CAPÍTULO 1. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE PLANTAS QUÍMICAS

Capital de inversión

El capital de inversión es la cantidad de dinero requerida para la construcción de una nueva planta o la modificación de una existente (Turton 1998), y es producto de la suma del capital fijo de inversión y el capital de trabajo. El primero se refiere al costo asociado con la construcción de la planta con todos los componentes necesarios para su operación (Peters 2002); el segundo involucra los costos requeridos para iniciar la operación de la planta y financiar los primeros meses antes de que las ganancias por las ventas del producto comiencen.

Capital fijo de inversión

Se subdivide en costo directo e indirecto. El costo directo incluye todos los gastos que están relacionados con la instalación de la planta:

Equipo. El costo del equipo es la parte más importante de la estimación del capital fijo porque representa entre el 15 y el 40% de éste; además, un primer cálculo de los demás componentes del gasto directo se basa en el uso de porcentajes respecto del costo del equipo. Por ejemplo, el costo de instalación (incluyendo pintura y aislamiento) se sabe que representa entre el 25 y el 55 % del costo del equipo (Peters, 2002).

Envío del equipo hasta la planta. La compra del equipo por lo general se hace "libre a bordo", lo que significa que el comprador debe pagar el envío, cuyo costo depende del peso y tamaño del equipo, la distancia de traslado y el método de transporte (camión, barco, avión, etc).

Instalación del equipo. Incluye el costo de la mano de obra, soportes, plataformas y otros factores relacionados con dejar el equipo listo para su operación.

Instrumentación y controles. Depende del nivel de control requerido en la planta. Los instrumentos, su instalación, software, equipo auxiliar y materiales involucran el mayor porcentaje de este gasto.

Tuberías. Este gasto es el segundo en importancia porque representa, de acuerdo con Peters y Timmerhaus, el 20 % del capital fijo. Incluye la mano de obra, válvulas, tuberías, soportes, entre otros.

Sistemas eléctricos. Está integrado por el cableado, iluminación, paneles de control, motores, mano de obra, entre otros.

Edificios. Oficinas, talleres, laboratorios, almacenes, etc., incluyendo la mano de obra, materiales, plomería, iluminación, calefacción, ventilación, etc.

Mejoras del sitio. Son los costos relacionados con cercas, caminos, banquetas, estacionamientos, jardines, etc.

Servicios Auxiliares. Las instalaciones para proveer los servicios auxiliares de la planta (vapor, agua, energía, aire comprimido, combustible, etc) así como las instalaciones de seguridad (bomberos), tratamiento de desechos, primeros auxilios y cafetería están incluidas en este rubro.

Terreno. En muchos casos, el terreno no se considera dentro del capital fijo de inversión.

El costo indirecto se refiere al costo de los factores que no están directamente relacionados con la instalación de la planta:

Ingeniería y supervisión. Está constituido por el costo de diseño e ingeniería, el uso de software, planos, contabilidad, comunicaciones, viáticos, entre otros.

Cuestiones legales. Resultan de la compra del terreno, del equipo, de los contratos para construir, y de otros trámites gubernamentales, ambientales y de seguridad.

Gastos de Construcción. Involucra los gastos por la compra y renta de herramientas y maquinaria, mano de obra, impuestos, seguros, y otros gastos relacionados con la construcción.

Honorarios de los contratistas.

Contingencias. Tormentas, inundaciones, accidentes de transporte, aumento súbito de precios, huelgas, cambios en diseño, errores de estimación y otros eventos inesperados hacen necesario tener un gasto para contingencias.

Capital de trabajo

Es el capital que se requiere para financiar el primer mes de operación de la planta una vez que ésta ya se encuentra instalada y lista para operar en régimen normal.
Está compuesto por el capital necesario para cubrir los salarios, pérdidas en líneas y equipos, defectos de diseño que deben solucionarse, falla de instrumentos, necesidad de equipos adicionales, compra de las materias primas, cuentas por pagar, impuestos, etc.
El capital de trabajo se recupera cuando se cierra la planta al final de la vida del proyecto.

Clasificación de las estimaciones del costo capital

Existen 5 clasificaciones:

Estimación de orden de magnitud. Se basa en la información tomada de plantas previamente construidas. El costo se ajusta de acuerdo con la capacidad de la planta y la

inflación. Únicamente se requiere un diagrama de bloques del proceso. La exactitud de la estimación es de -20% a +40%.
Estimación de estudio. Emplea una lista de los equipos más importantes usados en el proceso, es decir, bombas, compresores, turbinas, columnas, intercambiadores y calderas. Se hace un dimensionamiento aproximado para calcular el costo de los equipos mencionados y se estima el capital de inversión usando porcentajes basados en esos costos. Se necesita un diagrama de flujo del proceso (PFD). La estimación tiene una exactitud de entre -20% y +30%.

Estimación preliminar de diseño. Se hace un dimensionamiento más preciso de los equipos que en la estimación de estudio y se incluyen las estimaciones de tuberías, instrumentación y requerimientos eléctricos, así como de servicios auxiliares. Se emplea el PFD, diagramas de elevación y un plano preliminar de la planta. La exactitud varía de -15 a +25%.

Estimación definitiva. Requiere especificaciones para todos los equipos, servicios auxiliares, instrumentación y servicios eléctricos. Se necesita el PFD final, diagramas de elevación, el plano de la planta y el diagrama preliminar de tuberías e instrumentación (P&ID). Tiene entre -7% y +15% de exactitud.

