades y recursos de subelementos relacionados con aquél.
3. LA EDT de un proyecto, por lo general, incluye elementos de trabajo recurrentes (por ejemplo, mantenimiento) y no recurrentes (por ejemplo, construcción inicial).

EJEMPLO 7.1

Usted fue elegido por su compañía para dirigir un proyecto que implica la construcción de un edificio comercial pequeño de dos pisos, cada uno de los cuales mide 15,000 pies cuadrados. Se planea que la planta baja albergue tiendas de ventas al menudeo, y el segundo piso alojará oficinas. Desarrolle los tres primeros niveles de una EDT representativa que sea adecuada para todas las tareas del proyecto, desde el momento en que se toma la decisión, se diseña y construye el edificio, hasta que finaliza la ocupación inicial del inmueble.

SOLUCIÓN

Siempre habrá variaciones en las EDT de un edificio comercial desarrolladas por individuos diferentes. Sin embargo, en la figura 7.3 se muestra una EDT representativa de tres niveles. El nivel 1 es el proyecto total. En el nivel 2, el proyecto se divide en siete elementos de trabajo físico principales y tres elementos sobresalientes de trabajo funcional. A continuación se divide cada uno de estos elementos grandes en subelementos, según se requiera (nivel 3). El esquema de enumeración que se usa en este ejemplo es numérico en su totalidad.

7.2.2 La estructura del costo y el ingreso

El segundo componente básico del enfoque integrado para desarrollar flujos de efectivo (figura 7.1) es la estructura del costo y el ingreso. Esta estructura se emplea para identificar y categorizar los costos e ingresos que se necesita incluir en el análisis. Dentro de esta estructura se desarrollan y organizan datos detallados, para usarlos con las técnicas de estimación que se describen en la sección 7.3 con la finalidad de preparar las estimaciones de flujo de efectivo.

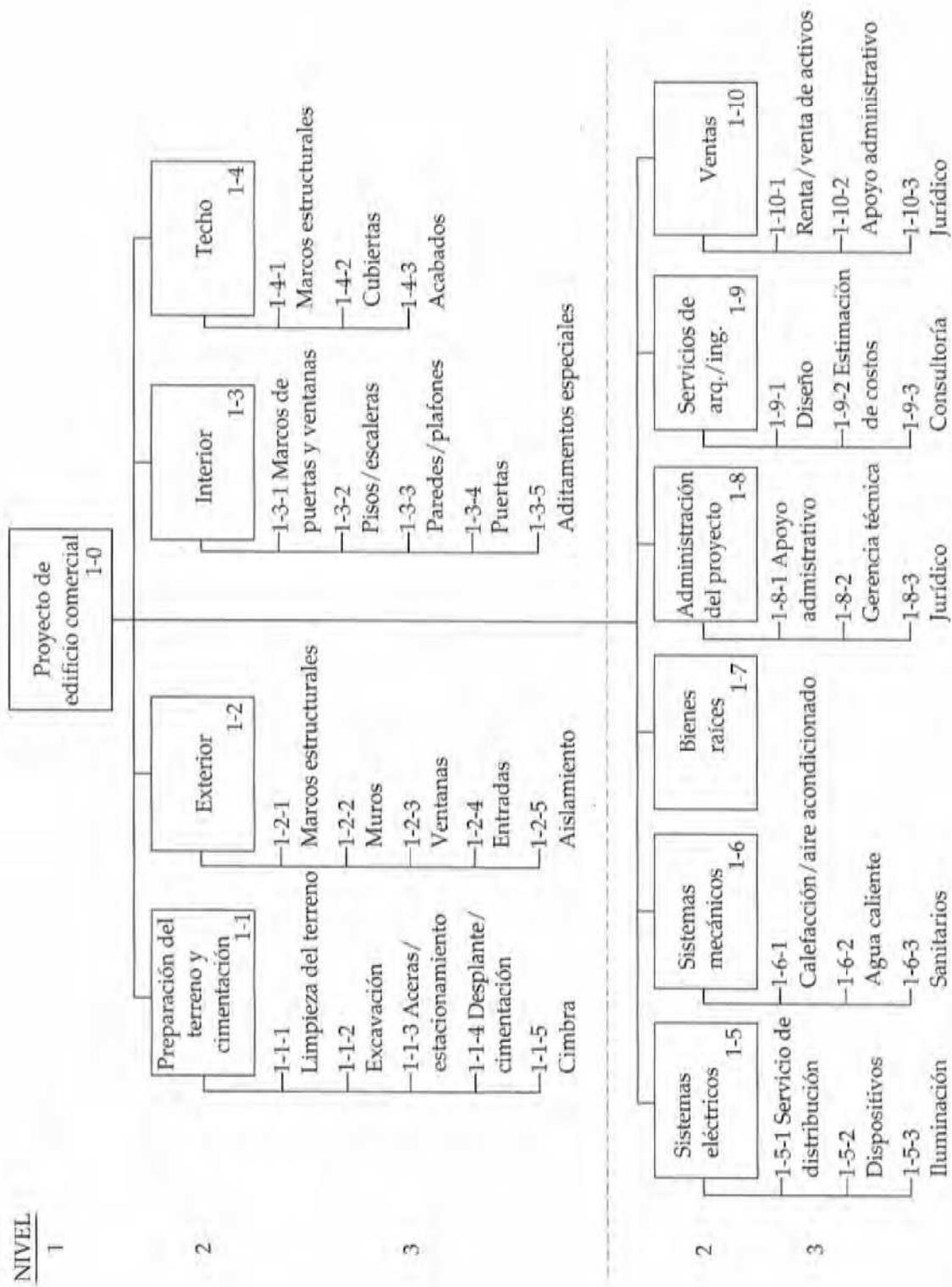


Figura 7.3 EDT (tres niveles) para el proyecto del edificio comercial del ejemplo 7.1

El concepto de ciclo de vida se estudió e ilustró en el capítulo 2. El ciclo de vida se dividió en dos periodos generales de tiempo: la fase de adquisición y la de operación. Comienza con la identificación inicial de la necesidad o deseo económico (el requerimiento) y termina con el retiro o la baja. Así, está pensado para que abarque todos los costos e ingresos futuros.

El concepto de ciclo de vida y la EDT son auxilios importantes en el desarrollo de la estructura de costo e ingreso de un proyecto. El ciclo de vida define un periodo máximo y establece un rango de elementos de costo e ingreso que necesitan considerarse en el desarrollo de los flujos de efectivo. La EDT concentra el esfuerzo del analista en los elementos específicos del trabajo funcional y físico de un proyecto, y en los costos e ingresos que implica.

Lo ideal es que el periodo de estudio de un proyecto sea igual al ciclo de vida del producto, estructura, sistema o servicio de que se trate. Esto permite que en la toma de decisiones se consideren por completo todos los costos e ingresos relevantes, tanto del presente como del futuro. Asimismo, el periodo de estudio lleva la atención a *la negociación explícita entre los costos iniciales en la fase de adquisición y todos los costos e ingresos posteriores durante la fase de operación.*

Sin embargo, la exactitud de las estimaciones de costo e ingreso disminuye con el incremento de la duración del periodo de estudio. Y con la prolongación de dicho periodo, también aumenta el esfuerzo que se requiere para desarrollar los flujos de efectivo. Entonces la selección de un horizonte de tiempo para el estudio debe hacerse con el equilibrio de estos factores y con el objetivo de brindar una base firme para la toma de decisiones.

Como se dijo antes, se requiere un buen criterio, basado en la situación de la decisión específica, para determinar el periodo de estudio y así decidir hasta dónde considerar el futuro para estimar los costos e ingresos en un estudio de ingeniería económica. Dicho criterio también debe ponderar cuáles elementos de costo e ingreso son los más importantes y merecen una atención más detallada, y cuáles otros, aun si se evaluaran de manera incorrecta, no producirían cambios significativos en los flujos de efectivo estimados.

Tal vez la fuente más seria de errores al desarrollar flujos de efectivo sea pasar por alto categorías importantes de costos e ingresos. Una manera conveniente de impedir dicha omisión es la estructura de costo e ingreso, preparada en forma de lista de verificación tabular. Para garantizar que la estructura esté completa, es esencial estar familiarizado técnicamente con el proyecto, al igual que con el uso del concepto de ciclo de vida y de la EDT al preparar aquélla.

A continuación se presenta una lista corta de algunas categorías de costos e ingresos que es típico que se necesiten en la realización de un estudio de ingeniería económica (algunos de estos términos se estudiaron en el capítulo 2):

- | | |
|---|--------------------------------------|
| 1. Inversión de capital (fijo y de trabajo) | 6. Costos de calidad (y desperdicio) |
| 2. Costos de mano de obra | 7. Costos indirectos |
| 3. Costos de materiales | 8. Costos por baja de activos |
| 4. Costos de mantenimiento | 9. Ingresos |
| 5. Impuestos sobre la propiedad y seguros | 10. Valores de rescate o mercado |

7.2.3 Técnicas de estimación (modelos)

El tercer componente básico del enfoque integrado (figura 7.1) comprende técnicas de estimación (modelos). Estas técnicas, junto con los datos detallados de costo e ingreso, se uti-

lizan para desarrollar estimaciones de flujos de efectivo individuales y del flujo neto de efectivo de cada alternativa.

El propósito de las estimaciones es desarrollar proyecciones de flujo de efectivo –no generar datos exactos acerca del futuro, lo cual es prácticamente imposible. No es de esperarse que una estimación preliminar u otra final sea exacta; en vez de ello, debe adaptarse en forma adecuada a lo que se necesite, a un costo razonable, y es frecuente que tenga una presentación en forma de rango de números.

Las estimaciones de costo e ingreso se clasifican como sigue, de acuerdo con el detalle, exactitud y uso que se pretenda darles:

1. *Estimaciones del orden de magnitud*: se usan en la etapa de planeación y evaluación inicial de un proyecto.
2. *Estimaciones de semidetalle o presupuesto*: se emplean en la etapa de diseño preliminar o conceptual de un proyecto.
3. *Estimaciones definitivas (de detalle)*: se utilizan en la etapa de ingeniería de detalle o construcción de un proyecto.

Las estimaciones del orden de magnitud se emplean en la selección de las alternativas factibles del estudio. Es frecuente que tengan una exactitud en el rango de ± 30 a 50% , y se desarrollan a través de medios semiformales tales como conferencias, cuestionarios y ecuaciones generalizadas que se aplican en el nivel 1 o 2 de la EDT.

Las estimaciones de presupuestos (semidetalladas) se compilan para dar apoyo a la tarea de diseño preliminar y toma de decisiones durante este periodo del proyecto. Por lo general, su exactitud está en el rango de $\pm 15\%$. Estas estimaciones difieren en el detalle del desglose del costo y el ingreso, y en la cantidad de trabajo que se dedica a su obtención. Normalmente, las ecuaciones de estimación se aplican en los niveles 2 y 3 de la EDT.

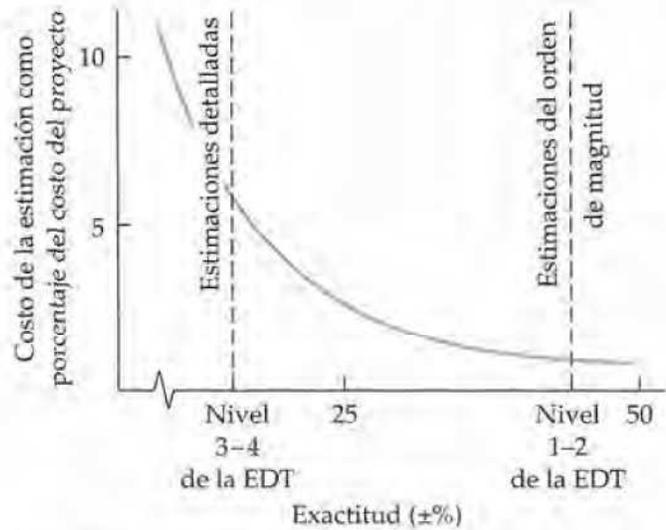
Las estimaciones de detalle se emplean como la base de los concursos y para tomar decisiones de diseño detallado. Su exactitud es de $\pm 5\%$. Se elaboran a partir de especificaciones, planos, visitas de campo, cuotas para vendedores y registros históricos internos; por lo general se efectúan en el nivel 3 y sucesivos de la EDT.

Así, resulta evidente que una estimación de costo o ingreso llega a variar desde un cálculo hecho por un experto “en una servilleta”, hasta un pronóstico muy detallado y exacto del futuro, elaborado por un equipo de proyecto. El nivel de detalle y exactitud de las estimaciones debiera depender de

1. El tiempo y capacidad disponible, según lo justifique la importancia del estudio.
2. Dificultad de estimar los conceptos en cuestión.
3. Métodos o técnicas que se emplean.
4. Calificación de quien(es) estima(n).
5. Sensibilidad de los resultados del estudio a factores particulares de las estimaciones.

Es común que cuanto más detalladas sean las estimaciones, la exactitud mejore, pero el costo de elaborarlas se incrementa en forma acentuada. Esta relación general se muestra en la figura 7.4; en ella se ilustra la idea de que las estimaciones de costo e ingreso deben prepararse con conocimiento completo de cuánta exactitud requiere un estudio en particular.

Figura 7.4 Exactitud de las estimaciones de costo e ingreso *versus* el costo de elaborarlas



Sin importar cómo se hagan las estimaciones, los individuos que las utilizan deben aceptar que contienen un error hasta cierto grado, aun si se usaron técnicas elaboradas de estimación para prepararlas. Sin embargo, los errores en la estimación se minimizan utilizando datos confiables y métodos de estimación apropiados.

7.2.3.1 Fuentes de los datos para la estimación El número de fuentes de información que son de utilidad en la estimación del costo y el ingreso es demasiado grande para enlistarlo por completo. Las cuatro siguientes son las principales y se mencionan en orden de importancia aproximado:

1. Registros de contabilidad.
2. Otras fuentes dentro de la empresa.
3. Fuentes externas a la empresa.
4. Investigación y desarrollo.

1. **Registros de contabilidad.** Es la fuente principal de información para el análisis económico; sin embargo, es frecuente que no tengan la forma apropiada para su uso directo y sin ajustes.

En el apéndice A se hace un análisis breve del proceso y la información contables. En su sentido más fundamental, la contabilidad consiste en una serie de procedimientos para mantener un registro detallado de las transacciones monetarias entre categorías establecidas de activos, cada una de las cuales tiene una interpretación aceptada que es útil para sus propios fines. Es frecuente que los datos que se generan durante la función contable no sean adecuados en forma inherente para los análisis económicos, no sólo porque se basan en resultados del pasado, sino también por alguna de las siguientes limitaciones:

- a) El sistema de contabilidad está dividido en categorías rígidas. Las categorías de los diferentes tipos de activos, obligaciones, utilidades netas, ingresos y gastos de una firma dada pueden ser perfectamente apropiadas para tomar decisiones operativas y hacer resúmenes financieros, pero es raro que sean apropiadas por completo para las necesidades del análisis económico y la toma de decisiones que implica el diseño de ingeniería y las alternativas de un proyecto.
- b) Las convenciones estándar de la contabilidad generan enunciados no apropiados de cierta clase de información financiera que se introduce al sistema. Estos enunciados tienden a basarse en la filosofía de que la administración debe evitar sobreestimar el

valor de sus activos, o subestimar el valor de sus obligaciones, y por lo tanto, debería evaluarlos en forma muy conservadora.

- c) Con frecuencia, los datos de contabilidad tienen precisión y autoridad implícita que son ilusorias. Aunque es una costumbre presentar los datos redondeados a la unidad monetaria o centavo más cercanos, los registros en general no tienen ni de cerca esa exactitud.

En resumen, los registros contables son una buena fuente de datos históricos, pero tienen algunas limitaciones cuando se usan para efectuar estimaciones prospectivas destinadas al análisis de la economía de la ingeniería. Más aún, es raro que los registros de contabilidad contengan enunciados directos acerca de los costos incrementales o los costos de oportunidad, ambos esenciales en la mayoría de los análisis de ingeniería económica.

2. **Otras fuentes dentro de la empresa.** La empresa típica tiene cierto número de personas y registros que constituyen fuentes excelentes de información para realizar estimaciones. Algunos ejemplos de funciones dentro de las empresas que mantienen registros útiles para el análisis económico son las de ingeniería, ventas, producción, calidad, compras y personal.
3. **Fuentes externas a la empresa.** Existen numerosas fuentes fuera de la compañía capaces de proporcionar información útil. El problema principal es determinar cuáles aportan el beneficio mayor para las necesidades específicas. A continuación se presenta una lista de algunas fuentes externas que se emplean en forma habitual:
 - a) **Información que se publica.** Los directorios técnicos, índices de compradores, publicaciones gubernamentales, libros de referencia y revistas comerciales ofrecen un cúmulo de información. Por ejemplo, *Standard and Poor's Industry Surveys* proporciona información mensual acerca de industrias clave. *The Statistical Abstract of the United States* es una fuente exhaustiva notable de índices y datos de costo. El Bureau of Labor Statistics edita muchas publicaciones periódicas que constituyen buenas fuentes de costos de mano de obra, tales como *Monthly Labor Review*, *Employment and Earnings*, *Current Wage Developments*, *Handbook of Labor Statistics* y *Chartbook on Wages, Prices and Productivity*. Por su parte, R. S. Means Company, con sede en Kingston, Massachusetts, publica cada año un manual de costos de la construcción, que incluye tamaños estándar de tornillos, precios unitarios y salarios que prevalecen en diversas regiones del país.
 - b) **Los contactos personales** son fuentes potenciales excelentes. Es frecuente que los vendedores, personal de ventas, amigos de la profesión, clientes, bancos, agencias del gobierno, cámaras de comercio e incluso los competidores accedan a proporcionar la información que se necesita, sobre la base de una solicitud seria y respetuosa.
4. **Investigación y desarrollo (ID).** Si la información no está publicada y no es posible obtenerla consultando a alguna persona, la única alternativa es emprender ID para generarla. Algunos ejemplos clásicos son el desarrollo de una planta piloto y la conducción de un programa de pruebas de mercado. Por lo general, estas actividades son caras y no siempre podrían tener éxito; así, esta etapa final sólo se emprende si hay decisiones muy importantes de por medio, y cuando se sabe que las fuentes mencionadas con anterioridad son inadecuadas.

