

Diseño, Simulación, Optimización y Seguridad de Procesos

COSTOS Y EVALUACIÓN FINANCIERA DE PLANTAS QUÍMICAS

Dr. Nicolás José Scenna

Dr. Néstor Hugo Rodríguez

Dr. Juan Ignacio Manassaldi

COSTOS Y EVALUACIÓN FINANCIERA DE PLANTAS QUÍMICAS

1. OBJETIVOS.
2. LA ESTIMACIÓN DE COSTOS Y EL DISEÑO DE PROCESOS.
3. COSTOS DE CAPITAL DE UNA PLANTA QUÍMICA.
4. COSTOS OPERATIVOS DE UNA PLANTA QUÍMICA.
5. EVALUACIÓN FINANCIERA: CALCULO DE LA RENTABILIDAD DE UNA PLANTA QUÍMICA.
6. RESUMEN.
7. BIBLIOGRAFIA.

1. OBJETIVOS

En este capítulo se presenta una metodología básica para estimar los costos de capital, los costos operativos y la rentabilidad financiera de una planta química. Al finalizar este capítulo, el lector estará en grado de:

- Identificar las principales categorías en las que se pueden dividir los costos de capital y los costos operativos de una planta.
- Entender la forma en la que el costo de los equipos de proceso se relaciona con su capacidad.
- Entender el concepto de costo modular y su aplicación al cálculo del costo de capital de una planta.
- Entender la manera en la que algunos de los costos operativos de una planta se relacionan con los demás.
- Plantear el modelo de flujo de caja de un proyecto de producción de sustancias químicas y calcular su rentabilidad.
- Entender la manera en que estos modelos se utilizan en la toma de decisiones de diseño y optimización de plantas químicas.

2. LA ESTIMACIÓN DE COSTOS Y EL DISEÑO DE PROCESOS

La evaluación es una actividad con la que se puede cuantificar la bondad de un diseño con base en un criterio particular, generalmente la rentabilidad. También se mostró que en la evaluación se integra buena parte de la información obtenida durante la simulación del proceso y el dimensionamiento de los equipos que lo conforman. Bajo esta perspectiva, los algoritmos de estimación de costos son el puente que une la simulación y el dimensionamiento con la evaluación financiera de una planta química. Es decir, a partir de las características de la planta, la estimación de costos ofrece buena parte de la información necesaria para el planteamiento de un modelo de flujo de caja, base de la evaluación financiera.

3. COSTOS DE CAPITAL DE UNA PLANTA QUÍMICA

En el ámbito de los proyectos, los costos de capital son aquellos relacionados con el diseño y la construcción de instalaciones de producción. Para el caso de una planta química estos costos incluyen la compra de equipos, construcción de las estructuras y edificios, montaje, instalación, etc. Es decir, todos los costos de inversión en los que se debe incurrir para obtener una planta química construida y lista para operar.

Antes presentar los algoritmos para calcular estos costos, es bastante útil establecer una clasificación de los mismos.

3.1. CLASIFICACIÓN DE LOS COSTOS DE CAPITAL

Estrictamente hablando, los costos en los que se incurre durante la concepción y construcción de una planta química son muchísimos, y la elaboración de un listado detallado es algo contraproducente e innecesario durante la evaluación del diseño conceptual y básico de plantas químicas.

Una clasificación general de costos se muestra en la Tabla 5-1 (70)

COSTOS DIRECTOS		
Adquisición de equipos	C_{Eq}	Corresponde al costo de los equipos puestos en puertos de los países de origen (FOB = Free On Board).
Materiales de instalación	C_{Mat}	Corresponde al costo de los materiales de instalación de cada uno de los equipos. Se incluye: Tubería, materiales de aislamiento y protección contra el fuego, fundaciones y soportes estructurales, instrumentación, materiales de instalación eléctrica y pintura.
Mano de obra de instalación	C_{MOI}	Corresponde al costo de la mano de obra necesaria para la instalación de los equipos y los materiales asociados a estos.
COSTOS INDIRECTOS		
Transporte, seguros, impuestos	C_{TSI}	Corresponde al costo de transporte de los equipos y materiales de instalación, desde el lugar de origen hasta el sitio de construcción de la planta. También se incluye el costo de los seguros que es necesario tomar para el transporte y los impuestos de adquisición, importación, etc.
Generales de construcción	C_{Gen}	Incluye las prestaciones sociales (vacaciones, cesantías, seguridad social) de todo el personal involucrado en la construcción (obreros y supervisores), así como el salario del personal de supervisión.
Ingeniería	C_{Ing}	Incluye los salarios y las prestaciones sociales de la gerencia del proyecto y de todo el personal involucrado en la elaboración de la ingeniería (Ingenieros, dibujantes, etc..).