Estimación detallada. Para hacer la estimación es necesario contar con la ingeniería completa del proceso y todos los servicios. Se requieren cotizaciones de parte de vendedores para los equipos y artículos más caros. Finalizando la estimación detallada la planta puede pasar a la etapa de construcción. Para hacer la estimación se necesitan el PFD y P&ID finales así como los diagramas de elevación, el plano de la planta y los isométricos de tuberías. El rango de exactitud está entre -4% y +6%.

Índice de Costos

Debido a que los costos usados para hacer estimaciones no son válidos para cualquier tiempo por el aumento en los precios a causa de la inflación, es necesario usar un método para ajustar los precios al tiempo requerido. Una forma de hacer este ajuste es usando el índice de costos, que es un número que muestra la relación entre el precio de un bien en un tiempo "t" y el precio del mismo bien en un tiempo base. Si se conoce el costo en una fecha determinada, el costo presente puede determinarse por la siguiente fórmula:

$$\text{Costo presente} = \text{Costo pasado}\left(\frac{\text{Valor presente del índice de costos}}{\text{Valor del índice cuando el costo es conocido}}\right) \qquad (1.1)$$

Los índices de costos pueden usarse para dar una estimación general, pero ningún índice toma en cuenta todos los factores, tales como avances tecnológicos específicos o condiciones locales. Los índices más comunes permiten una estimación aproximadamente correcta si el período de tiempo involucrado es menor de 10 años. Muchos tipos de índices se publican regularmente y algunos de ellos pueden utilizarse para la estimación de los costos de los equipos; otros se aplican específicamente a mano de obra u otros campos específicos como construcción, materiales, etc.

Los índices más usados para la estimación del costo de los equipos y del capital de inversión para plantas químicas son el *Marshall and Swift process-industry equipment indexes* y el *Chemical Engineering Plant Cost index* (CEPCI). La tabla 1.1 tiene el CEPCI de 1950 a 2005. En el Apéndice C hay un ejemplo de la manera como se encuentran reportados los índices de costos.

Tabla 1.1 CEPCI de 1950 a 2005

Año	**CEPCI**	**Año**	**CEPCI**	**Año**	**CEPCI**	**Año**	**CEPCI**
1950	73.9	1968	113.6	1981	297	1994	368.1
1953	84.7	1969	119	1982	314	1995	381.1
1955	88.3	1970	125.7	1983	316.9	1996	381.7
1958	99.7	1971	132.3	1984	322.7	1997	386.5
1959	101.8	1972	132.3	1985	325.3	1998	389.5
1960	102	1973	144.1	1986	318.4	1999	390.6
1961	101.5	1974	164.4	1987	323.8	2000	394.1
1962	102	1975	182.4	1988	342.5	2001	394.3
1963	102.4	1976	192.1	1989	355.4	2002	395.6
1964	103.3	1977	204.1	1990	357.6	2003	401.7
1965	104.2	1978	218.8	1991	361.3	2004	444.2
1966	107.2	1979	238.7	1992	358.2	2005	468.2
1967	109.7	1980	261.2	1993	359.2		

Estimación de costo por equipo

El método más exacto y confiable para estimar el costo de un equipo consiste en obtener una cotización de un proveedor con los precios actuales. Otra opción consiste en usar los precios de equipo previamente comprado con su correspondiente ajuste, y una última opción, que resulta adecuada para estimaciones preliminares, es el uso de gráficas.
El Apéndice A contiene gráficas con los costos para diversos equipos. Dichos costos corresponden a Enero de 2002 con un CEPCI de 390.4. Para actualizar los costos se utiliza la ecuación 1.1.
El costo de un equipo depende de su capacidad, material, temperatura y presión. Cuando se tiene el costo de una unidad similar a la de interés pero con otra capacidad (diferente volumen, diámetro, potencia, área, etc, dependiendo del equipo) se puede hacer el ajuste de precio usando esta relación conocida como factor costo-capacidad:

$$\frac{C_a}{C_b} = \left(\frac{A_a}{A_b}\right)^n \tag{1.2}$$

donde A es el parámetro a comparar, C el costo del equipo, n el exponente del costo y los subíndices a y b son el equipo con el precio a calcular y el equipo con el precio conocido respectivamente. En la tabla 1.2 se puede encontrar el valor de n para diversos equipos.
Cuando no se tiene disponible el valor de n para el equipo en cuestión se puede usar una regla heurística conocida en inglés como *the six tenths rule* que consiste en asignar un valor

de 0.6 al exponente de la ecuación 1.2 ya que el valor de éste se encuentra por lo regular cerca de 0.6 para diferentes equipos.
Además del ajuste de capacidad, también es posible hacer la corrección correspondiente para el material (A_M), presión (A_P) y temperatura (A_T), como lo muestra la ecuación 1.3. En el Apéndice B se pueden encontrar algunos valores comunes para A_M, A_P y A_T.