La evaluación del mercado y el ambiente de negocios para proyectos grandes que requieren aportaciones nuevas de capital es un área importante de análisis, al igual que las estimaciones de ventas del proyecto, precios de los productos, etcétera. R. F. de la Mare brinda un buen resumen del estudio de los pronósticos económicos y el análisis de mercado

relacionados con grandes proyectos de inversión, así como de la incorporación de estimaciones de ingresos en los flujos de efectivo.*

7.2.3.2 Cómo se obtienen las estimaciones Las estimaciones se preparan de varias maneras, entre ellas las siguientes:

1. Una *conferencia* de varias personas de las que se piensa tienen información buena o bases para estimar la cantidad en cuestión. Una versión especial de esto es el *Método Delfi*, que incluye ciclos de preguntas y retroalimentación en los que las opiniones de los participantes individuales se guardan en el anonimato.
2. La *comparación* con situaciones o diseños similares de los que existe más información y de los que se extrapolan las estimaciones para las alternativas en consideración. A veces, esto se denomina *estimación por analogía*. El método de comparación se utiliza para aproximarse al costo de un diseño más complicado para un artículo nuevo. Esto se lleva a cabo suponiendo que el costo de un diseño más complicado de un artículo similar será igual al de éste, y se adopta como el límite superior; como límite inferior se establece el costo de un diseño menos complejo de diseño parecido. La aproximación que resulta podría no ser demasiado exacta, pero el método de comparación tiene la virtud de establecer límites que resultan útiles en la toma de decisiones.
3. El *uso de técnicas cuantitativas*, que no siempre tienen nombres estandarizados. En la sección siguiente se estudian algunas técnicas selectas cuyos nombres por lo general indican los enfoques que se emplean.

7.3 Técnicas selectas de estimación (modelos)

Los modelos de estimación que se estudian en esta sección son aplicables para obtener estimaciones del orden de magnitud y para muchas de semidetalle o presupuesto. Son útiles en la selección inicial de alternativas factibles para un análisis adicional y en la fase de diseño conceptual o preliminar de un proyecto. A veces, estos modelos se emplean en la fase de diseño detallado de un proyecto, con la finalidad de reducir el número de estimaciones de ingeniería que se basan en facturas de materiales, costos estándar y otra información de detalle.

7.3.1 Índices

Los costos y precios[†] varían con el tiempo por varias razones, entre las que se encuentran: 1. avances tecnológicos, 2. disponibilidad de mano de obra y materiales, y 3. inflación. Un *índice* es un número adimensional que indica cómo ha cambiado con el tiempo un costo o precio (casi siempre hacia arriba) con respecto a un año base. Los índices proporcionan un medio conveniente para desarrollar estimaciones presentes y futuras del costo y precio a partir de datos históricos. Una estimación del costo o precio de venta de un artículo en el año n se obtiene multiplicando el costo o precio del artículo en un punto anterior del

* R. F. de la Mare, *Manufacturing Systems Economics: The Life-Cycle Cost and Benefits of Industrial Assets* (London: Holt, Rinehart y Winston, 1982), págs. 123-149.

† Es frecuente usar los términos *costo* y *precio* como sinónimos. El costo de un producto o servicio es el total de los recursos, directos e indirectos, que se requieren para producirlo. El precio es el valor del bien o servicio en el mercado. En general, el precio es igual al costo más una utilidad.

tiempo (año k) por la razón del valor del índice en el año n (\bar{I}_n) al valor del índice en el año k (\bar{I}_k);* es decir,

$$C_n = C_k \left(\frac{\bar{I}_n}{\bar{I}_k} \right), \quad (7.1)$$

donde k = año de referencia (por ejemplo, 1996) para el que se conoce el costo o precio del artículo;

n = año para el que se va a estimar el costo o precio ($n > k$);

C_n = costo o precio estimado del artículo en el año n ;

C_k = costo o precio del artículo en el año de referencia k .

A veces se denomina a la ecuación (7.1) como la *técnica de la razón* de actualización de los costos y precios. El empleo de esta técnica permite que el costo o precio de venta potencial de algo se tome a partir de datos históricos con un año base específico y actualizado con el índice. Este concepto se aplica a los niveles inferiores de la EDT para estimar el costo de equipo, materiales y mano de obra, así como a los niveles superiores de la EDT para estimar el costo total del proyecto de una instalación nueva, puente, etcétera.

EJEMPLO 7.2

Cierto índice del costo de compra e instalación de calderas se refiere al año de 1974, en el que el valor base se fijó arbitrariamente como igual a 100. La compañía XYZ instaló una caldera de 50,000 lb/hr en 1996 por \$525,000, cuando el índice tenía un valor de 468. La misma empresa debe instalar otra caldera del mismo tamaño en 1999. El índice en 1999 es igual a 542. ¿Cuál es el costo aproximado de la caldera nueva?

SOLUCIÓN

En este ejemplo, n es 1999 y k es 1996. Según la ecuación (7.1), el costo aproximado de la caldera es

$$C_{1999} = \$525,000(542/468) = \$608,013.$$

Los índices pueden crearse para un artículo único o para varios. Para un solo artículo, el valor del índice es simplemente la razón del costo del artículo en el año corriente al costo del mismo artículo en el año de referencia, multiplicada por el factor del año de referencia (100, casi siempre). Un índice compuesto se crea promediando las razones de costos de artículos seleccionados, en un año en particular, al costo de los mismos artículos en un año de referencia. Quien desarrolle un índice puede asignar ponderaciones diferentes

* Sólo en esta sección se usará k para denotar el año de referencia.

a los artículos en el índice, de acuerdo con la contribución que tengan en el costo total. Por ejemplo, un índice general ponderado está dado por la siguiente expresión

$$\bar{I}_n = \frac{W_1(C_{n1}/C_{k1}) + W_2(C_{n2}/C_{k2}) + \dots + W_M(C_{nM}/C_{kM})}{W_1 + W_2 + \dots + W_M} \times \bar{I}_k, \quad (7.2)$$

donde

- M = número total de artículos en el índice ($1 \leq m \leq M$);
- C_{nm} = costo (o precio) unitario del artículo m -ésimo en el año n ;
- C_{km} = costo (o precio) unitario del artículo m -ésimo en el año k ;
- W_m = ponderación asignada al artículo m -ésimo;
- \bar{I}_k = valor del índice compuesto en el año k .

La suma de las ponderaciones W_1, W_2, \dots, W_M puede ser igual a cualquier número positivo, pero es frecuente que sumen 1.00 o 100. Casi cualquier combinación de mano de obra, materiales, productos, servicios, etcétera, se utiliza para un índice compuesto de costo o precio.

EJEMPLO 7.3

Con base en los datos siguientes, desarrolle un índice ponderado para el precio de un galón de gasolina en 1999, con 1986 como año de referencia, que tiene un índice cuyo valor es de 99.2. La ponderación asignada a la gasolina *regular sin plomo* es tres veces la de la *premium* o *sin plomo plus*, ya que en términos generales se vende el triple de *regular sin plomo* en comparación con la *premium* o *sin plomo plus*.

	Precio (centavos/galón) en el año		
	1986	1992	1999
Premium	114	138	120
Sin plomo plus	103	127	109
Regular sin plomo	93	117	105

SOLUCIÓN

En este ejemplo, k es 1986 y n es 1999. De la ecuación (7.2), el valor de \bar{I}_{1999} es

$$\frac{(1)(120/114) + (1)(109/103) + (3)(105/93)}{1 + 1 + 3} \times 99.2 = 109.$$

Ahora, si se estima que el índice en 2004, por ejemplo, es igual a 189, es sencillo determinar los precios correspondientes de la gasolina a partir de $\bar{I}_{1999} = 109$:

$$\text{Premium: } 120 \text{ centavos/galón} \left(\frac{189}{109} \right) = 208 \text{ centavos/galón,}$$

$$\text{Sin plomo plus: } 109 \text{ centavos/galón} \left(\frac{189}{109} \right) = 189 \text{ centavos/galón,}$$

$$\text{Regular sin plomo: } 105 \text{ centavos/galón} \left(\frac{189}{109} \right) = 182 \text{ centavos/galón,}$$

Se publican muchos índices en forma periódica, inclusive el *Engineering News Record Construction Index*, que incorpora costos de mano de obra y materiales, y el índice de costos Marshall and Stevens. El *Statistical Abstract of the United States* publica índices del gobierno de Estados Unidos acerca de los costos anuales de materiales, mano de obra y construcción. El Bureau of Labor Statistics publica el *Producer Prices and Price Indexes* y el *Consumer Price Index Detailed Report*. En los estudios de ingeniería económica es frecuente que se usen índices de cambios de costo y precio.

7.3.2 Técnica unitaria

La *técnica unitaria* implica el uso de un “factor por unidad” que se estima con eficiencia. Algunos ejemplos son los siguientes:

- Costo de capital de planta por kilowatt de capacidad
- Ingresos por milla
- Costo de combustible por kilowatt-hora generado
- Ahorros anuales por cada 500 horas de operación
- Costo de capital por teléfono instalado
- Ingresos por cliente atendido
- Pérdida de temperatura por cada 1,000 pies de tubería de vapor
- Costo de operación por milla
- Ingresos por caso
- Costo de mantenimiento por hora
- Costo de construcción por pie cuadrado
- Ingresos por cada mil libras

Tales factores, cuando se multiplican por la unidad apropiada, arrojan una estimación del costo total, ahorros o ingresos.

Como ejemplo sencillo, suponga que se necesita una estimación preliminar del costo de una casa particular. Con el uso de un factor unitario, digamos de \$55 por pie cuadrado, y si se sabe que la casa tiene aproximadamente 2,000 pies cuadrados, se estima que su costo sería de $\$55 \times 2,000 = \$110,000$.

Si bien la técnica unitaria es muy útil para fines de estimación preliminar, los valores promedio que se obtienen llegan a ser erróneos. En general, los métodos más detallados producirán una exactitud mayor de la estimación.

7.3.3 Técnica del factor

La *técnica del factor* es una extensión del método unitario, dentro de una estrategia básica de segmentación, en la que se suma el producto de varias cantidades o componentes y se agrega a cualesquiera componentes estimados en forma directa. Es decir,

$$C = \sum_d C_d + \sum_m f_m U_m, \quad (7.3)$$

donde C = costo que se desea estimar;

C_d = costo del componente seleccionado d que se estima en forma directa;

f_m = costo por unidad del componente m ;

U_m = número de unidades del componente m .

Como un ejemplo sencillo, suponga que se necesita obtener una estimación algo refinada del costo de una residencia que consta de 2,000 pies cuadrados, dos porches y una cochera. La estimación total se calcula empleando un factor unitario de \$50 por pie cuadrado, \$5,000 por porche y \$8,000 por cochera, para los dos componentes directos de la estimación:

$$(\$5,000 \times 2) + \$8,000 + (\$50 \times 2,000) = \$118,000.$$

La técnica del factor es de utilidad en particular cuando la complejidad de la situación por estimar no requiere una EDT, pero están implicadas diferentes partes. Esta técnica se ilustra con el ejemplo 7.4, y con otro que estima el costo por medio del producto que se presentará en la sección 7.5.1.

EJEMPLO 7.4

El diseño detallado del edificio comercial que se describió en el ejemplo 7.1 implica la utilización de la superficie bruta (y por lo tanto, del espacio por arrendar neto) disponible en cada nivel. Asimismo, el tamaño y localización del estacionamiento y el frente del inmueble hacia la vialidad primaria podrían ofrecer algunas fuentes adicionales de ingresos. Como gerente del proyecto, analice las consecuencias potenciales que tendrían en los ingresos las consideraciones siguientes.

El primer piso del edificio tiene 15,000 pies cuadrados de espacio para ventas y el segundo tiene el mismo espacio para uso de oficinas. Después de discutir con el equipo de ventas, se tiene la siguiente información:

1. El espacio al menudeo debe diseñarse para dos usos diferentes: 60% para la operación de un restaurante (ocupación = 79%) y 40% para una tienda de ropa al menudeo (ocupación = 83%).
2. Existe una probabilidad elevada de que todo el espacio para oficinas del segundo nivel se rente a un cliente (ocupación = 89%).
3. Se estima que pueden rentarse 20 lugares de estacionamiento a largo plazo, a dos negocios existentes adyacentes a la propiedad. Asimismo, puede arrendarse el espacio sobre la fachada de la vialidad primaria a una compañía de publicidad para que instale un anuncio espectacular, sin que esto afecte el uso principal de la propiedad.

SOLUCIÓN

Con base en esta información, el ingreso anual del proyecto (\hat{R}) se estima como

$$\hat{R} = W(r_1)(12) + Y(r_2)(12) + \sum_{j=1}^3 S_j(u_j)(d_j),$$

donde W = número de lugares de estacionamiento;
 Y = número de anuncios;
 r_1 = tarifa mensual por lugar de estacionamiento = \$22;
 r_2 = tarifa mensual por anuncio = \$65;
 j = índice del tipo de uso de espacio inmobiliario;
 S_j = espacio (pies cuadrados brutos) que se dedican al uso j ;
 u_j = factor de utilización del espacio j (% arrendable neto);
 d_j = tasa por pie cuadrado (arrendable) por año de espacio inmobiliario usado para el propósito j .

Entonces,

$$\begin{aligned}\hat{R} &= [20(\$22)(12) + 1(\$65)(12)] + [9,000(0.79)(\$23) \\ &\quad + 6,000(0.83)(\$18) + 15,000(0.89)(\$14)] \\ \hat{R} &= \$6,060 + \$440,070 = \$446,130.\end{aligned}$$

El desglose del ingreso estimado anual del proyecto del ejemplo 7.4 muestra que

- el 1.4% proviene de fuentes diversas de ingreso,
- el 98.6% proviene de la renta de espacio inmobiliario.

Desde la perspectiva del diseño detallado, se calculan con facilidad los cambios en el ingreso anual del proyecto debidos a cambios en factores de utilización del espacio inmobiliario. Por ejemplo, una mejora del 1% en promedio en la razón de espacio arrendable a los pies cuadrados brutos cambiaría el ingreso anual en la forma siguiente:

$$\begin{aligned}\Delta \hat{R} &= \sum_{j=1}^3 S_j(u_j + 0.01)(d_j) - (\$446,130 - \$6,060) \\ &= \$445,320 - \$440,070 \\ &= \$5,250 \text{ por año.}\end{aligned}$$

7.4 Estimación paramétrica de costos

La estimación paramétrica de costos es el uso de datos históricos de costos y de técnicas estadísticas para predecir costos futuros. Las técnicas estadísticas se usan para desarrollar relaciones de estimación de costos (REC) que ligan el costo o precio de un concepto (por ejemplo, producto, bien, servicio o actividad) con una o más variables independientes (es decir, guías de costo). Hay que recordar, a partir del capítulo 2, que las guías de costo son variables de diseño a las que se debe una gran parte del comportamiento del costo total. La tabla 7.1 enumera varios conceptos y sus guías de costo asociadas. La técnica unitaria

Tabla 7.1 Ejemplos de guías de costo que se emplean en la estimación paramétrica de costos

Producto	Guía de costo (variable independiente)
Construcción	Espacio útil, área superficial del techo, área superficial de muros
Camiones	Peso vacío, peso bruto, caballos de fuerza
Autobús de pasajeros	Peso de especificación, número de ejes, lugares para pasajeros, caballos de fuerza
Turbina	Empuje máximo, empuje de crucero, consumo de combustible específico
Motor recíproco	Desplazamiento de pistones, razón de compresión, caballos de fuerza
Lámina metálica	Peso neto, número de agujeros barrenados, número de remaches que contiene
Aeronave	Peso vacío, velocidad, superficie de sustentación
Locomotora diesel	Caballos de fuerza, peso, velocidad de crucero
Barcos	Volumen
Nave espacial	Peso
Plantas de energía eléctrica	Kilowatts
Motores	Caballos de fuerza
Computadoras	Megabytes
Software	Número de líneas de código
Documentación	Páginas
Motores a reacción	Libras de empuje

que se describió en la sección anterior es un ejemplo sencillo de estimación paramétrica de costos.

Los modelos paramétricos se emplean en las etapas iniciales del diseño para tener una idea de cuánto costará el producto (o proyecto) con base en unos cuantos atributos físicos (tales como peso, volumen y potencia). Los resultados de los modelos paramétricos (una estimación del costo) se usan para medir el impacto de las decisiones de diseño en el costo total. Es esencial no perder de vista el efecto que tienen las decisiones del diseño de ingeniería en el costo total, con la finalidad de desarrollar un producto que tenga éxito tanto desde el punto de vista técnico como económico.

Existen varias técnicas estadísticas y matemáticas para desarrollar las relaciones de estimación de costos. Por ejemplo, en el desarrollo de relaciones de estimación es frecuente usar modelos de regresión lineal simple y múltiple, que son métodos estadísticos estándar para estimar el valor de una variable dependiente (la cantidad que se desconoce) como función de una o varias variables independientes. Esta sección describe dos relaciones de estimación de uso común, la técnica de ajuste exponencial y la curva de aprendizaje, y a continuación se expone el panorama del procedimiento que se emplea para desarrollar REC.

7.4.1 Técnica de ajuste de potencias

La *técnica de ajuste de potencias*, que en ocasiones recibe el nombre de *modelo exponencial*, se utiliza con frecuencia para desarrollar estimaciones de inversiones de capital para plantas

y equipos industriales. Esta REC supone que el costo varía en función del cambio de la capacidad o el tamaño elevado a alguna potencia. Es decir,

$$\frac{C_A}{C_B} = \left(\frac{S_A}{S_B} \right)^X,$$

$$C_A = C_B \left(\frac{S_A}{S_B} \right)^X, \quad (7.4)$$

donde $\left. \begin{array}{l} C_A = \text{costo de la planta A} \\ C_B = \text{costo de la planta B} \end{array} \right\}$ (ambas en \$ del momento para el que se desea la estimación);

$\left. \begin{array}{l} S_A = \text{tamaño de la planta A} \\ S_B = \text{tamaño de la planta B} \end{array} \right\}$ (ambas en las mismas unidades físicas);

$X = \text{factor de capacidad de costo para reflejar las economías de escala.}^*$

El valor del factor de la capacidad de costo dependerá del tipo de planta o equipo para el que se estima. Por ejemplo, $X = 0.68$ para plantas de generación de energía nuclear, y 0.79 para plantas a base de combustibles fósiles. Observe que $X < 1$ indica economías de escala decrecientes (cada unidad adicional de capacidad cuesta menos que la previa), en cambio $X > 1$ [†] indica economías de escala crecientes, (cada unidad adicional de capacidad cuesta más que la unidad anterior), y $X = 1$ indica una relación de costo lineal como función del tamaño.