Tabla 1: Clasificación de los costos de capital de una planta química

COSTOS DE CONTINGENCIA Y TARIFA		
Contingencias	C_{Cont}	Rubro que opera como un margen de seguridad para el manejo de situaciones imprevistas tales como retrasos en la construcción por mal tiempo, pequeños cambios en el diseño, pequeños cambios en los precios y costos asociados a la planta, etc.
Tarifa del contratista	C_{Tc}	Cantidad libre de los costos de administración, de ingeniería y costos generales, que recibe el contratista (empresa de ingeniería y construcción) por su trabajo.
COSTOS DE INSTALACIONES AUXILIARES		
Desarrollo del sitio	C_{Sit}	Incluye el costo del terreno; la adecuación del terreno (excavación y movimiento de tierra); la instalación de los sistemas de distribución eléctrica, acueducto, alcantarillado, y su conexión a las redes públicas; construcción de las carreteras internas, andenes, parqueaderos, etc.
Edificios auxiliares	C_{Aux}	Incluye los edificios administrativos, talleres de mantenimiento, estaciones de control, bodegas, y edificios de servicio tales como cafeterías, instalaciones médicas, etc.
Servicios industriales y "Off Sites"	C_{SIO}	Incluye las instalaciones de almacenamiento, carga y descarga de materias primas y productos; todos los equipos necesarios para el suministro de los servicios industriales del proceso (calderas, torres de enfriamiento, unidades de secado de aire para instrumentos, sistema de distribución de combustible, etc.), instalaciones para el tratamiento de residuos industriales (tratamiento de aguas, incineradores, antorchas, etc.) y sistemas de protección contra el fuego (rociadores, hidrantes, etc.).

Tabla 1 (Cont.): Clasificación de los costos de capital de una planta química.

Esta tabla muestra las cuatro categorías principales de costos, y los costos incluidos en cada una.

Costos directos

Los costos directos son aquellos que tienen una relación más estrecha con la capacidad de producción nominal de la planta que se pretende construir. Es decir, son costos que crecen directamente con la magnitud de la planta. Evidentemente, entre más alta la capacidad de una planta, mayor es el costo de los equipos que se requieren, mayor es la cantidad de materiales necesarios para la instalación de los equipos, y mayor es la cantidad de mano de obra necesaria para instalar los equipos y materiales.

Costos indirectos

Estos costos, aunque están relacionados con la magnitud de la planta que se pretende construir, no poseen una relación tan cercana como aquella de los costos directos. En términos generales, factores como el tipo de tecnología que se emplea en la planta, el manejo que se le da a la gestión de las compras de los equipos y materiales, el manejo legal del pago de impuestos, acuerdos especiales con la empresa encargada del diseño relación (costo)-(magnitud de la planta). de la planta, etc., pueden influir en la relación (costo)-(magnitud de la planta).

Por ejemplo, los costos de adquisición y transporte de los equipos para una planta con características determinadas pueden disminuir o aumentar dependiendo de los países de origen y de las oportunidades que se presenten para transportar múltiples equipos en un mismo

embarque. Los asesores tributarios pueden recurrir a normas especiales de reducción de impuestos aplicables a ciertos casos. El costo del desarrollo de la ingeniería de una planta basada en un diseño existente puede ser mucho menor que el costo del desarrollo de un diseño completamente nuevo.

Costos de contingencia y tarifa

En esta categoría se incluye la tarifa neta que recibe el contratista por su trabajo, así como una cantidad destinada al manejo de pequeños imprevistos que pueden surgir durante el desarrollo del proyecto.