$$C_a = C_b \left(\frac{A_a}{A_b} \right)^n A_M A_P A_T \qquad (1.3)$$

Tabla 1.2 Exponentes del factor costo-capacidad para diversos equipos

Equipo	Rango de capacidad	n
Mezcladores de doble cono rotatorio de acero al carbón (ac)	1.4 -7.1 m^3	0.49
Soplador (blower) centrífugo	0.5 -4.7 m^3/s	0.59
Centrifugadora de contenedor sólido (ac)	7.5 -75 kW	0.67
Cristalizador a vacío (ac)	15 –200 m^3	0.37
Compresor (incluye motor)	250 -10,000 kW	0.46
Compresor reciprocante de 2 etapas y 1035kPa de descarga	0.005 -0.19 m^3/s	0.69
Compresor rotativo de una etapa y 1035 kPa de descarga	0.05 -0.5 m^3/s	0.79
Secador de tambor simple de operación a vacío	1 -10 m^2	0.76
Secador de tambor simple de operación atmosférica	1 -10 m^2	0.40
Evaporador de tanque horizontal	10 -1000 m^2	0.54
Ventilador centrífugo	0.5 -5 m^3/s	0.44
Ventilador centrífugo	10-35 m^3/s	1.17
Intercambiador de tubo y coraza de cabeza flotante (ac)	10 -40 m^2	0.60
Intercambiador de tubo y coraza de placa fija (ac)	10 -40 m^2	0.44
Caldera enchaquetada de hierro fundido	1 -3 m^3	0.27
Caldera enchaquetada de acero vidriado	0.8 -3 m^3	0.31
Motor de inducción de 440-V	4 -15 kW	0.69
Motor de inducción de 440-V	15 -150 kW	0.99
Bomba centrífuga de ac (incluye motor)	4 -700 kW	0.55
Bomba reciprocante de hierro fundido (incluye motor)	0.0001-0.006 m^3/s	0.34
Bomba centrífuga de acero fundido (incluye motor)	4 -40 $kPa*m^3/s$	0.33
Reactor de acero vidriado enchaquetado (sin controles)	0.2 -2.2 m^3	0.54
Reactor de acero inoxidable (2070 kPa)	0.4 -4 m^3	0.56
Separador centrífugo (ac)	1.5 -7 m^3	0.49
Tanque de cabeza plana (ac)	0.4 -40 m^3	0.57
Tanque de almacenamiento (ac)	5 -200 m^3	0.53
Torre (ac)	500-10^6 kg	0.62
Plato tipo bubble cap (ac)	1 -3 m (diámetro)	1.20
Plato tipo sieve (ac)	1 -3 m (diámetro)	0.86

Métodos para estimar el capital de inversión

Estimación detallada por componente. Es empleado para la estimación detallada del costo capital. Se determina cuidadosamente cada uno de los componentes del capital fijo de inversión y el capital de trabajo. Se debe disponer de todos los diagramas finales de la

planta al igual que de cotizaciones para todos los equipos y materiales. La exactitud es de entre -5 y +5.

Estimación del costo unitario. Este método se usa para preparar estimaciones preliminares y definitivas. Necesita cotizaciones proporcionadas por vendedores o precios corregidos por el índice de costos. El costo de instalación de equipos se evalúa como una fracción del costo de los equipos (incluyendo envío); las estimaciones correspondientes a sistemas eléctricos, instrumentación, tubería, aislamiento, concreto, acero, etc., se obtienen aplicando costos unitarios al material y la mano de obra.
El costo unitario también se aplica al número de diagramas, especificaciones y las horas laborales de ingeniería. Un factor para los gastos de construcción, honorarios de los contratistas y contingencias se obtiene de proyectos previos. La siguiente fórmula resume este método:

$$C_n = \left[\sum (E + E_L) + \sum (f_x M_x + f_y M'_L) + \sum f_e H_e + \sum f_d d_n\right] f_F \qquad (1.4)$$

donde:

C_n = Capital de Inversión
E = Costo del equipo con envío
E_L = El costo laboral del equipo con envío
f_x = Costo unitario del material
M_x = Cantidad del material
f_y = El costo unitario laboral por hora de trabajo para el material
M'_L= Las horas de trabajo para el material
f_e = El costo unitario por trabajo de ingeniería
H_e = Las horas de trabajo ingenieril
f_d = el costo unitario por diagrama o especificación
d_n = Número de diagramas o especificaciones
f_F = El factor de construcción (>1)

La exactitud varía de +20% a -20%.

Porcentaje del costo del equipo + envío. Se aplica para estimaciones de estudio y preliminares. Es necesario contar con el costo del equipo (incluyendo el envío) ya que los demás componentes del capital fijo se obtienen a partir de porcentajes de este costo. El capital de trabajo se calcula como un porcentaje del capital total de inversión. La siguiente ecuación describe este método:

$$C_n = \sum (E + f_1 E + f_2 E + f_3 E ... + f_n E) = E \sum (1 + f_1 + f_2 + f_3 ... + f_n) \qquad (1.5)$$

donde f_1, f_2, f_3…f_n son los factores para la tubería, sistemas eléctricos, instrumentación, costos indirectos, etc.

La exactitud va de -30% a +30%, aunque cuando se aplica a proyectos similares en configuración a otros recientemente terminados, los resultados mejoran considerablemente;

por ejemplo, para plantas iguales pero de diferente capacidad se puede lograr una exactitud de hasta ± 10%. La tabla 1.3 tiene los factores para estimar el costo capital para 3 tipos de plantas.

Factores de Lang. Es empleado para estimaciones de orden de magnitud. El capital se obtiene multiplicando el costo de los equipos (incluyendo el envío) por un factor que depende del tipo de proceso. La tabla 1.4 contiene los factores de Lang más usados.

Tabla 1.3 Factores en base al costo del equipo + envío para estimar el capital de inversión de plantas químicas.