EJEMPLO 7.5

Suponga que se desea hacer una estimación preliminar del costo de construcción de una planta de generación de energía a base de combustibles fósiles, de 600 MW. Se sabe que el costo de una planta de 200 MW fue de \$100 millones hace 20 años, cuando el índice de costo aproximado era de 400; ahora dicho índice es de 1,200. El factor de capacidad de costo para una planta de energía de combustibles fósiles es de 0.79.

SOLUCIÓN

Antes de usar el modelo de potencias para estimar el costo de la planta de 600 MW (C_A), primero se debe usar la información del índice de costo para traer el costo conocido de la planta de 200 MW de hace 20 años a su costo actual. Empleando la ecuación (7.1) se encuentra que el costo hoy de una planta de 200 MW es de

$$C_B = \$100 \text{ millones} \left(\frac{1,200}{400} \right) = \$300 \text{ millones.}$$

^{*} Puede calcularse o estimarse a partir de la experiencia, con el uso de técnicas estadística. Véase W. R. Park, *Cost Engineering Analysis* (New York: John Wiley & Sons, 1973), pág. 137, para factores típicos.

[†] Las piedras preciosas son un ejemplo de economías de escala crecientes. Por ejemplo, es común que un diamante de un quilate cueste más que cuatro diamantes de un cuarto de quilate cada uno.

Ahora, con la ecuación (7.4) se obtiene la estimación siguiente para la planta de 600 MW:

$$C_A = \$300 \text{ millones} \left(\frac{600\text{-MW}}{200\text{-MW}} \right)^{0.79}$$

$$C_A = \$300 \text{ millones} \times 2.38 = \$714 \text{ millones.}$$

Observe que la ecuación (7.4) se utiliza para estimar el costo de una planta más grande (como en el ejemplo 7.5) o el de una más pequeña. Así, suponga que se necesita estimar el costo de construir una planta de 100 MW. Empleando la ecuación (7.4) y los datos para la planta de 200 MW del ejemplo 7.5 se halla que el costo hoy de una planta de 100 MW es de

$$C_A = \$300 \text{ millones} \left(\frac{100\text{-MW}}{200\text{-MW}} \right)^{0.79}$$

$$C_A = \$300 \text{ millones} \times 0.58 = \$174 \text{ millones.}$$

7.4.2 Aprendizaje y mejora

Una *curva de aprendizaje* es un modelo matemático que explica el fenómeno del aumento de la eficiencia de un trabajador y de la mejora del rendimiento de una organización a partir de la producción repetida de un producto o servicio. A la curva de aprendizaje a veces se le llama *curva de experiencia*, o *función del progreso de la manufactura*; en lo fundamental, se trata de una relación de estimación. El primer lugar en que se observó la curva de aprendizaje (mejora) fue en las industria aérea y aeroespacial, con respecto a las horas de trabajo por unidad.* Sin embargo, se aplica a muchas situaciones diferentes. Por ejemplo, el efecto de la curva de aprendizaje se utiliza en la estimación de horas profesionales que dedica un equipo de ingeniería a la realización de diseños detallados sucesivos dentro de una familia de productos, así como para estimar las horas de trabajo que se requieren para ensamblar automóviles.

El concepto básico de las curvas de aprendizaje es que algunos de los insumos (por ejemplo, costos de la energía, horas de trabajo, costos de material, horas de ingeniería) disminuyen por unidad de salida, conforme se incrementa el número de unidades. La mayoría de las curvas de aprendizaje se basan en el supuesto de que ocurre una reducción porcentual constante en, por ejemplo, las horas de trabajo, conforme el número de unidades producidas se *duplica*. De esta forma, si se necesitan 100 horas de trabajo para producir la primera unidad y se supone una curva de aprendizaje del 90%, entonces se requerirán $100(0.9) = 90$ horas de trabajo para producir la segunda unidad. En forma similar, se necesitarán $100(0.9)^2 = 81$ horas de trabajo para producir la cuarta unidad; $100(0.9)^3 = 72.9$ para producir la octava; y así sucesivamente. Por lo tanto, una curva de aprendizaje del 90% ocasiona una reducción del 10% en las horas de trabajo cada vez que se duplica la cantidad que se produce.

* T. P. Wright, "Factors Affecting the Cost of Airplanes", *Journal of Aeronautical Sciences*, vol. 3, núm. 4 (febrero de 1936).

La suposición de que ocurre una reducción porcentual constante en la cantidad de un insumo que se emplea (por unidad de salida), cada vez que se duplica el número de unidades producidas, permite construir un modelo matemático para la función de aprendizaje (mejora). Sean

u = número de unidades de salida,

Z_u = número de unidades del insumo necesario para producir la unidad de salida número u ,

K = número de unidades de insumo que se requieren para producir la primera unidad de salida,

s = parámetro de pendiente de la curva de aprendizaje, expresado en forma decimal (para una curva de aprendizaje del 90%, $s = 0.9$).

Entonces,

$$Z_u = K(s^a), \quad \text{donde } a = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Así,

$$\log Z_u - \log K = a(\log s).$$

Como $u = 2^a$,

$$\log u = a(\log 2),$$

o bien,

$$a = \frac{\log Z_u - \log K}{\log s} = \frac{\log u}{\log 2}$$

y

$$\log Z_u - \log K = n(\log u), \quad \text{donde } n = \frac{\log s}{\log 2}.$$

Ahora, al tomar antilogaritmos en ambos lados, resulta

$$\frac{Z_u}{K} = u^n,$$

o bien,

$$Z_u = K(u^n). \tag{7.5}$$

EJEMPLO 7.6

El departamento de Ingeniería Mecánica tiene un equipo de estudiantes para diseñar una auto de carreras para una competencia nacional. El tiempo que necesitó el equipo para ensamblar el primer carro fue de 100 horas. Su mejora (o tasa de aprendizaje) es de 0.8, lo que significa que cada vez que se duplica su salida, el tiempo de ensamble se reduce en un 20%. Utilice esta información para determinar *a*) el tiempo que tomará al equipo ensamblar el décimo carro, *b*) el *tiempo total* que se necesita para ensamblar los primeros 10 autos, y *c*) el tiempo de ensamble *promedio acumulado* para los primeros 10 autos.

SOLUCIÓN

a) A partir de la ecuación (7.5) y suponiendo una disminución proporcional en el tiempo de ensamble de las unidades de salida entre las cantidades duplicadas, se tiene que

$$\begin{aligned} Z_{10} &= 100(10)^{\log 0.8 / \log 2} \\ &= 100(10)^{-0.322} \\ &= \frac{100}{2.099} = 47.6 \text{ horas.} \end{aligned}$$

b) El tiempo total para producir x unidades, T_x , está dado por

$$T_x = \sum_{u=1}^x Z_u = \sum_{u=1}^x K(u^n) = K \sum_{u=1}^x u^n. \quad (7.6)$$

Al emplear esta ecuación (7.6), se observa que

$$T_{10} = 100 \sum_{u=1}^{10} u^{-0.322} = 100[1^{-0.322} + 2^{-0.322} + \dots + 10^{-0.322}] = 631 \text{ horas.}$$

c) El tiempo promedio acumulado para x unidades, C_x , está dado por

$$C_x = T_x/x. \quad (7.7)$$

Con la ecuación (7.7), se obtiene

$$C_{10} = T_{10}/10 = 631/10 = 63.1 \text{ horas.}$$

EJEMPLO 7.7

La Betterbilt Construction Company diseña y construye viviendas residenciales unifamiliares. El gerente de compras de la empresa ha desarrollado una estrategia con la que todos los materiales de construcción para una casa se compran a un solo gran proveedor, pero se organiza un concurso entre unas cuantas compañías para seleccionar al proveedor para cada vivienda.

La compañía está a punto de construir, en secuencia, 16 casas nuevas de 2,400 pies cuadrados cada una. Se usará el mismo diseño básico, con cambios sin importancia, para todas. La oferta ganadora por los materiales de construcción para la primera residencia es de \$64,800, que es igual a \$27 por pie cuadrado. El gerente de compras cree que, con base en experiencias anteriores, es posible emprender varias acciones para reducir el costo de los materiales en un 8% cada vez que se duplique el número de viviendas. Con base en esta información, a) ¿cuál es el costo promedio acumulado de los materiales por pie cuadrado para las primeras cinco casas?, y b) ¿cuál es el costo estimado de los materiales por pie cuadrado para la última (decimosexta) residencia?

SOLUCIÓN

- a) Con base en la tasa de disminución constante del 8% cada vez que se duplica el número de casas, se debe aplicar una curva de aprendizaje del 92% a esta situación. En la tabla siguiente se desarrolla el costo promedio acumulado de los materiales para las primeras cinco viviendas (suponiendo una disminución proporcional del costo de los materiales para las casas entre las cantidades duplicadas):

(A) Casa	(B) Costo ^a de materiales por ft ²	(C) Suma acumulada	(D) = (C) ÷ (A) Costo promedio acumulado por ft ²
1	\$27.00	\$27.00	\$27.00
2	24.84	51.84	25.92
3	23.66	75.50	25.17
4	22.85	98.35	24.59
5	22.25	120.60	24.12

^a De la ecuación (7.5); por ejemplo $Z_3 = \$27(3)^{\log 0.92/\log 2} = \23.66 .

- b) De la ecuación (7.5) se obtiene

$$\begin{aligned}
 Z_{16} &= \$27(16)^{\log 0.92/\log 2} \\
 &= \$27(16)^{-0.1203} \\
 &= \frac{\$27}{1.3959} = \$19.34 \text{ por pie cuadrado.}
 \end{aligned}$$

7.4.3 Desarrollo de una relación de estimación de costos (REC)

Una relación de estimación de costos (REC) es un modelo matemático que describe el costo de un proyecto de ingeniería como función de una o más variables de diseño. Las REC son herramientas útiles porque permiten al analista desarrollar la estimación del costo en forma rápida y fácil. Más aún, es factible realizar las estimaciones al inicio del proceso de diseño, antes de que se cuente con información detallada. Como resultado, los ingenieros se valen de las REC para tomar decisiones de diseño que son económicas en costo, además de que satisfacen los requerimientos técnicos.

Para desarrollar una REC se siguen cuatro etapas:

1. Definición del problema
2. Obtención y normalización de datos
3. Desarrollo de la ecuación de la REC
4. Validación del modelo y documentación

7.4.3.1 Definición del problema El primer paso en cualquier estudio de ingeniería es definir el problema que se enfrenta. Un problema bien definido es mucho más fácil de resolver. Para fines de la estimación del costo, una forma excelente de describir los elementos de un problema es la EDT. La revisión de la EDT terminada también ayuda a identificar las guías de costo potenciales para el desarrollo de las REC.

7.4.3.2 Obtención y normalización de datos Esto constituye la etapa más crítica del desarrollo de una REC. Existe un adagio común en la actualidad que dice “entra basura, sale basura”. Sin datos confiables, las estimaciones de costo que se obtengan con la REC carecerán de significado. La EDT también es útil en la fase de obtención de datos. La EDT ayuda a organizar los datos y a garantizar que no se pase por alto ningún elemento.

Los datos pueden recopilarse tanto de fuentes internas como externas. Los costos de proyectos similares del pasado son una de las fuentes de datos. Otra fuente es la información publicada acerca de costos. Sea cual sea la fuente de procedencia, es importante que se encuentren disponibles datos técnicos, además de los de costo, que describan las características físicas y el rendimiento del sistema. Por ejemplo, si el peso del producto es una guía de costo potencial, es esencial que se conozcan los pesos asociados con los datos de costo.

Una vez recopilados, los datos deben normalizarse para que tomen en cuenta las diferencias que se deben a la inflación, localización geográfica, tarifas de mano de obra, etcétera. Por ejemplo, los índices de costo o las técnicas que se van a describir en el capítulo 8 se emplean para normalizar costos que ocurren en momentos diferentes. Otra parte importante del proceso de normalización es la definición consistente de los datos.

7.4.3.3 Desarrollo de la ecuación de la REC El paso que sigue en la obtención de una REC consiste en formular una ecuación que refleje con acierto la relación entre la(s) guía(s) de costo seleccionada(s) y el costo del proyecto. En la tabla 7.2 aparecen cuatro tipos de ecuaciones generales de uso común en el desarrollo de una REC. En dichas ecuaciones, a , b , c y d son constantes, mientras que x_1 , x_2 y x_3 representan variables de diseño.

Una forma sencilla pero muy efectiva de determinar la forma que tiene la ecuación apropiada para la REC es trazar la gráfica de los datos. Si la gráfica de los datos en papel normal parece seguir una línea recta, entonces se sugiere usar una relación lineal. Si aparece una línea curva, entonces hay que graficar los datos en papel logarítmico o semilogarítmico. Si en este último aparece una línea recta, entonces la relación es logarítmica o exponencial. Si en el papel logarítmico aparece una línea recta, la relación es una curva de potencias.

Una vez que se ha determinado la forma básica de la ecuación para la REC, el paso que sigue es calcular los valores de los coeficientes que aparecen en ella. La técnica más común que se emplea para obtener los valores de los coeficientes es el método de los mínimos cuadrados. Este método, en lo fundamental, trata de determinar la línea recta alrededor de la cual se agrupan los datos y que minimiza la desviación total de los datos reales de los valores que predice la recta. (La línea en sí, representa la REC.) Este método es relativamente fácil de efectuar en forma manual, aunque también está disponible en muchos paquetes comerciales de software. (La mayoría de programas de hojas de cálculo tienen la

Tabla 7.2 Formas típicas de ecuaciones

Tipo de relación	Ecuación general
Lineal	Costo = $a + bx_1 + cx_2 + dx_3 + \dots$
Potencia	Costo = $a + bx_1^c x_2^d \dots$
Logarítmica	Costo = $a + b \log(x_1) + c \log(x_2) + \dots$
Exponencial	Costo = $a + b \exp^{cx_1} \exp^{dx_2} \dots$

capacidad de realizar el ajuste de datos por mínimos cuadrados.) El requerimiento principal para usar el método de mínimos cuadrados es que haya una relación lineal entre la variable independiente (la guía de costo) y la variable dependiente (proyección de costo).*

Todas las ecuaciones que tienen alguna forma de las que aparecen en la tabla 7.2 pueden transformarse con facilidad a forma lineal. Es posible emplear las ecuaciones siguientes para calcular los valores de los coeficientes a y b en la ecuación lineal simple $y = a + bx$:

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}, \quad (7.8)$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - b \sum_{i=1}^n x_i}{n}. \quad (7.9)$$

Observe que la variable n en las ecuaciones de pronóstico es igual al número de los datos que se empleen para obtener los valores de a y b .

EJEMPLO 7.8

En las primeras etapas del diseño, se cree que el costo de una nave espacial se relaciona con su peso. Se obtuvieron y normalizaron datos de costo y peso de seis naves espaciales, los cuales se presentan en la tabla que sigue. Una gráfica de los datos sugiere que siguen una relación lineal. Determine los valores de los coeficientes para la REC.

Aeronave	Peso (lb)	Costo (millones de \$)
i	x_i	y_i
1	400	278
2	530	414
3	750	557
4	900	689
5	1,130	740
6	1,200	851

SOLUCIÓN

En este problema, $n = 6$. La tabla siguiente facilita los cálculos intermedios que se necesitan para calcular los valores de a y b por medio de las ecuaciones (7.8) y (7.9).

* Además, las observaciones deben ser independientes. Se supone que la diferencia entre los valores que se predicen y los reales tiene una distribución normal con media igual a cero. Más aún, la varianza de la variable dependiente se supone que es igual para cada valor de la variable independiente.

i	x_i	y_i	x_i^2	$x_i y_i$
1	400	278	160,000	111,200
2	530	414	280,900	219,420
3	750	557	562,500	417,750
4	900	689	810,000	620,100
5	1,130	740	1,276,900	836,200
6	1,200	851	1,440,000	1,021,200
Totales	4,910	3,529	4,530,300	3,225,870

$$b = \frac{(6)(3,225,870) - (4,910)(3,529)}{(6)(4,530,300) - (4,910)^2} = \frac{2,027,830}{3,073,700} = 0.6597,$$

$$a = \frac{3,529 - (0.6597)(4,910)}{6} = 48.31.$$

La REC resultante que relaciona el costo de la aeronave (en millones de dólares) con el peso de ésta es

$$\text{Costo} = 48.31 + 0.6597x.$$

donde x representa al peso de la nave en libras, y $400 \leq x \leq 1,200$.

7.4.3.4 Validación y documentación del modelo Una vez que se ha desarrollado la ecuación de la REC, es necesario determinar qué tan bien predece el costo (esto es, la validación del modelo) y documentar el desarrollo y el uso apropiado de la REC. La validación puede llevarse a cabo por medio de medidas estadísticas de la "bondad del ajuste", tales como el error estándar y el coeficiente de correlación. Los analistas deben usar medidas de la bondad del ajuste para inferir qué tan bien predice la REC al costo como función de la(s) guía(s) de costo seleccionadas. Es importante documentar el desarrollo de la REC para su uso futuro, así como incluir en la documentación los datos que se emplearon para desarrollarla y los procedimientos con los que se normalizaron los datos.

El error estándar (SE)* mide el promedio de variación entre los valores de costo real y los que predice la ecuación. El SE se calcula con

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \text{Costo}_i)^2}{n}}, \quad (7.8)$$

donde Costo_i es el costo predicho por la REC con los valores de la variable independiente para el dato i , mientras que y_i es el costo real. Es preferible que el valor del error estándar sea pequeño.

El coeficiente de correlación (R) mide la cercanía de los puntos que representan a los datos reales con respecto a la línea de regresión ($y = a + bx$). Se trata simplemente de la razón de la desviación explicada a la desviación total.

* N. del T: El empleo de las siglas SE para denotar el error estándar está muy extendido en el ejercicio de la estadística y la ingeniería.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]}} \quad (7.11)$$

donde $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ y $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$. El signo (+ o -) de R será el mismo que tenga la pendiente (b) de la recta de regresión. Son deseables los valores de R cercanos a uno (o menos uno), porque indican una relación lineal fuerte entre las variables dependiente e independiente.