Costos de instalaciones auxiliares

En esencia, constituyen los costos de todas las instalaciones diferentes a las de producción (edificios administrativos, servicios industriales, zonas de almacenamiento de materias primas y productos terminados, etc.).

Para encontrar el costo de capital total de una planta química es necesario estimar cada uno de los costos incluidos en cada una de las categorías.

3.2. MÉTODO DE LOS COSTOS MODULARES

Hay muchas formas de determinar el costo total de capital de una planta. La más directa implica el cálculo de cada uno de los costos discutidos en la sección anterior. Sin embargo, una forma alternativa se fundamenta en las relaciones que existen entre cualquiera de los costos y el costo de adquisición de los equipos. Es decir, las correlaciones de datos demuestran que todos los costos (C_{Mat} , C_{MOI} , C_{TSI} , C_{gen} , C_{Ing} , C_{Contr} , C_{TC} , C_{Sit} , C_{Aux} , C_{SIO}) dependen directamente del costo de adquisición de los equipos (C_{Eq}).

Uno de los métodos que emplea esta relación es el denominado "Método de los costos modulares de Guthrie". De acuerdo con esta metodología, todos y cada uno de los costos de una planta son directamente proporcionales al costo de adquisición de los equipos. De esta forma, el cálculo del costo de capital total de una planta se puede calcular a partir del costo de adquisición de los equipos y una serie de factores de proporcionalidad o factores de corrección.

Dado que estos factores de proporcionalidad relacionan el C_{Eq} con el resto de los costos de capital de la planta, el método asocia directamente cada pieza de equipo con una fracción de cada uno de estos costos. Estas relaciones dan origen al concepto de costo modular. El costo modular de un equipo es el valor que resulta al sumar los costos directos e indirectos asociados a un equipo particular. Es decir, este valor incluye el costo de adquisición FOB del equipo, los materiales asociados a su instalación, la mano de obra asociada a su instalación, etc.

De lo anterior resulta evidente que la suma de los costos directos e indirectos de una planta puede calcularse como la suma de los costos modulares de los equipos que la componen.

3.3. CÁLCULO DEL COSTO MODULAR DE UN EQUIPO

En su forma más simple, el costo modular de un equipo ($C_{M(k)}$) puede calcularse a partir de un costo de adquisición de referencia del equipo ($C_{Eq(k)}^0$) y un factor de corrección llamado factor de costo modular ($F_{CM(k)}$).

$$C_{M(k)} = F_{CM(k)} \cdot C_{Eq(k)}^0 \quad (1)$$

El costo de adquisición de referencia es el costo de un equipo, construido en un material de referencia (generalmente acero al carbón C.S.) y diseñado suponiendo una presión operativa de

1 barg. En la literatura existen múltiples trabajos de correlación de costos de adquisición de equipos. Según Turton el costo de adquisición de referencia de un equipo se puede correlacionar con su capacidad (A_k) mediante una expresión del tipo:

$$\left| \text{Log}_{10} (C_{Eq(k)}^0) = K_{1(k)} + K_{2(k)} \cdot \text{Log}_{10} (A_k) + K_{3(k)} \cdot (\text{Log}_{10} (A_k))^2 \right. \quad (2)$$

Las constantes $K_{1(k)}$, $K_{2(k)}$, $K_{3(k)}$, para diferentes tipos de equipos se presentan en el Apéndice A.

El parámetro característico (A_k) indica la capacidad del equipo:

- Para recipientes a presión (reactores, separadores, torres, etc.) A_k =(Longitud del recipiente [m]. Se presentan correlaciones para diferentes diámetros de recipiente.
- Para elementos internos de recipientes (platos, desnebulizadores, etc.): A_k ≡ (Diámetro del recipiente al que pertenecen) [m].
- Para intercambiadores de calor: A_k ≡(Área de intercambio) [m^2]
- Para bombas: A_k =(Potencia en el eje) A_k ≡ [kW]
- Para ventiladores: A_k ≡ (Flujo volumétrico estándar) [std_ m^3 /s].
- Para compresores: A_k ≡(Potencia hidráulica) [kW]
- Para motores eléctricos: A_k ≡(Potencia en el eje) [kW]
- Para hornos y calentadores por combustión: A_k ≡ (Flujo de calor) [kW]
- Para evaporadores: A_k ≡(Área de Intercambio) [m^2]