	Factor en base al costo del equipo + envío para plantas		
	Procesadoras de sólidos	**Procesadoras de sólidos y fluidos**	**Procesadoras de fluidos**
Costo Directo			
Equipo	0.91	0.91	0.91
Envío	0.091	0.091	0.091
Equipo + envío	1	1	1
Instalación del equipo	0.45	0.39	0.47
Instrumentación y controles	0.18	0.26	0.36
Tubería	0.16	0.31	0.68
Sistemas Eléctricos	0.1	0.1	0.11
Edificios	0.25	0.29	0.18
Mejoras del sitio	0.15	0.12	0.1
Servicios Auxiliares	0.4	0.55	0.7
Terreno	0.06	0.06	0.06
Costo Indirecto			
Ingeniería y supervisión	0.33	0.32	0.33
Gastos de contrucción	0.39	0.34	0.41
Cuestiones legales	0.04	0.04	0.04
Honorarios de contratistas	0.17	0.19	0.22
Contingencias	0.35	0.37	0.44

- El capital de trabajo es usualmente el 15% del capital total de inversión (aproximadamente el 18% del capital fijo) excepto cuando se trata de plantas que producen bienes de temporada donde el porcentaje se incrementa hasta 50% por la elevada cantidad de inventarios que deben mantenerse durante largos periodos.

Tabla 1.4 Factores de Lang para calcular el capital fijo de inversión y el capital total

- **Factores de Lang**

Tipo de planta	Capital fijo de inversión	Capital total de inversión
Sólidos	4	4.7
Sólidos y fluidos	4.3	5
Fluidos	5	6

Factor de Potencia. Se aplica para estimaciones de estudio y de orden de magnitud. Relaciona el capital fijo de inversión de una nueva planta con el de plantas similares previamente construidas usando un factor exponencial.

$$C_n = Cf_e R^x = C\frac{I_n}{I_0}R^x \qquad (1.6)$$

donde C es el capital fijo de la planta ya construida, I_n es el índice de costos actual, I_0 el índice de costos en el tiempo de la estimación de C, R es la capacidad de la nueva planta entre la capacidad de la planta previamente construida, y x es el factor exponencial.

El valor de x tiene un promedio que está entre 0.6 y 0.7 para la mayoría de los procesos. La tabla 1.5 tiene valores de x para diversas plantas.

Tabla 1.5 Capital fijo para diferentes plantas de proceso (precios del año 2000)

Producto o proceso	Proceso	kg/año	$ 10^6 *	x
Ácido Acético	CH_3OH y CO-catalítico	9×10^6	8	0.68
Acetona	Cat de Cl de propileno en Cu	9×10^7	33	0.45
Amoniaco	Reformación a vapor	9×10^7	29	0.53
Nitrato de Amonio	Amoniaco y ácido nítrico	9×10^7	6	0.65
Butanol	Propileno, CO y H_2O-catalítico	4.5×10^7	48	0.40
Cloro	Electrólisis de NaCl	4.5×10^7	33	0.45
Etileno	Gases de refinación	4.5×10^7	16	0.83
Óxido de Etileno	Etileno-catalítico	4.5×10^7	59	0.78
Formaldehído (37%)	Metanol-catalítico	9×10^6	19	0.55
Glicol	Etileno y cloro	4.5×10^6	18	0.75
Ácido Fluorhídrico	Fluoruro de hidrógeno y H_2O	9×10^6	10	0.68
Metanol	CO_2, gas natural y vapor	5.5×10^7	15	0.60
Ácido Nítrico concentrado	Amoniaco-catalítico	9×10^7	8	0.60

Ácido fosfórico	Fosfato de calcio y H_2SO_4	4.5 x10^6	4	0.60
Polietileno de alta densidad	Etileno- catalítico	4.5 x10^6	19	0.65
Propileno	Gases de Refinería	9 x10^6	4	0.70
Ácido Sulfúrico	Azufre-contacto catalítico	9 x10^7	4	0.65
Urea	Amoniaco y CO_2	5.5 x10^7	10	0.70
		m^3/día		
Alquilación (H_2SO_4)	Catalítico	1.6 x 10^3	23	0.60
Coquización (retardada)	Térmico	1.6 x 10^3	31	0.38
Coquización (fluida)	Térmico	1.6 x 10^3	19	0.42
Craqueo (fluido)	Catalítico	1.6 x 10^3	19	0.70
Craqueo	Térmico	1.6 x 10^3	6	0.70
Destilación (atm)	Vaporización de 65%	1.6 x 10^4	38	0.90
Destilación (vacío)	Vaporización de 65%	1.6 x 10^4	23	0.70
Hidrotratamiento	Desulfuración catalítica	1.6 x 10^3	3.5	0.65
Reformado (Reforming)	Catalítico	1.6 x 10^3	34	0.60
Polimerización	Catalítico	1.6 x 10^3	6	0.58

- *El costo está expresado en millones de dólares

Costo Total del Producto

Es otro componente, además del capital de inversión, necesario para hacer el análisis económico de un proceso. Involucra los costos de operación de la planta, de administración, de mercadotecnia, de investigación y desarrollo, de seguros, la depreciación, entre otros gastos. Se divide en 2 categorías: costos de manufactura y gastos generales.

Costos de manufactura

También llamados costos de operación o de producción incluyen todos los gastos directamente relacionados con el proceso de manufactura en la planta. Dichos gastos pueden dividirse en 3 clasificaciones:

Costos de producción variables

Se incurre en estos gastos sólo cuando la planta está operando y varían de acuerdo al nivel de producción. Dichos gastos son:

Materia prima. Se refiere a los materiales que se consumen de manera directa para hacer el producto final. Los materiales que no intervienen de manera directa como los solventes y catalizadores se consideran en otra categoría.

Mano de obra de operación.

Supervisión y asistencia administrativa. Está relacionada con la cantidad de mano de obra de operación requerida, la complejidad para operar la planta y los estándares de calidad necesarios.