En los casos en que no queda claro cual es la “mejor” guía de costo para seleccionar la forma más adecuada de la ecuación, conviene usar las mediciones de la bondad del ajuste para hacer la elección.

En general, si todo lo demás queda igual, debe seleccionarse la REC con mejor medida de la bondad del ajuste.

EJEMPLO 7.9

Calcule el SE y el coeficiente de correlación de la REC que se obtuvo en el ejemplo 7.8.

SOLUCIÓN

La REC que se construyó en el ejemplo 7.8 relaciona el costo de una nave espacial con su peso por medio de la ecuación

$$\text{Costo} = 48.31 + 0.6597x.$$

Si se emplea esta ecuación, se predice el costo de las seis naves cuyo peso se conoce:

i	x_i	y_i	Costo $_i$	$(y_i - \text{Costo}_i)^2$	$(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(y_i - \bar{y})^2$
1	400	278	312.19	1,168.96	129,753.42	174,999.99	96,205.43
2	530	414	397.95	257.60	50,218.44	83,134.19	30,335.19
3	750	557	543.09	193.49	2,129.85	4,668.99	971.57
4	900	689	642.04	2,205.24	8,234.79	6,669.99	10,166.69
5	1,130	740	793.77	2,891.21	47,320.86	97,138.19	23,052.35
6	1,200	851	839.95	122.10	100,314.33	145,671.99	69,079.61
Totales	4,910	3,529	3,528.99	6,838.60	337,971.69	512,283.34	229,810.84

Observe que $\bar{x} = \frac{1}{6}(4,910) = 818.33$ y $\bar{y} = \frac{1}{6}(3,529) = 588.17$. Con las ecuaciones (7.10) y (7.11) es posible calcular el SE y el coeficiente de correlación de la REC:

$$SE = \sqrt{\frac{6,638.60}{6}} = 33.76,$$

$$R = \frac{337,971.69}{\sqrt{(512,283.34)(229,810.84)}} = 0.985.$$

El valor del coeficiente de correlación está muy cerca de uno, lo que indica una relación lineal positiva fuerte entre el costo de la nave y su peso.

En resumen, las REC son útiles por varias razones. En primer lugar, una vez que se dispone de los datos de entrada que se requieren, pueden usarse en forma rápida y fácil. En segundo lugar, una REC por lo general necesita información poco detallada, lo que posibilita usarla en el principio del proceso de diseño. Por último, una REC es un predictor excelente del costo si se desarrolló en forma correcta con el empleo de datos históricos buenos.

7.5 La estimación de costos en el proceso de diseño

Las empresas de hoy enfrentan el problema de proporcionar bienes y servicios de calidad a precios competitivos. El precio de su producto se basa en el costo conjunto de fabricar el artículo más una utilidad integrada. Para asegurarse de que los productos se vendan a precios competitivos, el costo debe ser un factor principal en el proceso de diseño del producto. Como se mencionó en el prefacio del libro, un producto bien diseñado podría no generar ninguna utilidad si no es factible económicamente. (Hay que recordar el triciclo compuesto de mil dólares.) Para que un producto tenga valor para un cliente, los beneficios deben sobrepasar a los costos.

En esta sección se estudiará tanto un enfoque de “abajo-arriba”, como otro de “arriba-abajo”, para determinar los costos y el precio de venta de un producto. Cuando se usan en conjunto con los conceptos de costo objetivo, diseño por costo e ingeniería del valor, estas técnicas auxilian a los ingenieros en el diseño de sistemas efectivos en costo y de productos de precio competitivo.

http://www

Sitio Web de consulta (<http://www.pearsoneducacion.net/sullivan>): La estimación del costo de un intercambiador de calor implica el cálculo de un costo base, así como costos de instalación, operación y mantenimiento: un *costo del ciclo de vida*. Visite el sitio Web para que observe comparaciones de estimaciones de costo para tipos alternativos de intercambiadores de calor. Se incluye una hoja de cálculo para que el lector pueda desarrollar las estimaciones de costo para sus diseños propios.

7.5.1 Los elementos del costo del producto y la estimación de “abajo-arriba”

Como se estudió en el capítulo 2, los costos del producto se clasifican en directos e indirectos. Los directos se asignan con facilidad a un producto específico, mientras que los indirectos no son tan sencillos de asignar a cierto producto. Por ejemplo, la mano de obra directa consistiría en los salarios de un operador de máquina, en tanto que la supervisión sería un trabajo indirecto.

Los costos de manufactura tienen una relación distinta con el volumen de producción, en cuanto a que pueden ser fijos, variables o semivARIABLES. Por lo general, los costos de administración son fijos sin importar el volumen; los costos de materiales varían en forma directa con el volumen; y el costo del equipo es una función escalón del nivel de producción.

Los costos principales dentro de la categoría de gastos de manufactura comprenden la ingeniería y el diseño, costos de desarrollo, herramientas, mano de obra fabril, materiales, supervisión, control de calidad, confiabilidad y pruebas, empaque, costos indirectos de la planta, generales y administrativos, distribución y mercadotecnia, finanzas, impuestos y seguros. ¿Por dónde comenzar?

Los costos de ingeniería y diseño consisten en diseño, análisis y dibujo, junto con gastos diversos tales como reproducción de documentos.

El costo de ingeniería puede asignarse a un producto sobre la base del número de horas de trabajo de ingeniería que implica. Otros tipos principales de costo que se estiman son los siguientes:

- Costos de herramientas, que consisten en la reparación y mantenimiento más el costo de cualquier equipo nuevo.
- Costos de mano de obra fabril, que se determinan a partir de datos estándar, registros históricos o el departamento de contabilidad. Es frecuente que se usen las curvas de aprendizaje para estimar la mano de obra directa.
- Costos de materiales, que se obtienen de registros históricos, cuotas de vendedores y la factura de los materiales. Deben incluirse las tolerancias de desperdicios.
- Supervisión, que es un costo fijo que se basa en los salarios del personal de supervisión.
- Indirectos de la planta, incluye las instalaciones, mantenimiento y reparaciones. Como se estudió en el capítulo 2 y el apéndice A, existen varios métodos para asignar los indirectos, tales como la proporción a las horas de mano de obra directa u horas-máquina.
- Costos generales y administrativos, que a veces se incluyen dentro de los indirectos de la planta.

Es común que las compañías utilicen un procedimiento de “abajo-arriba” para estimar el costo total del producto, que las ayuda a tomar decisiones acerca de qué producir y cómo poner precio a sus productos. Se emplea el término de “abajo-arriba” porque el procedimiento requiere estimaciones de elementos de costo a los niveles inferiores de la estructura de costos, que después se suman para obtener el costo total del producto. El ejemplo sencillo que sigue muestra el procedimiento general abajo-arriba para obtener una estimación del costo unitario del producto, además de que ilustra el empleo de un formato típico de hoja de cálculo de la estructura de costos para preparar la estimación.

La hoja de cálculo de la figura 7.5 muestra la determinación del costo de un ensamble estrangulador. En el apéndice 7.A se proporcionan las fórmulas para las celdas de EXCEL. La columna A incluye elementos de costo típicos que contribuyen al costo total del producto. La lista de elementos de costo se modifica con facilidad para satisfacer las necesidades de la empresa. Esta hoja de cálculo permite estimaciones unitarias (columna B), estimaciones por factor (columna C) y estimaciones directas (columna D). Los renglones sombreados son subtotales seleccionados.

Con frecuencia, los costos de mano de obra directa se estiman por medio de la técnica unitaria. El plan del proceso de manufactura se emplea para estimar el número de horas de mano de obra directa por unidad producida. Después se multiplica esta cantidad por la tarifa de la mano de obra compuesta para obtener el costo directo total de la mano de obra. En este ejemplo se requieren 36.48 horas de mano de obra directa para producir 50 ensambles de estranguladores, y la tarifa de la mano de obra compuesta es de \$10.54 por hora, lo que arroja un costo directo total de mano de obra de \$384.50.

Los costos indirectos, tales como el control de calidad y el trabajo de planeación, se asignan con frecuencia a los productos individuales con el empleo de estimaciones por factor. Las estimaciones se obtienen expresando el costo como porcentaje de otro costo. En este ejemplo, el trabajo de planeación y control de calidad se expresan como el 12 y 11% del costo directo de la mano de obra (renglón A), respectivamente. Esto da un costo total por mano de obra de \$472.93. Los gastos indirectos fabricación y los generales y administrativos se estiman como porcentajes del costo total de la mano de obra (fila D).

En la columna D se colocan las entradas para los elementos de costo para los que se dispone de estimaciones. El costo total de materiales para la producción de los 50 ensambles de estranguladores es de \$167.17. Se aplica una estimación directa de \$28.00 a la manufactura externa de los componentes que la requieren. Hasta este momento, el subtotal de los elementos de costo es de \$1,235.62.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2	Columna A		Columna B		Columna C		Columna D	Columna E
3			Estimación unitaria		Estimación por factor		Estimación	Total del
4			Unidad	Costo/Unidad	Factor	del renglón	directa	renglón
5								
6	A: Mano de obra fabril		36.48	\$10.54				\$384.50
7	B: Mano de obra de planeación				12%	A		46.14
8	C: Control de calidad				11%	A		42.29
9	D: TOTAL DE MANO DE OBRÁ							473.93
10	E: Indirectos fabriles				105%	D		496.58
11	F: Gastos generales y admin.				15%	D		70.94
12	G: Material de producción						\$167.17	167.17
13	H: Manufactura externa						28	28
14	I: SUBTOTAL							1,235.93
15	J: Costos de empaque				5%	I		61.78
16	K: TOTAL DE COSTO DIRECTO							1,297.41
17	L: Otros cargos directos				1%	K		12.97
18	M: Renta de instalaciones							
19	N: TOTAL DE COSTO DE MANUFACTURA							1,310.38
20	O: Cantidad (tamaño del lote)							50
21	P: COSTO UNITARIO DE MANUFACTURA							26.21
22	Q: Utilidad/por ciento				10%	P		2.62
23	R: PRECIO DE VENTA POR UNIDAD							\$28.83

Figura 7.5 Hoja de cálculo para estimar los costos de manufactura

Los costos de empaque se estiman como el 5% de todos los costos anteriores (renglón I), lo que da un cargo directo total de \$1,297.41. El costo de otros cargos directos varios se calcula como el 1% del subtotal actual (renglón K). Esto genera un costo total de manufactura de \$1,310.38 para el lote completo de 50 ensambles de estrangulador. El costo de manufactura por ensamble es de $\$1,310.38/50 = \26.21 .

Como se dijo antes, en esta misma sección, el precio de un producto se basa en el costo conjunto de fabricar el producto más una utilidad integrada a aquél. La parte inferior de la hoja de cálculo de la figura 7.5 muestra el cálculo del precio de venta unitario con base en esta estrategia. En este ejemplo, la utilidad deseada (que con frecuencia se denomina utilidad marginal) es del 10% del costo unitario de manufactura, que corresponde a una utilidad de \$2.62 por ensamble estrangulador. El precio de venta total de un ensamble estrangulador es, entonces, de $\$26.21 + \$2.62 = \$28.83$.

Como ya se mencionó, es frecuente emplear las curvas de aprendizaje para estimar los costos directos de mano de obra. El ejemplo que sigue ilustra cómo se utilizaron las curvas de aprendizaje para obtener las horas de mano de obra fabriles de los ensambles de estrangulador.

EJEMPLO 7.10

Se define un lote de 50 ensambles de estrangulador como una unidad producida. Las 36.48 horas de fabricación que se usaron para estimar el costo del ensamble de estrangulador se basan en la decimosexta unidad producida. Si se supone una curva de aprendizaje del 90%, ¿cuál es el número de horas de mano de obra fabril que se requieren para el primer lote de 50 ensambles de estrangulador? ¿Cuál es la estimación de las horas de mano de obra necesarias para producir las unidades números 64 y 1000 (es decir, lotes)?

SOLUCIÓN

Sea K = número de horas de mano de obra que se requieren para producir el primer lote de ensambles de estrangulador. A partir de la ecuación (7.5) se tiene que

$$Z_{16} = K(16)^{\log 0.9 / \log 2},$$

$$36.48 = K(16)^{-0.152},$$

$$K = 55.6 \text{ hr.}$$

Así, la estimación de 36.48 horas se obtuvo con base en el hecho de que tomó 55.6 horas ensamblar el primer lote de equipos de estrangulación. Con $K = 55.6$, es fácil estimar el tiempo necesario para producir las unidades números 64 y 100:

$$Z_{64} = 55.6(64)^{-0.152} = 29.54 \text{ hr.}$$

$$Z_{100} = 55.6(100)^{-0.152} = 27.61 \text{ hr.}$$

7.5.2 Costo objetivo y diseño por costo: enfoque de “arriba-abajo”

Por tradición, las empresas estadounidenses obtienen una estimación inicial del precio de venta de un producto nuevo empleando el enfoque de abajo-arriba que se describió en la sección anterior. Es decir, el precio de venta estimado se obtiene mediante la acumulación de los costos fijos y las variables relevantes, para luego agregar una utilidad marginal, la cual es un porcentaje de los costos totales de manufactura. Es frecuente denominar a este proceso como *diseño por precio*. Después, el departamento de mercadotecnia se basa en el precio de venta estimado para determinar si el producto nuevo puede venderse.

En contraste, las compañías japonesas aplican el concepto de *costo objetivo*, que es un enfoque de arriba-abajo. La esencia del costo objetivo es “cuánto *debe* costar el producto”, en lugar de “cuánto *cuesta* el producto”. La finalidad del costo objetivo es diseñar los costos de los productos antes de que entren al proceso de manufactura. En este enfoque de arriba-abajo, se ve al costo como un insumo del proceso de diseño, no como un resultado de éste.

Como se aprecia en la figura 7.6, el costo objetivo se inicia con la realización de estudios de mercado para determinar el precio de venta del producto del mejor competidor. El costo objetivo se obtiene con la deducción de la utilidad que se desea del precio de venta del mejor competidor:

$$\text{Costo objetivo} = \text{precio del competidor} - \text{utilidad que se desea} \quad (7.12)$$

Como se dijo en la sección anterior, la utilidad que se desea se expresa con frecuencia como un porcentaje del costo total de manufactura, y se le llama utilidad marginal. Para un margen específico de utilidad (por ejemplo, 10%), el costo objetivo se calcula con la siguiente ecuación:

$$\text{Costo objetivo} = \frac{\text{precio del competidor}}{(1 + \text{utilidad marginal})} \quad (7.13)$$

Este costo objetivo se obtiene antes del diseño del producto, y se emplea como meta para el diseño de ingeniería, compras y producción.

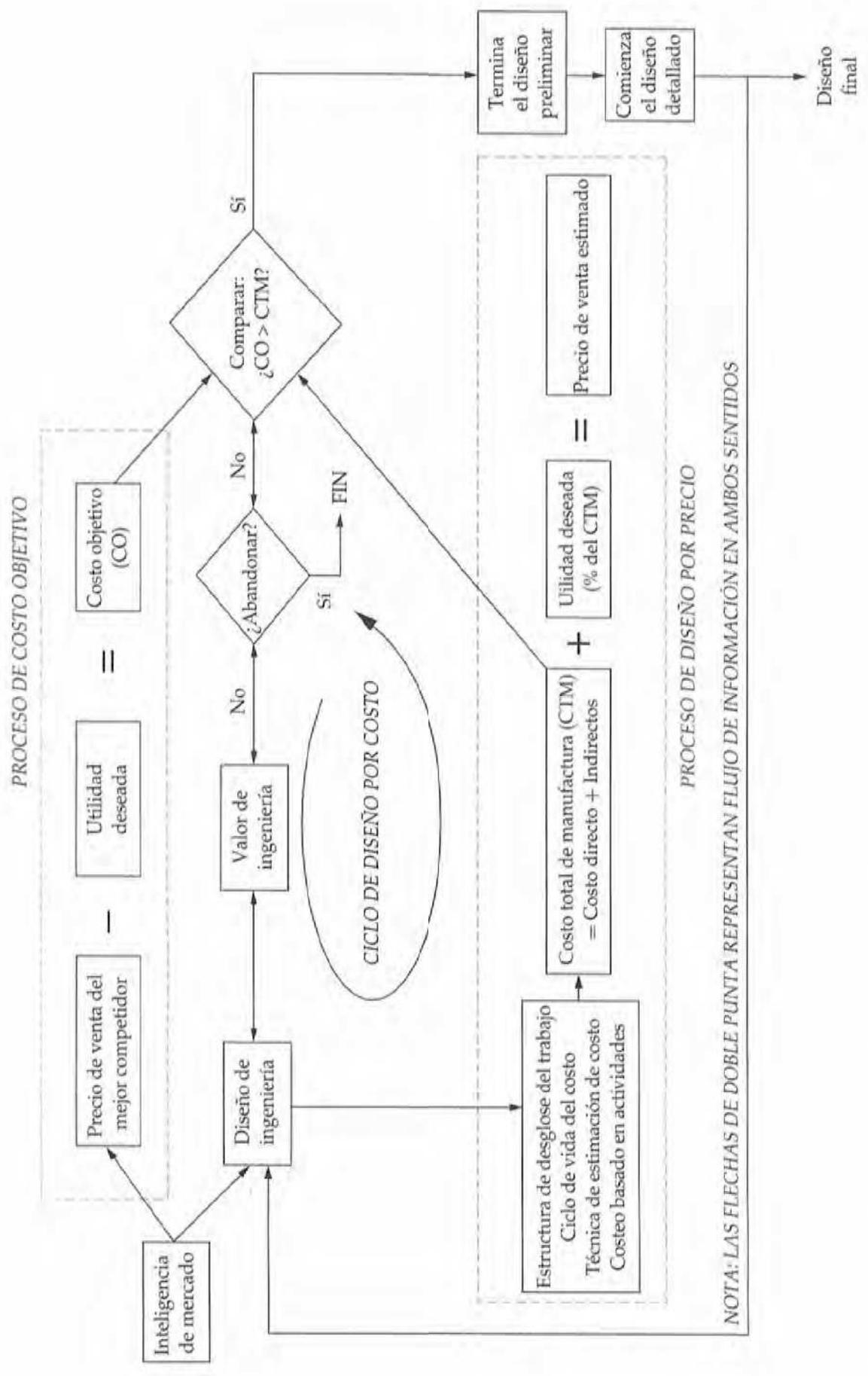


Figura 7.6 El concepto de costo objetivo y su relación con el diseño

EJEMPLO 7.11

En relación con los ensambles de estrangulador que se mencionaron en el ejemplo anterior, suponga que un estudio de mercado afirma que el precio de venta del mejor competidor es de \$27.50 por ensamble. Si se desea una utilidad marginal del 10% (con base en el costo total de manufactura), determine un costo objetivo para el ensamble de estrangulador.