Por su parte, el factor de costo modular ($F_{CM(k)}$) es una constante de proporcionalidad que se aplica sobre el costo de adquisición de referencia de un equipo para tener en cuenta las demás fracciones de costo que componen el costo modular. Este factor depende de la presión operativa del equipo y del material de construcción. Particularmente, el factor de costo modular se calcula a partir de un factor de presión ($F_{P(k)}$) y un factor de material ($F_{M(k)}$) mediante:

$$\left| F_{CM(k)} = B_{1(k)} + B_{2(k)} \cdot F_{P(k)} \cdot F_{M(k)} \right. \quad (3)$$

Las constantes $B_{1(k)}$, $B_{2(k)}$ para diferentes tipos de equipos se presentan en el Apéndice A.

El factor de material ($F_{M(k)}$) es un factor con el que se tiene en cuenta el efecto del material de construcción sobre el costo modular del equipo. El Apéndice A presenta el valor de estos factores para diferentes materiales y diferentes equipos. Por su parte, el factor de presión ($F_{P(k)}$) es un factor de corrección con el que se tiene en cuenta el impacto de la presión operativa de un equipo (P_k [barg]) sobre su costo modular. Comúnmente, aunque no siempre, se correlaciona mediante:

$$\left| \text{Log}_{10} (F_{P(k)}) = C_{1(k)} + C_{2(k)} \cdot \text{Log}_{10} (P_k) + C_{3(k)} \cdot (\text{Log}_{10} (P_k))^2 \right. \quad (4)$$

Las constantes $C_{1(k)}$, $C_{2(k)}$, $C_{3(k)}$ para diferentes tipos de equipos se presentan en el Apéndice A.

3.4. CÁLCULO DEL COSTO MODULAR DE REFERENCIA DE UN EQUIPO

Cuando un equipo está diseñado para ser construido con el material de referencia y para operar a una presión cercana a la presión atmosférica, los factores de presión y material generalmente toman un valor unitario. En este caso, los factores de costo modular de referencia ($F_{CM(k)}^0$) y los costos modulares de referencia ($C_{M(k)}^0$) se relacionan mediante

$$\left| C_{M(k)}^0 = F_{CM(k)}^0 \cdot C_{Eq(k)}^0 \quad , \quad F_{CM(k)}^0 = B_{1(k)} + B_{2(k)} \right. \quad (5)$$

Como se verá más adelante, los costos modulares de referencia de los equipos son valores necesarios en el cálculo del costo de capital total de una planta.

Recuerde, las ecuaciones mostradas hasta este punto para la el cálculo de los costos modulares son las más comunes pero no las únicas. De hecho, dos equipos de diferente tipo pueden tener diferentes condiciones de referencia (presión y material), así como diferentes ecuaciones de correlación para el costo de adquisición de referencia. Por este motivo, antes de iniciar los cálculos, es necesario entender claramente la información disponible respecto a cada tipo de equipo.

3.5. CÁLCULO DEL COSTO DE CAPITAL TOTAL DE UNA PLANTA QUÍMICA

La sumatoria de todos los costos modulares de los equipos es una buena base para el cálculo del costo total de capital de una planta. Sin embargo, dado que los costos modulares sólo tienen en cuenta los costos directos y los costos indirectos, es necesario ajustar esta sumatoria para incluir los costos de contingencia y tarifa, así como los costos de las instalaciones auxiliares.

Costo modular total (C_{MT}): Corresponde al costo modular corregido para incluir los costos de contingencia y tarifa. El costo de contingencia equivale aproximadamente al 15% del costo modular, y el costo de tarifa equivale aproximadamente al 3% del costo modular. Este concepto se aplica tanto a un equipo como a un conjunto de estos.

$$\left| C_{MT} = \sum_{k=1}^{NEq} C_{MT(k)} = \sum_{k=1}^{NEq} (1.18 \cdot C_{M(k)}) = 1.18 \cdot \left(\sum_{k=1}^{NEq} C_{M(k)} \right) \right. \quad (6)$$

Se ha encontrado que en proyectos de actualización de plantas existentes, el costo modular total de los equipos nuevos instalados se aproxima bastante al monto de inversión de capital del proyecto.