Servicios auxiliares. Son los requerimientos de vapor, electricidad, agua de enfriamiento, aire comprimido, gas natural, gasolina, refrigeración y tratamiento de desechos. Su costo depende de la cantidad a utilizar, la localización de la planta y la fuente del servicio.

Mantenimiento y reparaciones.

Suministros para la operación. Aceites lubricantes y reactivos químicos se consideran en este gasto.

Gastos de laboratorio. Involucra el costo de las pruebas de laboratorio para control de calidad.

Derechos y patentes. Son los costos por usar procesos y productos patentados.

Solventes y catalizadores.

Cargos fijos

Son los costos que no se ven afectados por el nivel de producción:

Depreciación. El equipo de la planta y los edificios asociados con el proceso (el capital fijo de inversión en general, excepto el terreno) tienen un valor que disminuye con el tiempo. Cuando se cierra la planta, el equipo puede venderse sólo por una fracción del costo original. La diferencia entre el costo original y el valor residual o de rescate (valor de venta cuando se cierra la planta) es la depreciación, la cual se representa como un gasto anual. El periodo para depreciar lo establece el gobierno federal, debido a que la ley no permite cargar todo el gasto de la depreciación en un mismo año.

Intereses. Son la compensación a pagar por usar dinero prestado. Si la planta se va a construir con capital prestado es necesario hacer el cálculo de intereses, para los cuales se establece una tarifa fija en el momento del préstamo.

Impuestos. Su magnitud depende de la ubicación de la planta y de las leyes locales.

Seguro. Depende del tipo de proceso llevado a cabo en las operaciones de manufactura y de la cantidad de instalaciones aseguradas.

Renta. En estimaciones preliminares generalmente no se incluye.

Costos generales de la planta

Son los gastos requeridos para servicios de rutina en la planta, como seguridad y protección, servicio médico, empaquetado, almacenamiento, restaurante y recreación.

Gastos generales

Se clasifican de la siguiente manera:

Costos administrativos. Comprende los salarios de administradores, secretarias, contadores, ingenieros, entre otros; así como suministros y equipo de oficina y de comunicaciones.

Costos de distribución y de mercadotecnia. Son los gastos por el proceso de venta y distribución del producto.

Investigación y desarrollo. Abarca los salarios del personal involucrado en esta área, los costos fijos y de operación de los equipos, y los materiales y suministros necesarios.

Estimación del Costo Total del Producto

Materia Prima. Es uno de los gastos más importantes dentro de los costos de manufactura, pues varía del 10 al 60 % del costo total del producto.
Una cotización de un proveedor es lo recomendable para la estimación, pero si no se cuenta con una, pueden usarse los precios publicados en revistas. Dichos precios usualmente no incluyen envío, de modo que se debe agregar el costo del transporte, el cual es aproximadamente el 10% del costo de la materia prima.
La cantidad de materia prima que debe ser suministrada por unidad de tiempo o unidad de producto se determina a partir de balances de materia del proceso.

Mano de obra de operación. Se divide en capacitada y no capacitada. Representa entre el 10 y el 20 por ciento del costo total del producto. Para análisis preliminares la cantidad de mano de obra necesaria se puede estimar a partir de información publicada de procesos similares. También se puede calcular analizando el trabajo a ser realizado, considerando el tipo y arreglo de los equipos, su cantidad, y la instrumentación y control del proceso.

Un operador trabaja en promedio 49 semanas al año con 5 turnos de 8 horas a la semana. El resultado son 245 turnos al año. Una planta opera normalmente 24 horas al día, requiriendo 3 turnos. Trabajando 365 días al año se requieren 1095 turnos. Dividiendo 1095/245 se obtiene como resultado que se necesitan 4.47 operadores para cubrir todos los turnos del año. En conclusión, se deben contratar 4.5 operadores por cada operador requerido en la planta a cualquier tiempo.

La tabla 1.6 muestra los requerimientos de mano de obra para varios equipos de proceso. La tabla 1.7 contiene los costos de la mano de obra capacitada y no capacitada para diciembre de 2001 en EUA.

Servicios Auxiliares. La tabla 1.7 contiene el costo para los servicios auxiliares (en EUA), cuya cantidad se determina en base a los balances de materia y de energía del proceso.

Catalizadores y solventes. Al igual que con las materias primas se pueden obtener cotizaciones, o bien, usar precios publicados.

Supervisión y asistencia administrativa
Mantenimiento y reparaciones
Suministros de operación
Gastos de laboratorio
Patentes y derechos
Gastos generales de planta
Seguro
Impuestos
Costos administrativos
Distribución y mercadotecnia
Investigación y desarrollo

Los costos relacionados con estas categorías se pueden obtener a partir de los porcentajes mostrados en la tabla 1.8.
Depreciación. El cálculo de la depreciación puede hacerse por 3 métodos diferentes:

<u>Método de la línea recta, LR</u>. Una cantidad igual se carga cada año durante el periodo de depreciación permitido:

$$d_k^{LR} = \frac{CFI' - S}{n} \tag{1.7}$$

donde d es la depreciación, CFI' el capital fijo de inversión excluyendo el terreno, S el valor residual de la planta, n el periodo de depreciación (usualmente 9.5 años) y el subíndice k indica el año para el cual se hace la estimación.