SOLUCIÓN

Como la utilidad que se desea se ha expresado como un porcentaje de los costos totales de manufactura, se utiliza la ecuación (7.13) para determinar el costo objetivo:

$$\text{Costo objetivo} = \frac{\$27.50}{(1 + 0.10)} = \$25.00.$$

Observe que el costo total de manufactura que se calculó en la figura 7.5 es igual a \$26.21 por ensamble. Como este costo excede al objetivo, se necesita efectuar el rediseño del producto o del proceso de fabricación para alcanzar un precio de venta competitivo.



Sitio Web de consulta (<http://www.pearsoneducacion.net/sullivan>): La desconstrucción de computadoras implica desarmar computadoras anticuadas, renovarlas y donar o revender las unidades. Sin embargo, existen ciertos desechos o componentes residuales que no pueden reutilizarse, son dañinos para el ambiente y aumentan el costo de la desconstrucción. Visite el sitio Web para conocer dos aplicaciones del *costeo objetivo* que analizan asuntos implicados en el reciclado de computadoras.

Como se dijo antes, el *costeo objetivo* tiene lugar antes de que comience el proceso de diseño. Los ingenieros consideran el costo objetivo como un requerimiento del rendimiento del costo. Ahora, el producto final debe satisfacer tanto los requerimientos técnicos como los del rendimiento del costo. Se denomina *diseño por costo* a la práctica de considerar al rendimiento del costo tan importante como el rendimiento técnico durante el proceso de diseño. El procedimiento del diseño por costo comienza al considerar el costo objetivo como la meta de costo del producto terminado. Luego se descompone este costo objetivo en metas de costo para los subsistemas principales, componentes y subensambles. Dichas metas de costo cubrirían los costos objetivos directos de los materiales y mano de obra. Es frecuente que las metas de costo no se establezcan para las categorías de costos indirectos tales como generales y administrativos. Es importante observar que deben establecerse metas de costo razonables. Si las metas de costo son demasiado fáciles de alcanzar, los diseñadores tendrán escasa motivación para buscar la mejor alternativa. Por el contrario, si son demasiado difíciles de lograr, la gente se sentirá desanimada.

Una vez establecidas las metas de costo, se inicia el diseño de ingeniería preliminar. En la preparación de la proyección de costo total de manufactura de abajo-arriba que se

estudió en la sección anterior, se utilizan herramientas convencionales tales como la estructura desglosada del trabajo y la estimación de costos. El costo total de manufactura representa una evaluación *inicial* de lo que costaría a la empresa diseñar y fabricar el producto en estudio. Después se compara el costo total de manufactura con el costo objetivo de arriba-abajo. Si el costo de manufactura es mayor que el objetivo, entonces debe aplicarse al diseño el *proceso de ingeniería del valor* (que se estudiará en la sección 7.5.3) para evaluar la funcionalidad del diseño y tratar de reducir su costo. Este proceso iterativo es una característica clave del procedimiento de diseño por costo. Si el costo total de manufactura puede disminuirse para quedar por debajo del costo objetivo, el proceso de diseño continúa hacia el diseño detallado y termina con el diseño final que se va producir. Si el costo total de la manufactura no puede disminuirse hasta alcanzar el costo objetivo, la compañía debe considerar con seriedad la posibilidad de abandonar el producto.

La hoja de cálculo que aparece en la figura 7.7 ilustra el uso de la estimación del costo de manufactura para calcular tanto el costo objetivo como las reducciones de costo necesarias para lograrlo. Según los cálculos del ejemplo 7.11, el costo objetivo del ensamblaje de estrangulador es de \$25.00. Como el costo inicial total de la manufactura (que en la figura 7.5 se determinó en \$26.21) es mayor que el costo objetivo, se debe regresar al costo total de manufactura para cambiar los valores del elemento (uno a la vez) de costo seleccionado hasta el nivel que se requiera para reducir el costo y llegar al objetivo que se desea. Este método de establecer costos objetivos nuevos para los elementos individuales se obtiene por ensayo y error (mediante la manipulación de los valores que aparecen en la hoja de cálculo) o con el uso de la herramienta llamada "solver" de algún paquete de cómputo (si se cuenta con él). La figura 7.7 ilustra un resultado posible de este proceso. Si el proceso de ensamblar los estranguladores pudiera hacerse más eficiente de manera que los requerimientos de la mano de obra directa total pudieran reducirse a 34.48 horas (en lugar de 36.48), podría alcanzarse el costo objetivo. Ahora el objetivo es encontrar una forma

A	B	C	D	E	F	G	H
2	Columna A	Columna B		Columna C		Columna D	Columna E
3		Estimación unitaria		Estimación por factor		Estimación	Total del
4	ELEMENTOS DE COSTO DE MANUFACTURA	Unidad	Costo/Unidad	Factor del renglón		directa	renglón
5							
6	A: Mano de obra fabril	34,48	\$10,54				\$363,42
7	B: Mano de obra de planeación			12%	A		43,61
8	C: Control de calidad			11%	A		39,98
9	D: TOTAL DE MANO DE OBRA						447,01
10	E: Indirectos de fabricación			105%	D		469,36
11	F: Gastos generales y admin.			15%	D		67,05
12	G: Material de producción					\$167,17	167,17
13	H: Manufactura externa					28,00	28,00
14	I: SUBTOTAL						1,178,53
15	J: Costos de empaque			5%	I		58,93
16	K: TOTAL DE COSTO DIRECTO						1,237,51
17	L: Otros cargos directos			1%	K		12,38
18	M: Renta de instalaciones						
19	N: TOTAL DE COSTO DE MANUFACTURA						1,249,89
20	O: Cantidad (tamaño del lote)						50
21	P: COSTO UNITARIO DE MANUFACTURA						25,00
22							
23	Precio de venta del competidor	\$27,50					
24	Rendimiento que se desea sobre las ventas	10%					
25	Costo objetivo	\$25,00					

Figura 7.7 Estimación del costo de manufactura y costeo objetivo

de reducir los requerimientos de mano de obra directa, por medio del rediseño ya sea del producto o del proceso.

EJEMPLO 7.12

Dado un costo total actual de manufactura de \$26.21, como se muestra en la figura 7.5, calcule una meta de costo para el material de producción que permitiría alcanzar un costo objetivo de \$25.00.

SOLUCIÓN

Con el uso de la hoja de cálculo de la figura 7.5 como punto de partida, un enfoque para determinar una meta de costo para el material de producción sería cambiar en forma iterativa el valor que se introduce en la celda del renglón G y la columna D, hasta que se obtenga el costo total de manufactura que se desea, es decir \$25.00. La tabla siguiente muestra una serie de costos para el material de producción y el costo resultante total de la manufactura por ensamble:

Costo del material de producción por cada 50 ensambles	Costo total de manufactura por ensamble
\$167.17	\$26.21
150.00	25.84
140.00	25.63
130.00	25.42
120.00	25.21
110.00	25.00

Como se aprecia en la tabla, un costo de \$110 del material de producción por lote de 50 ensambles generaría un costo total de manufactura de \$25.00, que es el costo objetivo. A continuación se deja que los ingenieros de diseño determinen si podría usarse un material diferente y menos costoso, o si pueden hacerse mejoras en el proceso con la finalidad de reducir el desperdicio de material. Otra posibilidad sería negociar con el proveedor del material un precio de compra nuevo, o bien, buscar a otro.

También hubiera podido emplearse la herramienta llamada "solver" que se incluye en la mayoría de los paquetes de hoja de cálculo. La figura 7.8 muestra el resultado de este enfoque.

En el apéndice 7.B se da un ejemplo adicional de costeo objetivo.

7.5.3 Ingeniería del valor

En esta sección se hace la introducción a la ingeniería del valor (IV). El objetivo de la IV es muy parecido al del diseño por costo. La finalidad de la IV es proporcionar las funciones que se requieren del producto a un costo mínimo. La IV necesita el examen detallado de

A	B	C	D	E	F	G	H
2	Columna A	Columna B		Columna C		Columna D	Columna E
3		Estimación unitaria		Estimación por factor		Estimación	Total del
4	ELEMENTOS DE COSTO DE MANUFACTURA	Unidad	Costo/Unidad	Factor del renglón		directa	renglón
5							
6	A: Mano de obra fabril	36,48	\$10,54				\$384,50
7	B: Mano de obra de planeación			12%	A		46,14
8	C: Control de calidad			11%	A		42,29
9	D: TOTAL DE MANO DE OBRA						472,93
10	E: Indirectos de fabricación			105%	D		496,58
11	F: Gastos generales y admin.			15%	D		70,94
12	G: Material de producción					\$110,23	110,23
13	H: Manufactura externa					28,00	28,00
14	I: SUBTOTAL						1.178,69
15	J: Costos de empaque			5%	I		58,93
16	K: TOTAL DE COSTO DIRECTO						1.287,55
17	L: Otros cargos directos			1%	K		12,38
18	M: Renta de instalaciones						
19	N: TOTAL DE COSTO DE MANUFACTURA						1.250,00
20	O: Cantidad (tamaño del lote)						50
21	P: COSTO UNITARIO DE MANUFACTURA						25,00
22							
23	Precio de venta del competidor	\$27,50					
24	Rendimiento que se desea sobre las ventas	10%					
25	Costo objetivo	\$25,00					

Figura 7.8 Meta de costo del material de producción para el ejemplo 7.12

las funciones del producto y el costo de cada una de ellas, además de una revisión completa de las especificaciones del producto. Un equipo de especialistas procedentes de varias disciplinas (diseño, manufactura, mercadotecnia, etcétera) se encarga de realizar la IV; el equipo se centra en determinar la manera más efectiva en cuanto al costo de generar un valor elevado a un costo aceptable para el cliente. La ingeniería del valor se aplica con más propiedad al comienzo del ciclo de vida, cuando existe mayor potencial para los ahorros en el costo. La IV se aplica en forma repetida durante la fase de diseño, conforme se dispone de información nueva. Observe que en la figura 7.6 la función de IV aparece dentro del ciclo de diseño por costo, y es una parte fundamental en la obtención de un costo total de manufactura que sea menor que el costo objetivo.

La clave para que la IV tenga éxito es hacer preguntas críticas y buscar darles respuestas creativas. La tabla 7.3 lista algunas preguntas de muestra que debieran incluirse en cualquier estudio de IV. Es importante preguntar todo y no dar nada por hecho. A veces, las oportunidades para reducir los costos son tan obvias que se pasan por alto. Se llega a soluciones creativas con el empleo de la lluvia de ideas clásica, o la técnica del grupo nominal (que se estudió en el capítulo 1). Deben analizarse alternativas que parezcan promisorias para determinar si es posible la reducción de costos sin poner en riesgo la funcionalidad.

Los ejemplos que siguen ilustran la forma en que se usó la IV para obtener una mejor funcionalidad y un valor más alto. Un ejemplo clásico de la IV es el rediseño del equipo de control remoto (para una TV o VCR). En la figura 7.9, el producto de la izquierda parece más una calculadora que un control remoto. Se empleó la IV para identificar muchas funciones innecesarias que los consumidores no deseaban y por las cuales no pagarían. Al eliminar dichas funciones no pedidas, se estuvo en posibilidad de recortar los costos de producción en forma significativa. El control remoto rediseñado que se muestra en el lado

Tabla 7.3 Lista de verificación para la ingeniería del valor

- ¿Pide el cliente todas las funciones que se proveen?
- ¿Podrían usarse materiales menos caros?
- ¿Sería posible reducir el número de materiales diferentes?
- ¿Podría simplificar el diseño para disminuir el número de partes?
- ¿Es factible emplear una parte que se diseñó para otro producto?
- ¿Son necesarias todas las superficies maquinadas y los terminados?
- ¿Podrían eliminarse las inspecciones de calidad redundantes?
- ¿Eliminaría el rediseño del producto un problema de calidad?
- ¿Es necesario el tipo actual del empaque?

derecho proyecta una apariencia muy sencilla y amigable para el usuario. Así, este diseño mejora el valor de uso y el aprecio aun antes de considerar el efecto que tiene el ahorro en el costo de producción sobre el precio de venta del producto.

La figura 7.10 presenta un conector que se usa en un regulador eléctrico y que fue sujeto de la ingeniería del valor. El ensamble actual (a la izquierda) tiene nueve partes distintas; cinco de ellas se fabrican especialmente y cuatro pueden comprarse externamente. El importe del costo unitario de los materiales es de \$2.34, y el de la mano de obra es de \$2.93. La función básica del equipo es “conducir corriente”, y las funciones secundarias son “formar un sello” y “establecer una conexión”. Después de aplicar la metodología de la IV, se encontró que la función de “formar un sello” era innecesaria. Al eliminarse dicha función redundante, se redujo a tres el número de partes que requería el ensamble (como se ilustra en el lado derecho de la figura 7.10). Se redujo el costo unitario del material a \$1.99, un 15% menos; la reducción en conjunto del costo total fue del 38%. Otros benefi-

Figura 7.9
Equipo de control remoto



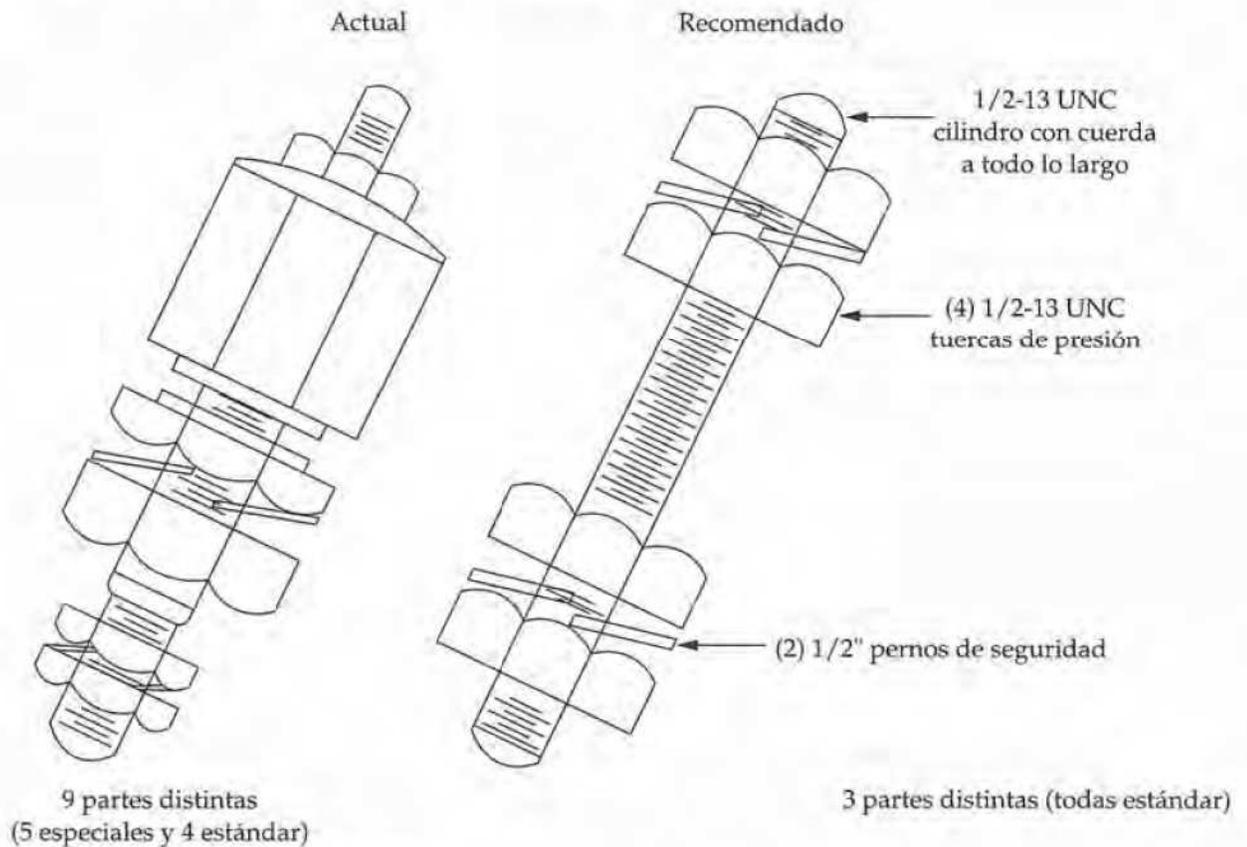


Figura 7.10 Conector eléctrico

cios indirectos fueron la disminución del costo de mantener inventario (menor número de partes) y tiempos más cortos de manufactura y ensamblado.

7.6 Estimación de los flujos de efectivo para un pequeño proyecto típico

Se va a considerar un pequeño proyecto típico como los que se encuentran con frecuencia en la práctica. ¿Hasta qué grado es aplicable el enfoque integrado (figura 7.1) cuando el proyecto no es grande ni complejo? La respuesta es que se aplica sin importar el tamaño ni la complejidad que tenga. Sin embargo, es posible realizar varios ajustes para reducir el nivel de detalle, con la finalidad de que se adapte a la situación específica.

1. *EDT*. Para un proyecto pequeño se puede reducir en forma significativa el número de niveles y alcance de la EDT. A veces, es posible combinar en una hoja de cálculo la EDT con la estructura de costo e ingreso para desarrollar las estimaciones. (véase el ejemplo 7.13.) El punto importante es que dicho componente inicial del enfoque integrado necesita evaluarse en forma explícita para el proyecto específico. Una EDT en forma y alcance apropiados facilitará el análisis económico de cualquier proyecto.
2. *Estructura de costo e ingreso*. El número de categorías de costo e ingreso y los elementos requeridos pueden reducirse para la mayoría de los proyectos pequeños. Sin embargo,

es necesario estudiar en detalle este segundo componente. Por ejemplo, quizá el número de elementos necesarios de costo de operación y mantenimiento, aun para un proyecto chico, sea demasiado grande.