Costo modular global (C_{MG}): Corresponde al costo modular total corregido para abarcar todos los tipos de costos. Para convertir el costo modular total en el costo modular global basta con añadirle el costo de instalaciones auxiliares, que en forma aproximada equivale al 35% del costo modular de referencia. Este concepto se aplica tanto a un equipo como a un conjunto de estos.

$$\left| \begin{aligned} C_{MG} &= \sum_{k=1}^{NEq} (1.18 \cdot C_{M(k)} + 0.35 \cdot C_{M(k)}^0) = 1.18 \cdot \sum_{k=1}^{NEq} C_{M(k)} + 0.35 \cdot \sum_{k=1}^{NEq} C_{M(k)}^0 \\ C_{MG} &= C_{MT} + 0.35 \cdot \sum_{k=1}^{NEq} C_{M(k)}^0 \end{aligned} \right. \quad (7)$$

Se ha encontrado que en proyectos de construcción de plantas completamente nuevas, el costo modular global de los equipos instalados se aproxima bastante al monto de inversión de capital del proyecto. De esta forma, queda claro que el monto total de inversión de capital de un proyecto, también llamado costo de capital o Inversión de Capital Fijo (ICF), depende de la naturaleza del proyecto:

$$\left| ICF = \begin{cases} C_{MT} & \text{En proyectos de modificación de plantas existentes.} \\ C_{MG} & \text{En proyectos de construcción de plantas nuevas.} \end{cases} \right. \quad (8)$$

3.6. EFECTO DE LA INFLACIÓN

En el método de los costos modulares, el cálculo del costo de capital total de una planta química se fundamenta en el costo de adquisición de los equipos principales de la planta. Adicionalmente, tal cual se mostró arriba, existen correlaciones de datos con las que se puede encontrar el costo de adquisición de los equipos a partir de sus capacidades operativas. Sin

embargo, las constantes de estas correlaciones no se actualizan todos los años, por lo que es necesario recurrir a algún tipo de factor de corrección para tener en cuenta el efecto de la Inflación sobre el costo de los equipos. Estos factores de corrección se construyen a partir de los denominados índices de precios.

Un índice de precios es un valor proporcional al nivel de precios de los artículos de un mercado, y se emplea para caracterizar el cambio de estos precios en el tiempo. Se calcula como una combinación lineal de los precios de un conjunto de artículos característicos de un mercado particular. Es decir, en una economía particular pueden construirse muchos Índices de precios, uno para cada tipo de mercado. Por ejemplo, a partir de un conjunto de artículos (bienes y servicios) que caracterizan el mercado de consumo masivo de un país se puede construir un Índice de Precios del Consumidor (IPC). De la misma forma, a partir de un conjunto de artículos del mercado industrial se puede construir un Índice de Precios del Productor (IPP).

Para el caso de plantas químicas, existen varios índices. Uno de los más populares para EEUU aparece publicado continuamente en la revista Chemical Engineering, y es conocido como CEPCI (Chemical Engineering Plant Cost Index).

El uso de los índices de precios permite corregir por inflación cualquier estimativo del costo de adquisición de un equipo. Si se dispone del Índice de precios para un año anterior al actual ($IP_{(1)}$), el costo de adquisición de un equipo para ese mismo año ($C_{Eq(k)(1)}$), y el índice de precios actual ($IP_{(2)}$), se puede calcular un costo de adquisición actualizado para el mismo equipo ($C_{Eq(k)(2)}$) mediante:

$$C_{Eq(k)(2)}^0 = C_{Eq(k)(1)}^0 \cdot \frac{IP_{(2)}}{IP_{(1)}} \quad (9)$$

3.7. PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DEL COSTO DE CAPITAL DE UNA PLANTA QUÍMICA

A partir de todas las expresiones mostradas puede plantearse el siguiente procedimiento para el cálculo del costo de capital o Inversión de Capital Fija (ICF) de una planta química:

1. Identifique y haga un listado de los equipos principales involucrados en el proyecto
2. Tenga a la mano las tablas con los valores de los parámetros de las ecuaciones necesarias para obtener los F_M , F_P , F_{CM} y C_{Eq}^0 .
3. Identifique el año para el que aplica cada una de las correlaciones de los C_{Eq}^0 y consulte los valores del índice de precios para esos años. Identifique el índice de precios actual.
4. Identifique y registre la capacidad A_k de cada uno de los equipos en la lista, así como su material de construcción y presión operativa.
5. Con los materiales de construcción, encuentre el valor de $F_{M(k)}$ para cada uno de los equipos.
6. Con las presiones operativas y las ecuaciones apropiadas, calcule el $F_{P(k)}$ de cada equipo.
7. Con $F_{M(k)}$, $F_{P(k)}$ y con las ecuaciones apropiadas calcule el $F_{CM(k)}$ de cada equipo.
8. Con A_k y la ecuación apropiada, calcule el $C_{Eq(k)}^0$ de cada uno de los equipos, y corríjalos por inflación teniendo en cuenta los Índices de precios Identificados en 3.
9. Con $F_{CM(k)}$ y $C_{Eq(k)}^0$ encuentre el $C_{M(k)}$ de cada equipo.
10. Con $F_{M(k)}=1$ y $F_{P(k)}=1$ repita 7, 8 y 9 para encontrar el $C_{M(k)}^0$ de cada equipo.
11. Con los $C_{M(k)}$, $C_{M(k)}^0$ de cada equipo, calcule ICF teniendo en cuenta si el proyecto implica la modificación de una planta existente (en cuyo caso $ICF=C_{MT}$), o al el un proyecto implica la construcción de una planta nueva (en cuyo caso $ICF=C_{MG}$)

EJEMPLO 1

Para incrementar la capacidad de producción de óxido de etileno, el departamento de ingeniería de una empresa de producción de sustancias químicas ha determinado la necesidad de instalar una nueva unidad de destilación que opere en paralelo a una de las unidades existentes en la planta.

Los equipos involucrados en este proyecto de ampliación de planta se muestran en la Tabla 2.

	Tipo	Cantidad	Capacidad		Material de construcción	Presión operativa (barg)
			D (m) , L (m)			
T-1001	Torre de platos	1	D (m) , L (m)	1.5 15	S.S.	2
Platos de la T-1001	Perforados	22	D (m)	1.5	S.S.	2
Condensador E-1001	Cabeza flotante	1	A (m ²)	200.0	S.S.	2
Rehervidor E-1002	Kettle	1	A (m ²)	90.0	S.S.	2

Tabla 2: Equipos involucrados en un proyecto de ampliación.

Teniendo en cuenta que la modificación se realizará para una planta en EEUU, calcule el costo modular total (C_{MT}) y el costo modular global (C_{MG}). ¿Cuál de estos dos representa el monto de inversión en el proyecto?

Emplee correlaciones para EEUU y suponga un CEPCI actual de 400.

Solución:

Torre T-1001

Considerando el cuerpo de la torre como un recipiente vertical de 15 m de largo y 1.5 m de diámetro, construido en acero inoxidable (SS) para una presión operativa de 2 barg:

$$\begin{aligned} F_M &= 4 & , & & K_1 &= 3.7559 \\ F_P &= 1 & , & & K_2 &= 0.6361 \\ B_1 &= 2.5 & , & & K_3 &= 0.1069 \\ B_2 &= 1.72 & , & & CEPCI(1996) &= 382 \end{aligned}$$

En este caso, la longitud caracteriza la capacidad del recipiente,

Dado que las correlaciones fueron construidas para 1996, se debe emplear el CEPCI de ese año en la corrección por inflación. Tanto la longitud como la presión operativa se mantienen en el rango de aplicabilidad de las constantes seleccionadas.

$$\begin{aligned} C_{Eq(T-1001)}^0 &= \left(\frac{400}{382} \right) \cdot 10^{(3.7559 + 0.6361 \cdot \text{Log}_{10}(15) + 0.1069 \cdot (\text{Log}_{10}(15))^2)} = 46,975.49 \text{ USD} \\ F_{CM(T-1001)} &= 2.5 + 1.72 \cdot 4 \cdot 1 = 9.38 \\ F_{CM(T-1001)}^0 &= 2.5 + 1.72 \cdot 1 \cdot 1 = 4.22 \\ C_{M(T-1001)} &= 440,630.14 \text{ USD} \\ C_{M(T-1001)}^0 &= 198,236.59 \text{ USD} \end{aligned}$$