Tabla 1.6 Requerimiento de mano de obra para diversos equipos

Tipo de equipo	**Operadores por turno**
Servicios Auxiliares	
Plantas de aire comprimido	1

Calderas	1
Torres de enfriamiento	1
Desmineralizadoras de agua	0.5
Plantas de generación eléctrica	0.5
Plantas portátiles de generación eléctrica	3
Subestaciones eléctricas	0
Incineradores	2
Unidades de refrigeración mecánica	0.5
Plantas de tratamiento de agua de desecho	2
Plantas de tratamiento de agua	2
Equipo de proceso	
Evaporadores	0.3
Vaporizadores	0.05
Hornos	0.5
Ventiladores	0.05
Compresores y sopladores	0.15
Intercambiadores de calor	0.1
Torres	0.35
Bombas	0.0
Reactores batch	1
Reactores continuos	0.5
Separadores centrífugos	0.35
Cristalizadores mecánicos	0.16
Secadores rotatorios	0.5
Secadores de spray	1
Secadores de platos	0.5
Filtros de vacío	0.2
Filtros de marco y plato	1
Filtros rotatorios	0.1

Tabla 1.7 Costo de los servicios auxiliares y mano de obra.

Servicio	**Costo (dólares)**
Electricidad	0.045 $/kWh (2000)
Combustible	
Carbón	0.35 $/GJ (2000)
Petróleo	1.30 $/GJ (2000)
Coke de petróleo	0.17 $/GJ (2000)
Gas	1.26 $/GJ (2000)
Refrigeración	
5°C	20 $/GJ (1998)
-20°C	32 $/GJ (1998)
-50°C	60 $/GJ (1998)
Vapor saturado	
10^3 - 10^4 kPa	4.4 $/1000 kg (2001)
Agua	
Desecho	0.53 $/1000 kg (2001)
Tratamiento	0.53 $/1000 kg (2001)

Desechos	
Peligrosos	145 $/1000 kg (1998)
No peligrosos	36 $/1000 kg (1998)
Agua	
De enfriamiento	0.08 $/1000 kg (2001)
De proceso	0.53 $/1000 kg (2001)
Mano de obra	
Capacitada	33.67 $/h (2001)
No capacitada	25.58 $/h (2001)

Tabla1.8 Porcentajes para estimar el costo de algunas categorías del costo total del producto

Categoría	**%**
Supervisión y asistencia administrativa	15 % del costo de mano de obra de operación
Mantenimiento y reparaciones	7 % del capital fijo de inversión
Suministros de operación	15 % del costo de mantenimiento y reparaciones
Gastos de Laboratorio	15 % del costo de mano de obra de operación
Patentes y derechos	4 % del costo total del producto
Costos generales de la planta	60 % del costo de mano de obra, supervisión y mantenimiento
Impuestos (área muy poblada)	3 % del capital fijo de inversión
Impuestos (área poco poblada)	1.5 % del capital fijo de inversión
Seguro	1 % del capital fijo de inversión
Costos Administrativos	20% del costo de mano de obra de operación
Distribución y mercadotecnia	11% del costo total del producto
Investigación y desarrollo	5 % del costo total del producto

Método de la suma de los dígitos anuales, SDA. Su nombre se debe a que el denominador de la ecuación 1.8 es igual a la suma de los años del periodo de depreciación, por ejemplo, para 5 años de depreciación la suma es 15 (1+2+3+4+5).

$$d_k^{SDA} = \frac{(n+1-k)(CFI'-S)}{\frac{n}{2}(n+1)} \tag{1.8}$$

Método del doble saldo decreciente, DSD. En este método la depreciación anual es una fracción constante de la cantidad de capital que aún no se ha depreciado (valor en libros). Debido a que el valor residual no se toma en cuenta, como se puede ver en la ecuación 1.9, la depreciación del último año debe ajustarse para obtener el capital depreciable D (CFI'-S), que es la suma de las depreciaciones anuales.

$$d_k^{DSD} = \frac{2}{n}\left(CFI' - \sum_{j=0}^{j=k-1} d_j\right) \tag{1.9}$$

Intereses. Existen dos formas básicas de calcular el interés, ellas son el interés simple y el interés compuesto. El interés simple se caracteriza por el hecho de que los intereses producidos por el capital en un periodo dado no se acumulan a dicho capital y no generan más intereses en el próximo período.

$$F_n = P(1 + i_s n) \tag{1.10}$$

donde F_n es el valor de la inversión en n años, P es el capital invertido e i_s el interés simple. El interés a pagar en cualquier año es Pi_s.

En el interés compuesto, a diferencia del interés simple, los intereses producidos por el capital en un determinado periodo se suman a este capital (se reinvierten) y generan más intereses en el próximo período. El valor de la inversión en el año n se calcula de la siguiente manera:

$$F_n = P(1 + i)^n \tag{1.11}$$

El interés a pagar en un año determinado es $Pi(1+i)^{n-1}$.

Ingresos

Las ganancias generadas por la venta de los productos son el tercer y último componente que se necesita para evaluar económicamente un proceso.

Ingresos, \$/año = ∑(producto vendido, kg/año)(precio del producto, \$/kg)
Para estudios preliminares la producción del primer año se toma como el 50% de la capacidad anual de la planta, dado que al inicio de la operación la producción es baja. Para los siguientes años se usa el 100% de la capacidad, tomando en cuenta que comúnmente una planta trabaja entre 300 y 330 días al año.

Flujo de Caja

El flujo de caja o flujo de efectivo es un estado de cuenta que permite medir las inversiones, los costos y los ingresos de un proyecto resumiendo las entradas y salidas de dinero a lo largo de la vida útil del proyecto, por lo que permite determinar la rentabilidad de la inversión.