3. *Técnicas de estimación (modelos)*. Por lo general, la estimación de los costos e ingresos futuros es menos compleja en los proyectos pequeños. Sin embargo, todavía serán necesarias las técnicas que se estudiaron en las secciones 7.2.3 a 7.4.

Estos tres componentes básicos del enfoque integrado se aplican sin importar el tamaño del proyecto. Sin embargo, su aplicación a proyectos pequeños se reduce en alcance, junto con la base de datos de la información que se requiere. En cualquier estudio de ingeniería económica es necesario: 1. definir la perspectiva del flujo de efectivo, 2. determinar la línea base de estimación y 3. establecer la extensión del periodo de análisis (estudio). Estas partes del enfoque no varían con el tamaño del proyecto.

EJEMPLO 7.13

Su compañía se dedica a la manufactura de componentes de la transmisión y ejes para camiones pesados, y es el proveedor principal de tres plantas que fabrican dichos vehículos. En cada una de las plantas se siguen los conceptos del inventario justo a tiempo. Por esta razón, para mantener la posición de su empresa como proveedor de las plantas es esencial ofrecer precios competitivos, confiabilidad en cuanto a la distribución para satisfacer la programación de la producción de las plantas, y alta calidad de los productos terminados. Satisfacer tales expectativas de su cliente resulta esencial para aumentar la participación en el mercado que tiene su compañía. En consecuencia, se está considerando un proyecto para reemplazar algunos equipos existentes por otros nuevos y automatizados que se requieren en la producción de ejes.

Una de las alternativas factibles incluye equipo nuevo fabricado por la compañía A. Describa el desarrollo de su FEAI con el uso del enfoque integrado que se ilustra en la figura 7.1. Analice las fuentes potenciales y la compilación de los datos necesarios (no necesita mencionar todos los detalles). Algunos datos básicos que tienen relación con el proyecto son los siguientes:

1. El costo de adquisición del equipo es de \$2,650,000 (incluye software de cómputo y los costos de instalación inicial) si se compra a la compañía A. Otros costos varios de instalación son de \$83,000 en el primer año de operación (no incluidos en la base de costo del equipo).
2. El periodo de estudio (análisis) que la compañía fija para esta clase de inversiones es de seis años.

SOLUCIÓN

Si se compra a la compañía A, el equipo nuevo automatizado consiste en un sistema completo; es decir, el hardware y el software no necesitan separarse para definir el sistema en forma explícita para la estimación del costo y el ingreso. Por lo tanto, el nivel de la EDT que se emplea para la estimación es el proyecto total (nivel 1 de la EDT). Como resultado, la EDT y la estructura del costo y el ingreso pueden combinarse en una sola hoja de cálculo. Entonces, en esta situación no se requiere una EDT separada y en detalle.

La perspectiva del flujo de efectivo que debe usarse para este proyecto es la de la compañía (los propietarios). Como este proyecto va a aumentar una operación que ya existe, la mejor línea de base para la estimación es la operación actual, y debe utilizarse el enfoque diferencial (sección 7.2). Así, los datos de costo de la operación actual más los que se obtengan del fabricante (compañía A) son las fuentes principales de datos para fines de la estimación. Las técnicas de estimación por usar las determina la base de datos disponible.

En la figura 7.11 se observa una hoja de cálculo representativa que resume los costos e ingresos necesarios para desarrollar el flujo neto de efectivo durante seis años a partir de la compra del equipo a la compañía A. La inversión estimada de capital se basa sobre todo en los datos que proporciona el fabricante (costo del equipo y software de computadora). Las estimaciones internas que desarrolla el grupo de ingeniería del proyecto se emplean para los demás elementos de costo (costos de instalación, capital de trabajo, etcétera).

A. Costos e ingresos no recurrentes	Costos	Ingresos
1. Inversión de capital		
a) Hardware (incluye equipo de cómputo)	\$2,195,000	
b) Software de computadora	185,700	
c) Instalación inicial	269,300	
d) Otros costos de instalación	83,000	
e) Capital de trabajo	28,400	
f) Ingeniería y administración del proyecto	172,400	
	Total: \$2,933,900	
2. Ingreso		
a) Venta del equipo actual (año 0)		\$185,000
b) Venta del equipo nuevo (año 6)		310,000
B. Costos e ingresos anuales recurrentes	Costos	Ingresos o costos reducidos
1. Costos de operación y mantenimiento (O&M)		
a) Costos directos		
Mano de obra		\$201,000
Material		58,000
Otros costos directos		44,600
b) Costos indirectos		
Mano de obra/tiempo extra		14,300
Materiales y suministros		
Costo de la calidad (durante la producción)		32,000
Herramientas/composturas		11,500
Mantenimiento	\$18,600	
Instalaciones	4,200	
Impuestos sobre la propiedad y seguros	28,900	
Otros costos indirectos		5,900
2. Ingreso		
Aumento en las ventas		525,000
	Total: \$51,700	\$892,300

Figura 7.11 Hoja de cálculo para la estimación del costo e ingreso del proyecto para el ejemplo 7.13

El equipo de ventas realizaría la estimación del ingreso incrementado, con base en la participación adicional en el mercado (volumen de ventas) como resultado del proyecto. El VM estimado del equipo que se reemplaza y del equipo nuevo al final de los seis años podría calcularse con el uso de los datos que se obtengan de las empresas implicadas en la reventa de esta clase de equipos. Los costos de operación y mantenimiento se estimarían a partir de la experiencia de la operación actual y los datos de rendimiento esperado del equipo nuevo que proporcione la compañía A.

Con base en las estimaciones de costo e ingreso que se muestran en la hoja de cálculo, el FEDI estimado durante seis años para la alternativa que implica la compra de equipo nuevo de la compañía A se muestra en la tabla siguiente:

Final del año	FEAI (compañía A)
0	-\$2,748,900 (= -\$2,933,900 + \$185,000)
1	840,600
2	840,600
3	840,600
4	840,600
5	840,600
6	1,179,000 (= \$892,300 - \$51,700 + \$310,000 + \$28,400)

Los montos de flujo de efectivo en los años cero y seis incluyen el ingreso por la baja de los activos, \$185,000 y \$310,000, respectivamente, como se indica en la hoja de cálculo. Asimismo, el monto al final del año seis incluye la recuperación del capital de trabajo.

7.7 Resumen

El desarrollo del flujo de efectivo para cada alternativa de un estudio es una etapa crucial en el procedimiento de análisis de la ingeniería económica. El enfoque integrado para desarrollar flujos de efectivo incluye tres componentes principales: 1. definición de la EDT del proyecto, 2. estructura del costo e ingreso que identifique todos los elementos de costo e ingreso implicados en el estudio, y 3. técnicas de estimación (modelos). En la figura 7.1 se ilustran otras consideraciones tales como la extensión del periodo de análisis, perspectiva y línea base de la estimación de los flujos de efectivo, así como la base de datos del costo y el ingreso, aspectos que se estudian en el capítulo.

La EDT es una técnica poderosa para definir todos los elementos de trabajo y sus interrelaciones en un proyecto. Se trata de una herramienta fundamental en la administración del proyecto y es un auxilio vital en un estudio de ingeniería económica. La comprensión de dicha técnica y sus aplicaciones es importante en el ejercicio de la ingeniería.

El desarrollo de una estructura de costo e ingreso ayudará a garantizar que un elemento de costo o una fuente de ingreso no se pase por alto en el análisis. El concepto de ciclo de vida y la EDT se usan para desarrollar esta estructura para un proyecto.

Las técnicas de estimación (modelos) se emplean para desarrollar flujos de efectivo para las alternativas según las define la EDT. Así, las técnicas de estimación constituyen un puente entre la EDT y los datos detallados de costo e ingreso, y los flujos de efectivo de las alternativas.

7.8 Referencias

- Engineering News-Record*. Publicación mensual de McGraw-Hill Book Co., New York.
- JELLEN, F. C. y J. H. BLACK. *Cost and Optimization Engineering*, 2a. ed. (New York: McGraw-Hill Book Co., 1983).
- MATTHEWS, L. M. *Estimating Manufacturing Costs: A Practical Guide for Managers and Estimators* (New York: McGraw-Hill Book Co., 1983).
- MICHAELS, J. V. y W. P. WOOD. *Design to Cost* (New York: John Wiley & Sons, 1989).
- OSTWALD, P. F., *Engineering Cost Estimating*, 3a. ed. (Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1992).
- PARK, W. R. y D. E. JACKSON. *Cost Engineering Analysis: A Guide to Economic Evaluation of Engineering Projects*, 2a. ed. (New York: John Wiley & Sons, 1984).
- STEWART, R. D. *Cost Estimating* (New York: John Wiley & Sons, 1982).
- STEWART, R. D., R. M. WYSKIDA y J. D. JOHANNES (eds.). *Cost Estimators' Reference Manual*, 2a. ed. (New York: John Wiley & Sons, 1995).

7.9 Problemas

Los números entre paréntesis al final de un problema se refieren a la(s) sección(es) del capítulo que se relaciona(n) más de cerca con el problema.

- 7.1.** Examine en forma visual una podadora para uso doméstico que a) no transporte al usuario, b) tenga aproximadamente 21 pulgadas de anchura de corte, y c) la impulse un motor de entre 3.5 y 5.0 hp, enfriado por aire. Desarrolle una EDT para este producto hasta el nivel 3. (7.2)
- 7.2.** Usted planea construir una casa nueva con una superficie bruta de espacio habitable en una sola planta que mide aproximadamente 2,000 a 2,500 pies cuadrados. Además, usted planea una cochera adjunta para dos vehículos (con espacio para bodega) de más o menos 450 pies cuadrados. Desarrolle una estructura de costo e ingreso para el diseño y construcción, operación (ocupación) durante 10 años, y luego la venta de la casa al final del décimo año. (7.2)
- 7.3.** Suponga que su cuñado decidió comenzar una compañía para producir pasto sintético destinado a los propietarios de residencias de lujo. Planea comenzar la operación dentro de 18 meses. Al estimar los flujos de efectivo futuros de la compañía, ¿cuál de los siguientes sería relativamente fácil *versus* relativamente difícil de obtener? Asimismo, sugiera cómo podría estimarse cada uno con una exactitud razonable. (7.2)
- a)** Costo del terreno para una construcción de 10,000 pies cuadrados.

- b)** Costo del edificio (construcción a base de bloques de hormigón ligero).
- c)** Capital inicial de trabajo.
- d)** Costo de la inversión de capital total.
- e)** Costos de mano de obra y material durante el primer año.
- f)** Ingresos por ventas del primer año.

- 7.4.** Al final del año 2005, debe reemplazarse equipo de manufactura que se compró en el 2000 en \$200,000. ¿Cuál es el costo estimado del reemplazo, con base en el índice siguiente de costo del equipo? (7.3)

Año	Índice	Año	Índice
2000	223	2003	257
2001	238	2004	279
2002	247	2005	293

- 7.5.** Prepare un índice compuesto (ponderado) para los costos de construcción de vivienda en 2004 con el uso de los siguientes datos: (7.3)

Tipo de vivienda	Porcentaje	Año de referencia Porcentaje (I = 100)	2004
Unifamiliares	70	41	62
Dúplex	5	38	57
Múltiples	25	33	53

\$ /ft² \$ /ft²

7.6. En la tabla adjunta aparecen los elementos principales de la manufactura de un modelo de equipo de control de un proceso electrónico. También se muestran los índices de costo relacionados para un año de referencia y para el año actual. (7.3)

Elemento de costo	Porcentaje del costo de manufactura	Índice (año de referencia)	Índice (año corriente)
Mano de obra fabril	13%	131	176
Material directo	20	150	210
Componentes adquiridos	32	172	231
Costos indirectos	21	160	190
Ingeniería	8	135	180
Otros costos	6	140	172

a) Con base en esta información, desarrolle un índice compuesto (ponderado) del costo para el año de referencia y el año en curso.

b) Si el costo de manufactura para una unidad del equipo fue de \$314,300 en el año de referencia, ¿cuál sería la estimación semidetallada del costo de manufactura en el año en curso?

7.7. En 2,000 se construyó una microcervecería con un costo total de \$650,000. En la tabla que sigue se da información adicional (todo 1995 = 100). (7.3.)

Elemento de costo	Porcentaje promedio del costo total de la cervecería	Índice (2000)	Índice (2004)
Mano de obra	30	160	200
Materiales	20	145	175
Equipo	50	135	162

a) Calcule un índice ponderado para la construcción de la microcervecería en 2004.

b) Prepare una estimación de presupuesto para una microcervecería en 2004.

7.8. El precio de compra de una caldera que quema gas natural (de capacidad X) fue de \$181,000 hace ocho años. En el presente, se considera la compra de otra caldera con el mismo diseño básico, pero con capacidad de 1.42X. Si se adquiriera, para su operación se agregarían algunas características opcionales que en este momento cuestan \$28,000.

Si el índice de costo para este tipo de equipo fue de 162 cuando se compró la caldera de capacidad X, y hoy es de 221, y el factor aplicable de costo de capacidad es de 0.8, ¿cuál es su estimación del precio de compra para la caldera nueva? (7.3, 7.4)

7.9. Utilice la técnica del factor para estimar el costo de instalación de una red de área local en un ambiente industrial que tiene las siguientes características. Un edificio grande en una sola planta que requerirá 3,000 ft de cable coaxial (de banda ancha) para conectar sus seis departamentos. Serán necesarias seis unidades de interfaz de red (UIR), y tendrán que hacerse 50 tomas para conectar todas las estaciones de trabajo y dispositivos programables que se planean. Se necesitarán dos módem, además de un gerente/analista de la red, que cuesta \$30,000. La información necesaria para hacer la estimación puede obtenerse de la hoja de cálculo que se muestra en la página siguiente. (véase la tabla P7.9.) ¿Qué tan exacta piensa usted que sería dicha estimación? (7.3)

7.10. Si la construcción de una planta de amoníaco que produce 500,000 libras por año costó \$2,500,000 hace ocho años, ¿cuál sería ahora el costo de una planta de 1,500,000 libras anuales de capacidad? Suponga que el índice de costo de la construcción se ha incrementado a una tasa promedio del 12% anual durante los últimos ocho años, y que el factor de capacidad de costo (X) que refleja la economía de escala es de 0.65. (7.4)

7.11. Se estima que el costo promedio anual de poseer y operar un automóvil de cuatro cilindros en el año 2002 es de \$0.42 por milla, con base en el manejo de 15,000 millas por año. En la tabla que sigue se muestra el desglose del costo: (7.3)

Elemento de costo	Costo por milla
Depreciación	\$0.210
Gasolina y aceite	0.059
Cargos financieros*	0.065
Costo del seguro (incluye colisión)	0.060
Impuestos, tarifas de licencia y registro	0.015
Llantas	0.011

* Con base en un financiamiento del 20% abajo a 48 meses y APR del 10%.

a) Si una persona que posee este automóvil "promedio" planea manejar 15,000 millas durante 2002, ¿cuánto le costará ser el dueño y operar este vehículo?

Tabla P7.9 Hoja de cálculo para el problema 7.9

1.	Conexiones entre edificios	\$100–\$150 por pie	×	<input type="text"/>	=	<input type="text"/>
2.	Conexiones en el interior del edificio	\$20–\$50 por pie	×	<input type="text"/>	=	<input type="text"/>
3.	Instalación del cable	\$20 por pie	×	<input type="text"/>	=	<input type="text"/>
4.	Equipo					
a.	Amplificador CATV de banda ancha	\$500–\$1,500	×	<input type="text"/>	=	<input type="text"/>
	Tomas	\$17–\$20 cada una	×	<input type="text"/>	=	<input type="text"/>
	Codos	\$5–\$15	×	<input type="text"/>	=	<input type="text"/>
	UIR	\$500–\$1,000 por puerto	×	<input type="text"/>	=	<input type="text"/>
	Módem	\$1,000 cada uno	×	<input type="text"/>	=	<input type="text"/>
b.	Bandas base					
	UIR	\$600 por puerto	×	<input type="text"/>	=	<input type="text"/>
	Repetidores	\$1,200–\$1,500 cada uno	×	<input type="text"/>	=	<input type="text"/>
	Tomas/transceptores	\$200–\$300 cada uno	×	<input type="text"/>	=	<input type="text"/>
c.	Gerente de la red	\$10,000–\$30,000			=	<input type="text"/>
	Analista de la red	\$30,000			=	<input type="text"/>

b) Si la persona maneja en realidad 30,000 millas en el año 2002, exponga algunas razones de por qué su costo real no sería el doble de la respuesta que se obtuvo en el inciso a).

7.12. Hace seis años, un equipo diesel de 80 kW para generar electricidad costó \$160,000. El índice de costo para esta clase de equipo en aquel tiempo fue de 187, y ahora es de 194. El factor de la capacidad de costo es de 0.6. (7.4)

a) El equipo de ingeniería de la planta considera un equipo de 120 kW con el mismo diseño general para atender a una planta pequeña y aislada. Suponga que se desea agregar un precompresor, que (si se le aísla y estima por separado) cuesta actualmente \$18,000. Determine el costo total del equipo de 120 kW.

b) Estime el costo de un equipo de 40 kW con el mismo diseño general. Incluya el costo del precompresor de \$18,000.

7.13. El gerente de planta de MOMAX, Inc. ha decidido que se necesita un elevador hidráulico nuevo en la sección de producción. Si hace 10 años el costo de uno de 150,000 libras de capacidad era de \$200,000, y hoy se requiere otro de 125,000 libras, ¿cuál será el costo de este equipo nuevo? El índice de costo ahora es de 343.8 y el índice hace 10 años era de 171.6. El factor de la capacidad de costo para este tipo de equipo es de 0.80.

7.14. En 1994 se compró un intercambiador de calor de cámara y tubo de 250 ft² en \$13,500, cuando el índice de valor era de 830. Estime el costo de un equipo similar de 150 ft² en el año 2006, cuando

el índice de valor es 964 y el factor de la capacidad de costo es de 0.6. (7.4)

7.15. La sección de diseño de ingeniería estructural en el departamento de ingeniería en las instalaciones de una corporación eléctrica regional ha desarrollado varios diseños estándar para un grupo de torres de líneas de transmisión similares. El diseño detallado de cada torre se basa en uno de los diseños estándar. Se ha aprobado el proyecto de una línea de transmisión que comprende 50 torres. El número estimado de horas de ingeniería que se necesitan para completar el primer diseño detallado es de 126. Suponga una curva de aprendizaje del 95% y diga a) ¿cuál es su estimación del número de horas de ingeniería necesarias para diseñar la octava y la última torres del proyecto?, y b) ¿cuál es su estimación de las horas promedio acumuladas que se requieren para los cinco primeros diseños? (7.4)

7.16. El tiempo para producir la unidad número 32 de cierto producto es de 8.74 horas. Si, con base en la experiencia anterior, la curva de aprendizaje con productos similares es del 85%, a) ¿cuál fue el número de horas que se requirieron para la primera unidad, y b) ¿cuál es el número estimado de horas que fueron necesarias para producir la unidad número 1,000? (7.4)

7.17. Los costos indirectos de una compañía son en la actualidad de \$X por mes. El equipo de administración de la compañía, en cooperación con los empleados, está listo para implantar un programa exhaustivo de mejora para reducir dichos costos. Si a) se considera una observación de los costos

indirectos actuales para una mes y una unidad producida análogos, b) se estima que los costos indirectos para el primer mes de implantación del programa son de 1.15X, por un esfuerzo adicional por el arranque, y c) se considera que una curva de mejora del 90% es aplicable a esta situación, ¿cuál es su estimación de la reducción porcentual de los costos indirectos actuales por mes, 30 meses después de haberse implantado el programa? (7.4)

7.18. En relación con el problema 7.2, usted decidió construir una casa de una planta con una superficie bruta de 2,450 pies cuadrados de espacio habitable. Asimismo, la cochera adjunta para dos autos (con espacio para una bodega) tendrá 450 pies cuadrados de área bruta.

a) Desarrolle una EDT (hasta el nivel 3) que defina los elementos de trabajo implicados en el diseño y construcción de la casa. (7.2)

b) Desarrolle una estimación semidetallada del costo de inversión de capital asociado con el proyecto, hasta el momento en que ocurra la ocupación inicial de la casa. (Nota: Su profesor le dará información adicional para resolver esta parte del problema.) (7.3)

7.19. El modelo básico de potencias [ecuación (7.4)] puede modificarse para que represente una situación de estimación específica. Considere la situación de un sistema de almacenamiento automatizado para un centro de distribución nuevo que maneja artículos empacados en cajas (por ejemplo, un centro de distribución de zona de una compañía de supermercados). La ecuación (7.4) puede modificarse para mejorar su capacidad de estimar la inversión de capital que se requiere para este proyecto (sistema) mediante a) la separación de la parte de inversión del capital destinada al equipo y su instalación (que se estima mejor con un modelo exponencial) de la parte del costo del proyecto y apoyo (ingeniería, compras, administración del proyecto, etcétera) de la inversión de capital, y b) mediante el ajuste de ambas partes del costo inicial con los cambios del índice de precios de la instalación previa de sistemas parecidos (en el año de referencia). Es decir, la forma que tendría la ecuación (7.4) una vez modificada sería

$$C_A = C_{B1}(S_A/S_B)^X(\bar{I}_{B1}) + C_{B2}(\bar{I}_{B2}),$$

donde

C_A = costo estimado del nuevo sistema de almacenamiento automatizado;

C_{B1} = costo del equipo e instalación de un sistema previo comparable;

C_{B2} = otros costos de proyecto y apoyo de sistemas anteriores parecidos;

S_A = capacidad del sistema de almacenamiento nuevo;

S_B = capacidad de un sistema similar anterior;

X = factor de capacidad de costo para reflejar economías de escala;

\bar{I}_{B1} = razón del índice de costo compuesto (en curso/referencia) para los costos de equipo e instalación;

\bar{I}_{B2} = razón del índice de costo compuesto (en curso/referencia) para otros costos de proyecto y apoyo.

Costos de equipo e instalación

Elemento de costo	Peso	Índice (año de ref.)	Índice (este año)
Equipo mecánico	0.41	122	201
Equipo de automatización	0.22	131	212
Hardware de inicio	0.09	118	200
Mano de obra inicial	0.28	135	184

Otros costos de proyecto y apoyo

Elemento de costo	Peso	Índice (año de ref.)	Índice (este año)
Ingeniería	0.38	136	206
Administración del proyecto	0.31	128	194
Compras	0.11	105	162
Otros apoyos	0.20	113	179

a) Desarrolle las razones de índice de costos para \bar{I}_{B1} y \bar{I}_{B2} , con base en los datos anteriores. (7.3)

b) Desarrolle el costo estimado de la inversión de capital para el sistema de almacenamiento automatizado si el costo del equipo y la instalación de un sistema anterior comparable era de \$1,226,000; la capacidad del sistema nuevo es de 11,000 cajas de artículos por turno de 8 horas; la capacidad del sistema parecido anterior era de 5,800 cajas por cada 8 horas de trabajo; el factor de la capacidad de costo es de 0.7; y otros costos del proyecto y apoyo del sistema anterior comparable fueron de \$234,000. (7.3, 7.4)

7.20. El costo de construcción de un supermercado se relaciona con la superficie total construida. En la tabla adjunta se muestran datos de los últimos 10 supermercados construidos por la empresa Regork, Inc.

Edificio	Superficie (ft ²)	Costo
1	14,500	\$800,000
2	15,000	825,000
3	17,000	875,000
4	18,500	972,000
5	20,400	1,074,000
6	21,000	1,250,000
7	25,000	1,307,000
8	26,750	1,534,000
9	28,000	1,475,500
10	30,000	1,525,000

- a) Desarrolle una REC para la construcción de supermercados. Utilícela para estimar el costo de la próxima tienda de Regork, que se planea tenga una superficie de 23,000 ft². (7.4)
- b) Calcule el error estándar y el coeficiente de correlación de la REC desarrollada en el inciso a). (7.4)

7.21. En el departamento de empaque de una distribuidora grande de partes automotrices, puede obtenerse una estimación confiable de los costos de empaque y procesamiento si se conoce el peso de una orden. Así, en esta compañía, el peso es una guía de costo que influye en una fracción mensurable de los costos de empaque y procesamiento. Los datos de las últimas 10 órdenes son los que siguen: (7.4)

Costos de empaque y procesamiento (\$)	Peso (libras)
y	x
97	230
109	280
88	210
86	190
123	320
114	300
112	280
102	260
107	270
86	190

- a) Calcule los coeficientes a y b , y determine la ecuación de regresión lineal que se ajuste a los datos.
- b) ¿Cuál es el coeficiente de correlación (r)?
- c) Si una orden pesa 250 libras, ¿cuánto costaría su empaque y procesamiento?

7.22. Con el uso de la hoja de cálculo que se proporciona en este capítulo (figura 7.5), estime el costo unitario y precio de venta de la manufactura de cortadores de alambre metálico en lotes de 100, si se cuenta con los datos siguientes: (7.5)

- Mano de obra fabril (directa): 4.2 horas a \$11.15/hora
 Indirectos de fabricación : 150% de la mano de obra fabril
 Manufactura externa : \$74.87
 Material de producción : \$26.20
 Costos de empaque : 7% de la mano de obra fabril
 Utilidad deseada : 12% del costo total de manufactura

7.23. Se le ha solicitado que *estime el precio unitario de venta* de una línea nueva de artefactos. Los datos pertinentes son los siguientes:

- Tarifa de mano de obra directa: \$15.00 m/hora
 Material de producción: \$375 por cada 100 artefactos
 Indirectos de fabricación: 125% de la mano de obra directa
 Costos de empaque: 75% de la mano de obra directa
 Utilidad deseada: 20% del costo total de manufactura

La experiencia anterior ha demostrado que se aplica una curva de aprendizaje del 80% a la mano de obra que se requiere para producir los artefactos. El tiempo para terminar el primer artefacto se estima en 1.76 horas. Use el tiempo estimado para terminar el artefacto número 50 como el tiempo estándar para fines de estimación del precio de venta unitario. (7.4, 7.5)

7.24. Una compañía de manufactura electrónica planea lanzar al mercado un nuevo producto. El mejor competidor vende un artículo similar a \$420/unidad. Otros datos pertinentes se muestran a continuación:

- Costo de mano de obra directa: \$15.00/hora
 Indirectos de fabricación: 120% de la mano de obra directa
 Material de producción: \$300 por unidad
 Costos de empaque: 20% de la mano de obra directa

Se ha descubierto que se aplica una curva de aprendizaje del 85% a la mano de obra que se requiere. El tiempo para terminar la primera unidad se estima en 5.26 horas. La compañía decide usar el tiempo necesario para concluir la vigésima unidad como el estándar para fines de estimación del costo. El margen de utilidad se basa en los costos totales de manufactura.

a) Con base en la información anterior, determine el margen de utilidad máxima que puede obtener la compañía de manera que siga siendo competitiva. (7.4, 7.5)

b) Si la compañía desea un margen de utilidad del 15%, ¿se alcanza el costo objetivo? Si no fuera así, sugiera dos maneras en las que podría lograrse.

7.25. Con la información que se da a continuación, ¿cuántas unidades deben venderse para obtener una utilidad de \$25,000? [Observe que las unidades vendidas deben tomarse en cuenta en los costos totales de producción (directos e indirectos) más la utilidad que se desea]. (7.4, 7.5)

Horas de mano de obra directa:	0.2 horas/unidad
Costos directos de mano de obra:	\$21/hora
Costo directo de los materiales:	\$4.00/unidad
Costos indirectos:	120% de la mano de obra directa
Costos de empaque y envío:	\$1.20/unidad
Precio de venta:	\$20.00/unidad

7.26. Una compañía de computadoras personales (PC) intenta lanzar al mercado un modelo nuevo. De acuerdo con el departamento de mercadotecnia, el mejor precio de venta de un modelo similar de un competidor de clase mundial es de \$2,500 por computadora. La compañía quiere vender al mismo precio que su mejor competidor. Enseguida se muestra el desglose de costo del modelo nuevo:

Tiempo de ensamble de la primera unidad:	1.00 hora
Tiempo de manejo:	10% del tiempo de ensamble
Tarifa de mano de obra directa:	\$15/hora
Mano de obra de la planeación:	10% de mano de obra directa
Control de calidad:	50% de mano de obra directa
Indirectos de fabricación:	200% de la mano de obra total
Gastos generales y de administración:	300% de la mano de obra total
Costo directo de los materiales:	\$200 /computadora
Manufactura externa:	\$2,000 /computadora
Costo de empaque:	10% de la mano de obra total
Renta de instalaciones:	10% de la mano de obra total
Utilidad:	20% del costo total de manufactura
Número de unidades:	20,000

Como la compañía produce sobre todo subensambles que se compran a otros fabricantes y luego reempaca el producto, se estima que el costo directo de los materiales es de sólo \$200 por computadora. El tiempo de mano de obra directa consiste en el tiempo de manejo y tiempo de ensamble. La compañía estima que la curva de aprendizaje del ensamble del modelo nuevo es del 95%. Calcule el costo total de manufacturar 20,000 de dichas PC, y determine el precio de venta unitario. ¿Cómo reduce sus costos la compañía para lograr el costo objetivo con base en la ecuación (7.13)? (7.3, 7.4)

7.27. Use la figura 7.1 y la información y resultados del problema 7.18 para desarrollar una estimación del flujo neto de efectivo para 10 años de posesión de la casa nueva. Suponga que la casa se vende (se da de baja) al final del año 10. Obtenga (en su localidad) datos representativos de operación, composturas, reventa y otros que se relacionen con la propiedad inmobiliaria, según los necesite para apoyar el desarrollo de las estimaciones del flujo de efectivo para 10 años. Indique las técnicas de estimación de costos que emplee para calcular los flujos de efectivo. Enuncie cualesquiera suposiciones que realice. (7.6)

7.28. Se ha construido una planta pequeña cuyos costos se conocen. Se va a estimar una planta nueva con el modelo exponencial (elevación a una potencia) del costo. En la tabla P7.28 de la página siguiente, se muestran los equipos principales, costos y factores (observe que 1 mW = 10^6 Watts).

Si el equipo complementario cuesta \$200,000 adicionales, encuentre el costo de la planta propuesta. (7.4)

7.29. Si se requieren 846.2 horas de mano de obra para la tercera unidad producida, y 873.0 para la quinta, determine el parámetro s de la curva de aprendizaje. (7.4)

7.30. Su compañía planea producir y vender disquetes de alta densidad de dos lados, con capacidad de almacenamiento de 2 MB. Los disquetes se producen por medio de la instalación de una película magnética dentro de un cartucho de plástico. Para ello, es necesario ejecutar tres operaciones:

1. Cortar discos de película magnética. Esta última se compra en rollos que cuestan \$90 cada uno. De cada rollo pueden cortarse 2,000 piezas circulares. Se requiere una persona para operar y supervisar la máquina cortadora. La instalación de un rollo nuevo toma 8 minutos, y el corte de 2,000 discos, 25 minutos.

2. Colocar piezas centrales de control del disco. Dichas piezas cuestan \$0.12 por unidad, y es necesaria una persona para ponerlas en los discos magnéticos. Aplicar la primera pieza central toma 3 segundos, y para las restantes es aplicable una curva de aprendizaje del 80%.

Tabla P7.28 Tabla para el problema 7.28

Equipo	Tamaño de referencia	Costo unitario de referencia	Factores de capacidad de costo	Tamaño del diseño nuevo
Dos calderas	6 mW	\$300,000	0.80	10 mW
Dos generadores	6 mW	400,000	0.60	9 mW
Tanque	80,000 gal	106,000	0.66	91,500 gal

3. Insertar dentro de los cartuchos de plástico. Estos últimos cuestan \$0.15 por unidad. Se necesita una persona que supervise la operación de inserción que se realiza en forma automática por medio de una máquina capaz de introducir 1,500 discos por hora. La película, piezas del centro y cartuchos se compran a un fabricante externo. Se va a producir un total de 10,000 discos. A continuación se presentan otros datos relevantes de los costos:

La tarifa de mano de obra directa es de \$15.00 por hora.

La mano de obra de planeación es el 15% de la fabril.

El control de calidad es el 30% de la mano de obra fabril.

Los indirectos de la fábrica son el 80% de la mano de obra total.

Los gastos generales y administrativos son el 50% del total de mano de obra.

Los costos de empaque son el 100% de la mano de obra total.

El margen de utilidad es el 15% del costo total de manufactura.

- a) Con base en esta información, estime el precio de venta unitario de un disco. (7.5)
- b) Calcule el costo objetivo si el precio de venta del mejor competidor es de \$0.50 por disquete y se desea un margen de utilidad del 15%. (7.5)
- c) Investigue y elabore un reporte de cualesquiera alternativas de reducción del costo que permitan lograr el costo objetivo. (7.5)

7.31. Rompecabezas. Se le pidió que preparara una estimación rápida del costo de construcción de una planta generadora de electricidad que utiliza carbón y de sus instalaciones complementarias. En la tabla P7.31 se muestra la estructura de desglose del trabajo (del nivel 1 al 3). Usted cuenta con la siguiente información:

En 1977 se construyó una planta a base de carbón del doble de tamaño de la que usted analiza. En ese año, la caldera (1.2) y su sistema de apoyo (1.3) costaron \$110 millones. El índice de costo para calderas fue de 110 en 1977; en el año 2000 es de 492. El factor de capaci-

dad de costo para calderas similares y sistemas de apoyo es de 0.9.

Ya se cuenta con la propiedad del sitio de 600 acres de superficie, pero las mejoras (1.1.1) y vialidades (1.1.2) costarán \$2,000 por acre, y las vías férreas (1.1.3) van a costar \$3,000,000. Se piensa que la integración del proyecto (1.9) tendrá un costo del 3% del total de las demás construcciones.

Se espera que los sistemas de seguridad (1.5.4) cuesten \$1,500 por acre, con base en la construcción de plantas similares recientes (2000). La empresa Viscount Engineering se encargará de la construcción de todas las demás instalaciones y equipos de apoyo (1.5); la empresa ha construido las instalaciones y equipos de otras dos plantas generadoras similares. Es de esperar que su experiencia reduzca los requerimientos de mano de obra de manera sustancial; puede suponerse una curva de aprendizaje del 90%. Viscount construyó las instalaciones y equipos auxiliares de su primer trabajo en 95,000 horas. Para este proyecto, dicha empresa va a cobrar \$60/hora, y estima que los materiales de construcción de las instalaciones y equipos de apoyo (excepto el 1.5.4) costarán \$15,000,000.

La bodega para almacenar carbón (1.4) de la planta generadora que se construyó en 1977 costó \$5 millones. Aunque la planta nueva es más pequeña, requerirá una bodega para el carbón del mismo tamaño que la de la planta de 1977. Suponga que puede aplicarse el índice de costo para calderas y bodegas similares.

¿Cuál es la estimación del costo en el año 2000 de la construcción de la planta generadora a base de carbón? Haga un resumen de sus cálculos en una hoja de cálculo de costo y enuncie las suposiciones que realice.

Tabla P7.31 Estructura de desglose del trabajo, para el problema P7.31

Proyecto: Planta generadora de electricidad a base de carbón y sus instalaciones

Línea núm.	Nombre	Código de elemento EDT
001	Planta de energía a base de carbón	1
002	Sitio	1.1
003	Mejoramiento del terreno	1.1.1
004	Vialidades, estacionamientos y áreas pavimentadas	1.1.2
005	Vías férreas	1.1.3
006	Caldera	1.2
007	Quemador	1.2.1
008	Válvula de presión	1.2.2
009	Sistema de intercambio de calor	1.2.3
010	Generadores	1.2.4
011	Sistema de apoyo de la caldera	1.3
012	Sistema de transporte de carbón	1.3.1
013	Sistema de pulverización de carbón	1.3.2
014	Instrumentación y control	1.3.3
015	Sistema de desecho de cenizas	1.3.4
016	Transformadores y distribución	1.3.5
017	Bodega de carbón	1.4
018	Sistema de extracción del inventario	1.4.1
019	Vagón para basura	1.4.2
020	Equipo de manejo del carbón	1.4.3
021	Instalaciones y equipos auxiliares	1.5
022	Sistemas de desechos peligrosos	1.5.1
023	Equipo de apoyo	1.5.2
024	Sistema de instalaciones y comunicación	1.5.3
025	Sistemas de seguridad	1.5.4
026	Integración del proyecto	1.9
027	Administración del proyecto	1.9.1
028	Administración ambiental	1.9.2
029	Seguridad del proyecto	1.9.3
030	Aseguramiento de la calidad	1.9.4
031	Administración de pruebas, arranque y transición	1.9.5

Apéndice 7.A Hoja de cálculo de EXCEL para la figura 7.5

La tabla 7.A.1 contiene las fórmulas para las celdas de la columna E (total del renglón) de la figura 7.5. Observe que en la hoja de cálculo real, la columna E es la H del área de trabajo de la hoja de cálculo, y el renglón A corresponde al 6 de la hoja de cálculo.