La diferencia entre los ingresos y el costo total del producto es la utilidad o ganancia bruta, que se expresa como:

$$G_j = s_j - c_j - d_j \tag{1.12}$$

Donde G es la utilidad bruta, s los ingresos, c el costo total del producto y d la depreciación. El subíndice j indica el año.

La utilidad neta (N_p) es la cantidad restante de la ganancia bruta cuando se paga el impuesto sobre los beneficios (impuesto directo sobre las ganancias):

$$N_{pj} = G_j(1-\phi) \tag{1.13}$$

ϕ es el impuesto fraccional sobre el ingreso

Finalmente, el flujo de caja A_j es:

$$A_j = N_{pj} + d_j \tag{1.14}$$

que también puede expresarse como:

$$A_j = (s_j - c_j)(1-\phi) + d_j\phi \tag{1.15}$$

Con el flujo de caja puede trazarse el "diagrama de flujo de caja acumulado" que permite hacer un análisis más fácilmente. La tabla 1.9 contiene los valores de flujo de caja usados para hacer el diagrama de la figura 1.1.

Tabla 1.9 Flujo de caja para un determinado proyecto

Año		Flujo de caja ($/Dólares)	Flujo de caja acumulado
0	T	-200,000	-200,000
1	CFI'1	-900,000	-1,100,000
2	CFI'2 + CT	-900,000	-2,000,000
3	Inicio de operaciones	400,000	-1,600,000
4		500,000	-1,100,000
5		480,000	-620,000
6		460,000	-160,000
7		450,000	290,000
8		440,000	730,000
9	Último año de depreciación	430,000	1,160,000
10		425,000	1,585,000
11		425,000	2,010,000
12	425,000 + S + CT* + T	1,025,000	3,035,000

T = Terreno (200,000); CFI'1 = Capital fijo de inversión, sin terreno, en el primer año (900,000); CFI'2 = Capital fijo de inversión en el segundo año (600,000); CT = Capital de Trabajo (20% de la suma de CFI'1 + CFI'2); S = Valor de rescate de la planta (100,000).

* El Capital de Trabajo se recupera cuando se cierra la planta.

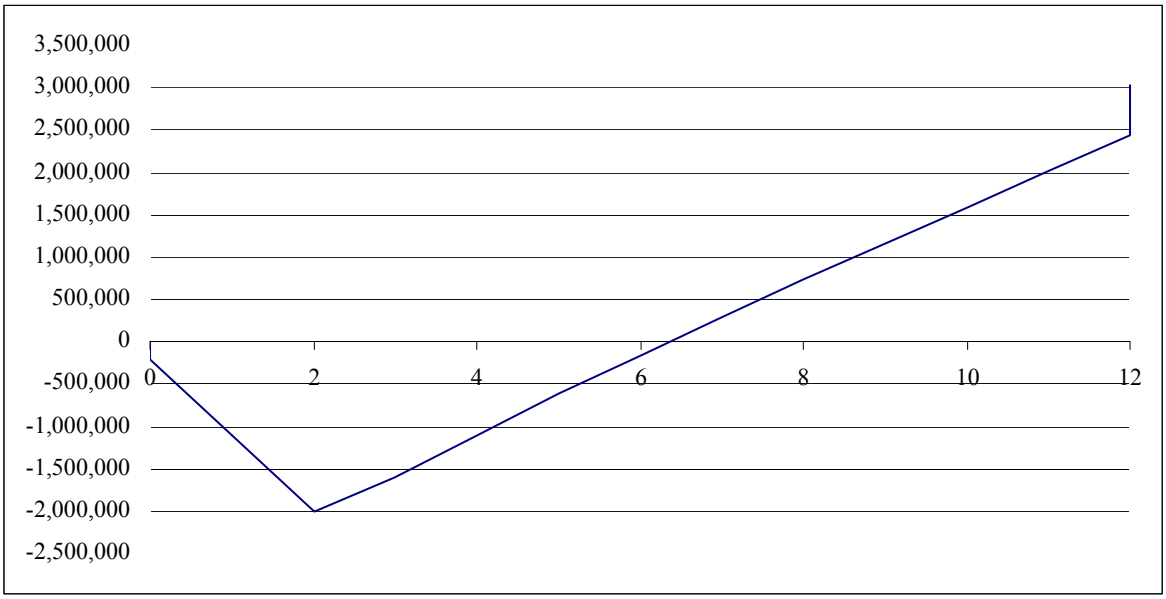

Figura 1.1 Ejemplo de diagrama de flujo de caja acumulado (datos de la tabla 1.9).

Al hacer comparaciones es conveniente evaluar en las mismas condiciones, por lo que los flujos de caja de los diferentes años deben llevarse al tiempo cero para su análisis. Llevar al tiempo cero significa quitar los efectos de la inflación y de los intereses generados por la inversión del capital. Para hacer esto hay que multiplicar el flujo de caja del año en cuestión por el siguiente factor: $(1 + i')^{-n}$ ó $(1 + i_f)^{-n}$, siendo i' el interés, i_f la inflación y n el año. El efecto de la inflación no se considera para evaluaciones preliminares por la complejidad para predecirla.
El interés usado para este ajuste se conoce como tasa de interés interna, la cual es generalmente determinada por la misma compañía, y representa la tasa mínima de rendimiento que la compañía aceptará para cualquier inversión que haga.

La tabla 1.10 contiene los mismos datos de la tabla 1.9 pero incluyendo el ajuste al tiempo cero con una tasa de interés interna del 10%. La figura 1.2 tiene el diagrama de flujo de caja acumulado correspondiente.