Tabla 7.A.1

Fórmulas para las celdas de la columna E de la figura 7.5. Observe que en la hoja de cálculo real, la columna E corresponde a la H del área de trabajo de la hoja, y el renglón A es el 6 de la hoja.

Columna E

Total del
renglón

- A: = SI(\$C6 > 0, \$C6 * \$D6, \$G6)
- B: = SI(\$C7 > 0, \$C7 * \$D7, SI(\$F7 = "A", \$E7 * \$H6, \$G7))
- C: = SI(\$C8 > 0, \$C8 * \$D8, SI(\$F8 = "A", \$E8 * \$H6, SI(\$F8 = "B", \$E8 * \$H7, \$G8)))
- D: = SUMA(J6 : J8)
- E: = SI(\$C10 > 0, \$C10 * \$D10, SI(\$F10 = "A", \$E10 * \$H\$6, SI(\$F10 = "B", \$E10 * \$H\$7, SI(\$F10 = "C", \$E10 * \$H\$8, SI(\$F10 = "D", \$E10 * \$H\$9, \$G10))))))
- F: = SI(\$C11 > 0, \$C11 * \$D11, SI(\$F11 = "A", \$E11 * \$H\$6, SI(\$F11 = "B", \$E11 * \$H\$7, SI(\$F11 = "C", \$E11 * \$H\$8, SI(\$F11 = "D", \$E11 * \$H\$9, \$G11))))))
- G: = SI(\$C12 > 0, \$C12 * \$D12, SI(\$F12 = "A", \$E12 * \$H\$6, SI(\$F12 = "B", \$E12 * \$H\$7, SI(\$F12 = "C", \$E12 * \$H\$8, SI(\$F12 = "D", \$E12 * \$H\$9, SI(\$F12 = "E", \$E12 * \$H\$11, SI(\$F12 = "F", \$E12 * \$H\$11, \$G12))))))
- I: = SUMA(\$H9 : \$H13)
- J: = SI(\$C15 > 0, \$C15 * \$D15, SI(\$F15 = "A", \$E15 * \$H\$6, SI(\$F15 = "B", \$E15 * \$H\$7, SI(\$F15 = "C", \$E15 * \$H\$8, SI(\$F15 = "D", \$E15 * \$H\$9, SI(\$F15 = "G", \$E15 * \$H\$12, SI(\$F15 = "T", \$E15 * \$H\$14, \$G15))))))
- K: = SUMA(\$H14 : \$H15)
- L: = SI(\$C17 > 0, \$C17 * \$D17, SI(\$F17 = "A", \$E17 * \$H\$6, SI(\$F17 = "B", \$E17 * \$H\$7, SI(\$F17 = "C", \$E17 * \$H\$8, SI(\$F17 = "D", \$E17 * \$H\$9, SI(\$F17 = "G", \$E17 * \$H\$12, SI(\$F17 = "T", \$E17 * \$H\$14, SI(\$F17 = "K", \$E17 * \$H\$16, \$G17))))))
- M: = SI(\$C18 > 0, \$C18 * \$D18, SI(\$F18 = "A", \$E18 * \$H\$6, SI(\$F18 = "B", \$E18 * \$H\$7, SI(\$F18 = "C", \$E18 * \$H\$8, SI(\$F18 = "D", \$E18 * \$H\$9, SI(\$F18 = "G", \$E18 * \$H\$12, SI(\$F18 = "T", \$E18 * \$H\$14, SI(\$F18 = "K", \$E18 * \$H\$16, \$G18))))))
- N: = SUMA(\$H16 : \$H18)
- O:
- Q: = SI(\$C22 > 0, \$C22 * \$D22, SI(\$F22 = "A", \$E22 * \$H\$6, SI(\$F22 = "C", \$E22 * \$H\$8, SI(\$F22 = "D", \$E22 * \$H\$9, SI(\$F22 = "G", \$E22 * \$H\$12, SI(\$F22 = "T", \$E22 * \$H\$14, SI(\$F22 = "K", \$E22 * \$H\$16, SI(\$F22 = "P", \$E22 * \$H21, \$G22))))))
- R: = SUMA(\$H21 : \$H22)

Los enunciados condicionales anidados SI se usan para determinar qué tipo de estimación se ha hecho para cada renglón. La fórmula en la celda primero prueba si se ha dado una unidad de la estimación. Si no se ha ingresado ningún valor en la columna de "unidades" (columna C en la fórmula), la fórmula trata de determinar si se ha dado una estimación por factor (señalado por la presencia, en la columna F, de una letra para el renglón). Si no se ha proporcionado una unidad de estimación ni una estimación por factor, el total del renglón se hace igual al valor que aparece en la columna G, que corresponde a la columna para las estimaciones directas.

Apéndice 7.B Ejemplo adicional de costeo objetivo

El propósito de este apéndice es brindar ilustración adicional del uso iterativo de la estimación de "arriba-abajo" y de "abajo-arriba", junto con los conceptos de costo objetivo e ingeniería del valor.

El problema es estimar el costo y precio de venta de un maneral metálico. El propósito del producto es servir como agarradera común para una serie de herramientas de mano (martillo, cincel, etcétera). Un estudio de mercado mostró que el precio de venta de un producto similar del mejor competidor es de \$10.00. La compañía de usted establece un margen de utilidad del 10% (con base en el costo total de manufactura) para este tipo de producto. Así, el costo objetivo para el maneral, es

$$\text{Costo objetivo} = \frac{\$10.00}{1.10} = \$9.09$$

Un diseño preliminar requiere que el maneral se procese en una máquina a partir de un cilindro de aluminio. Se especifican un total de 13 operaciones en la máquina y se van a producir 1,000 manerales. Los datos siguientes se emplean para obtener una estimación inicial del costo total de manufactura:

Tiempo de manipulación (primera unidad):	15 min
Tiempo de máquina:	12 min/unidad
Tiempo del cambio de herramienta:	3.4 min/unidad
Costo directo del material:	\$1.40/unidad
Costo del material de herramientas:	\$5.00/herramienta
Vida promedio de la herramienta:	300 min/herramienta
Tarifa de la mano de obra directa:	\$8.00/hora
Mano de obra de planeación:	9% de mano de obra fabril
Control de calidad:	15% de mano de obra fabril
Indirectos de fabricación:	90% de la mano de obra total
Generales y administrativos:	25% de la mano de obra total
Costos de empaque:	\$0.80/unidad

Estimación del tiempo de mano de obra directa

En la fabricación del maneral, el tiempo de mano de obra directa consiste en el tiempo de manipulación, de máquina y de cambio de herramienta. El tiempo de manipulación es aquel que dedica el operario a situar y retirar el material en las máquinas, así como el tiempo que

se requiere para ajustar éstas. El tiempo de máquina es el tiempo real de trabajo de la máquina sobre el material. El tiempo de cambio de herramientas es el que invierte el operario para cambiarlas.

Se piensa que es aplicable una curva de aprendizaje del 90% al componente de tiempo de manipulación. Conforme el maquinista se familiariza con el ritmo de trabajo, dedica menos tiempo al manejo del material. Para fines de estimación, se usará el tiempo promedio acumulado durante la producción de 1,000 manerales. Para obtener dicha estimación, se escribe un programa corto de computadora que proporciona el tiempo total de manipulación para las 1,000 unidades:

```

K = 15
n = log(0.9)/log(2)
T = 0
FOR I = 1 to 1000
    T = T + K * I^n
NEXT I
C = T/1000
    
```

Los resultados que se obtienen son $T = 6,180$ min, y $C = 6.18$ min. La estimación del total de horas de fábrica está dada por

$$\begin{aligned}
 \text{Tiempo de fábrica} &= \text{Tiempo de manipulación} + \text{Tiempo de máquina} \\
 &\quad + \text{Tiempo de cambio de herramientas} \\
 &= (6.18 \text{ min} + 12 \text{ min} + 3.4 \text{ min}) \left(\frac{\text{hora}}{60 \text{ min}} \right) = 0.36 \text{ horas por unidad}
 \end{aligned}$$

Estimación de los costos de los materiales para la producción

En este ejemplo, los costos de materiales para la producción consisten en los del material directo que se usa para el maneral, y el de las herramientas que se emplean para maquinar la pieza. El costo unitario de la herramienta se basa en la vida esperada de ésta y el tiempo de maquinado para una unidad individual. La fórmula que se usa para estimar el costo de herramientas es:

$$C_t = C_{tm}(t_m / T)$$

donde C_t = costo de herramienta (\$/unidad)
 C_{tm} = costo del material de la herramienta (\$/herramienta)
 t_m = tiempo de maquinado (min/unidad)
 T = vida promedio de la herramienta (min/herramienta)

Por lo tanto, nuestra estimación del costo de la herramienta por material es

$$C_t = \left(\frac{\$5.00}{\text{herramienta}} \right) \left(\frac{12 \text{ min/unidad}}{300 \text{ min/herramienta}} \right) = \frac{\$0.20}{\text{unidad}}$$

Entonces, el costo total del material para la producción es de $\$1.40/\text{unidad} + \$0.20/\text{unidad} = \$1.60/\text{unidad}$.

A	B	C	D	E	F	G	H
1							
2	Columna A	Columna B		Columna C		Columna D	Columna E
3		Estimación unitaria		Estimación por factor		Estimación	Total del
4	ELEMENTOS DE COSTO DE MANUFACTURA	Unidad	Costo/Unidad	Factor del renglón		directa	renglón
5							
6	A: Mano de obra fabril	0.36	\$8.00				\$2.88
7	B: Mano de obra de planeación			9%	A		0.26
8	C: Control de calidad			15%	A		0.43
9	D: TOTAL DE MANO DE OBRA						3.57
10	E: Indirectos de fabricación			90%	D		3.21
11	F: Gastos generales y admin.			25%	D		0.89
12	G: Material de producción					\$1.60	1.60
13	H: Manufactura externa						0.00
14	I: SUBTOTAL						9.28
15	J: Costos de empaque					\$0.80	0.80
16	K: TOTAL DE COSTO DIRECTO						10.08
17	L: Otros cargos directos						0.00
18	M: Renta de instalaciones						0.00
19	N: TOTAL DE COSTO DE MANUFACTURA						10.08
20	O: Cantidad (tamaño del lote)						1
21	P: COSTO UNITARIO DE MANUFACTURA						10.08
22	Q: Utilidad/por ciento			10%	P		1.01
23	R: PRECIO DE VENTA POR UNIDAD						\$11.09

Figura 7.B.1 Estimación inicial del costo de manufactura y precio de venta

La figura 7.B.1 muestra la hoja de cálculo completa de la estimación del costo de manufactura. Nuestra estimación actual del costo total de manufactura es de \$10.08, lo cual excede el costo objetivo de \$9.09. Ahora se van a identificar algunas áreas de reducción de costo y se aplicará la ingeniería del valor para obtener las disminuciones necesarias.

Establecimiento de metas de costo para las áreas de reducción potencial de costo

Con el empleo de la herramienta *solver* de la hoja de cálculo se determinan con rapidez las metas de costo para categorías específicas. La figura 7.B.2 indica que si se reduce la mano de obra fabril a 0.3135 horas por unidad, es posible lograr el costo objetivo. Como se muestra en la figura 7.B.3, si sólo se reduce el costo de empaque, no se podría alcanzar el costo objetivo. Esto no significa que no se deba buscar disminuir el costo de empaque, sino que también se requiere hacer reducciones en otras áreas.

Aplicación de la ingeniería del valor para obtener la reducción del costo

Se han identificado tres áreas potenciales para la reducción del costo: mano de obra fabril, material para la producción y empaque. Un estudio a profundidad de dichas áreas dio como resultado las siguientes sugerencias de cambios:

1. El rediseño de la parte reduciría el número de operaciones de máquina (y, por lo tanto, el tiempo de maquinado) que se necesitan. La estimación nueva del tiempo de maquinado es de 10.8 minutos.

A	B	C	D	E	F	G	H
2	Columna A	Columna B		Columna C		Columna D	Columna E
3		Estimación unitaria		Estimación por factor		Estimación	Total del
4	ELEMENTOS DE COSTO DE MANUFACTURA	Unidad	Costo/Unidad	Factor	del renglón	directa	Renglón
5							
6	A: Mano de obra fabril	0,3135	\$8,00				\$2,51
7	B: Mano de obra de planeación			9%	A		0,23
8	C: Control de calidad			15%	A		0,38
9	D: TOTAL DE MANO DE OBRA						3,11
10	E: Indirectos de fabricación			90%	D		2,80
11	F: Gastos generales y admin.			25%	D		0,78
12	G: Material de producción					\$1,60	2
13	H: Manufactura externa						0,00
14	I: SUBTOTAL						8,29
15	J: Costos de empaque					\$0,80	0,80
16	K: TOTAL DE COSTO DIRECTO						9,09
17	L: Otros cargos directos						0,00
18	M: Renta de instalaciones						0,00
19	N: TOTAL DE COSTO DE MANUFACTURA						9,09
20	O: Cantidad (tamaño del lote)						1
21	P: COSTO UNITARIO DE MANUFACTURA						9,09
22							
23	Precio de venta del competidor	\$10,00					
24	Rendimiento que se desea sobre las ventas	10%					
25	Costo objetivo	\$9,09					

Figura 7.B.2 Meta de costo para la mano de obra fabril

A	B	C	D	E	F	G	H
2	Columna A	Columna B		Columna C		Columna D	Columna E
3		Estimación unitaria		Estimación por factor		Estimación	Total del
4	ELEMENTOS DE COSTO DE MANUFACTURA	Unidad	Costo/Unidad	Factor	del renglón	directa	renglón
5							
6	A: Mano de obra fabril	0,36	\$8,00				\$2,88
7	B: Mano de obra de planeación			9%	A		0,26
8	C: Control de calidad			15%	A		0,43
9	D: TOTAL DE MANO DE OBRA						3,57
10	E: Indirectos de fabricación			90%	D		3,21
11	F: Gastos generales y admin.			25%	D		0,89
12	G: Material de producción					\$1,60	1,60
13	H: Manufactura externa						0,00
14	I: SUBTOTAL						9,28
15	J: Costos de empaque					-\$0,19	-0,19
16	K: TOTAL DE COSTO DIRECTO						9,09
17	L: Otros cargos directos						0,00
18	M: Renta de instalaciones						0,00
19	N: TOTAL DE COSTO DE MANUFACTURA						9,09
20	O: Cantidad (tamaño del lote)						1
21	P: COSTO UNITARIO DE MANUFACTURA						14
22							
23	Precio de venta del competidor	\$10,00					
24	Rendimiento que se desea sobre las ventas	10%					
25	Costo objetivo	\$9,09					

Figura 7.B.3 Meta de costo para el proceso de empaque

El tiempo de manejo y de cambio de herramientas no se ven afectados por este cambio. La nueva estimación del total de horas de mano de obra fabril es:

$$\text{Mano de obra fabril} = (6.18 \text{ min} + 10.8 \text{ min} + 3.4 \text{ min}) \left(\frac{\text{hora}}{60 \text{ min}} \right) = 0.34 \text{ horas por unidad}$$

Una reducción del tiempo de máquina también ocasionará una reducción del costo de herramientas. El costo nuevo de herramientas sería:

$$C_t = \left(\frac{\$5.00}{\text{herramienta}} \right) \left(\frac{10.8 \text{ min/unidad}}{300 \text{ min/herramienta}} \right) = \frac{\$0.18}{\text{unidad}}$$

2. Las negociaciones con el proveedor de barras de aluminio llevaron a una reducción del costo de la materia prima. Esto se debe a un acuerdo para devolverle todo el material de desecho. En este caso, dicho material es significativo (durante las operaciones de maquinado se retira aproximadamente el 60% del material original). El nuevo costo directo del material es de \$1.10 por unidad. En combinación con el nuevo costo de las herramientas, la nueva estimación del material que se produce es de \$1.28 por unidad.
3. Un análisis de los requerimientos del material de empaque reveló que un menor peso del cartón proporcionaría la protección necesaria durante el envío. La nueva estimación de los costos de empaque es de \$0.55 por unidad.

El impacto de estos cambios en el costo total de manufactura por la manipulación se muestra en la figura 7.B.4. Tomados en forma individual, ninguno de estos cambios tiene el impacto deseado sobre el costo; sin embargo, de manera colectiva producen reducciones suficientes para alcanzar el costo objetivo.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2	Columna A		Columna B		Columna C		Columna D	Columna E
3			Estimación unitaria		Estimación por factor		Estimación	Total del
4	ELEMENTOS DE COSTO DE MANUFACTURA		Unidad	Costo/Unidad	Factor del renglón		directa	renglón
5								
6	A: Mano de obra fabril		0.34	\$8.00				\$2.72
7	B: Mano de obra de planeación				9%	A		0.24
8	C: Control de calidad				15%	A		0.41
9	D: TOTAL DE MANO DE OBRA							3.37
10	E: Indirectos de fabricación				90%	D		3.04
11	F: Gastos generales y admin.				25%	D		0.84
12	G: Material de producción						\$1.28	1.28
13	H: Manufactura externa							0
14	I: SUBTOTAL							8.53
15	J: Costos de empaque						\$0.55	0.55
16	K: TOTAL DE COSTO DIRECTO							9.08
17	L: Otros cargos directos							0.00
18	M: Renta de instalaciones							0.00
19	N: TOTAL DE COSTO DE MANUFACTURA							9.08
20	O: Cantidad (tamaño del lote)							1
21	P: COSTO UNITARIO DE MANUFACTURA							9.08
22	Q: Utilidad/ por ciento				10%	P		0.91
23	R: PRECIO DE VENTA POR UNIDAD							\$9.99

Figura 7.B.4 Estimación final del costo de manufactura y precio de venta