Tabla 1.10 Flujo de caja con ajuste al tiempo cero para un determinado proyecto (i'=10%).

Año	**Flujo de caja ($)**	**Flujo de caja al tiempo cero**	**Flujo de caja acumulado**
0	-200,000	-200,000	-200,000
1	-900,000	-818,182	-1,018,182
2	-900,000	-743,802	-1,761,983
3	400,000	300,526	-1,461,458
4	500,000	341,507	-1,119,951
5	480,000	298,042	-821,909
6	460,000	259,658	-562,251
7	450,000	230,921	-331,329

8	440,000	205,263	-126,066
9	430,000	182,362	56,296
10	425,000	163,856	220,152
11	425,000	148,960	369,112
12	1,025,000	326,597	695,708

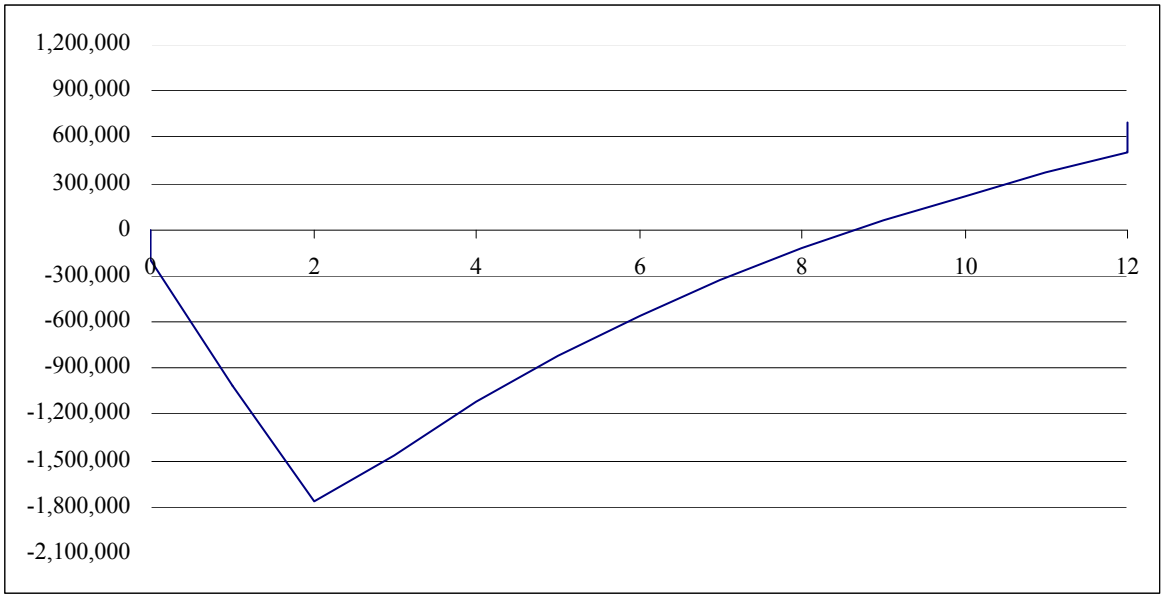

Figura 1.2 Ejemplo de diagrama de flujo de caja acumulado (datos de la tabla 1.10).

Métodos Usados para la Evaluación de la Rentabilidad de Proyectos

Existen 3 criterios:

Criterio del tiempo. Para este criterio se usa el método del *Periodo de Reembolso* (PBP) para hacer la evaluación. El periodo de reembolso es el tiempo requerido, después del inicio de las operaciones en la planta, para recuperar el capital fijo de inversión del proyecto. Entre más corto sea el tiempo necesario para recuperar el capital fijo, más rentable será el proyecto.

Criterio del Capital. El método aplicado es el de *Posición del Capital Acumulado* (CCP), que es el valor del proyecto al final de su vida. Debido a que es difícil comparar proyectos con un capital fijo de inversión distinto se usa la *Proporción del Capital Acumulado* (CCR), que se expresa como sigue:

$$\text{CCR} = \frac{\text{Posición acumulada del capital}}{\text{Capital de inversión (Terreno} + \text{Capital fijo} + \text{Capital de trabajo)}} \tag{1.16}$$

Los valores mayores a 1 indican proyectos redituables.

Cuando se usan los flujos de caja en el tiempo cero, el término de "posición del capital acumulado" se cambia por el de *Valor Neto Presente* (NPV), y el de "proporción del capital acumulado" por el de *Proporción del Valor Presente* (PVR). Los criterios usados para la evaluación son los mismos que para los flujos de caja sin ajuste al tiempo cero.

Criterio de la tasa de Interés. Se emplea el método de la *Tasa de Recuperación de la Inversión* (ROI).

$$\text{ROI} = \frac{\text{Promedio de Ganancias netas anuales}}{\text{Capital de inversión (Terreno} + \text{Capital fijo} + \text{Capital de trabajo)}} \tag{1.17}$$

Entre más grande sea el ROI el proyecto será más rentable.

Cuando la evaluación va a hacerse tomando en cuenta el valor del dinero en el tiempo, en otras palabras, con ajustes al tiempo cero, se usa la *Tasa de Recuperación del Flujo de Caja Reducido* (DCFROR o IRR), que es la tasa de interés que debe aplicarse al hacer el ajuste al tiempo cero para que el NPV sea cero. La solución se encuentra por medio de un proceso iterativo. Si la tasa de interés calculada para el IRR es mayor que la tasa de interés interna, el proyecto es redituable. La rentabilidad se incrementa conforme lo hace también el IRR.