Platos de la T-1001

El cálculo del costo de los platos tiene varias particularidades:

- El factor de costo modular es Independiente de la presión operativa y por tanto tiene un único valor para cada material de construcción y cada tipo de plato.
- El costo de cada plato se calcula por medio de una expresión del tipo:

$$C_{Plato}^0 = Fq \cdot (K_1 + K_2 \cdot A_{Plato} + K_3 \cdot (A_{Plato})^2)$$

Donde:

- $K_{1,2,3}$ = (Constantes que dependen del tipo de plato.)
- $A_{Plato} [m]$ = (Capacidad del plato \equiv Diámetro del plato.)
- Fq = (Factor de corrección del precio por plato. Depende del número de platos.)

Considerando que se trata de 22 platos de 1.5 m de diámetro, construidos en acero inoxidable (SS):

$$\begin{aligned} F_{CM} &= 2 & , & & K_2 &= 19.80 \\ F_{CM}^0 &= 1.2 & , & & K_3 &= 75.07 \\ Fq &= 1 & , & & CEPCI(1996) &= 382 \\ K_1 &= 235 \end{aligned}$$

En este caso, el diámetro caracteriza la capacidad de los platos.

$$\begin{aligned} C_{Eq(PlatosT-1001)}^0 &= 22 \cdot \left(\frac{400}{382}\right) \cdot 1 \cdot (235 + 19.80 \cdot (1.5) + 75.07 \cdot (1.5)^2) = 9,988.86 \text{ USD} \\ F_{CM(PlatosT-1001)} &= 2 \\ F_{CM(PlatosT-1001)}^0 &= 1.2 \\ C_{M(PlatosT-1001)} &= 19,977.73 \text{ USD} \\ C_{M(PlatosT-1001)}^0 &= 11,986.64 \text{ USD} \end{aligned}$$

Condensador E-1001

Para un intercambiador de cabeza flotante de 200 m², construido en acero inoxidable (SS) para una presión operativa de 2 barg:

$$\begin{aligned} F_M &= 3 & , & & K_1 &= 3.4338 \\ F_P &= 1 & , & & K_2 &= 0.1445 \\ B_1 &= 1.8 & , & & K_3 &= 0.10790 \\ B_2 &= 1.5 & , & & CEPCI(1996) &= 382 \end{aligned}$$

En este caso, el área de transferencia caracteriza la capacidad del intercambiador.

Dado que la presión operativa es inferior al límite mínimo de aplicabilidad para la correlación del factor de presión ($P=10$ barg, valor para el cual $F_p=1$), se supone que no es necesario corregir por presión, y por tanto se toma $F_p=1$

Tanto el área de intercambio como la presión operativa del equipo se mantienen dentro de los rangos de aplicabilidad de las constantes seleccionadas para las correlaciones de F_{CM} y C_{Eq}

$$C_{Eq(E-1001)}^0 = \left(\frac{400}{382} \right) \cdot 10^{(3.4338 + 0.1445 \cdot \text{Log}_{10}(200) + 0.10790 \cdot (\text{Log}_{10}(200))^2)} = 22,782.31 \text{ USD}$$

$$\begin{cases} F_{CM(E-1001)} = 1.8 + 1.5 \cdot 3 \cdot 1 = 6.3 \\ F_{CM(E-1001)}^0 = 1.8 + 1.5 \cdot 1 \cdot 1 = 3.3 \\ C_{M(E-1001)} = 143,528.57 \text{ USD} \\ C_{M(E-1001)}^0 = 75,181.62 \text{ USD} \end{cases}$$

Rehervidor E-1002

Para un intercambiador tipo Kettle de 90 m^2 , construido en acero inoxidable (SS) para una presión de 2 barg.

$$\begin{cases} F_M = 3 & , & K_1 = 3.5638 \\ F_p = 1 & , & K_2 = 0.1906 \\ B_1 = 1.8 & , & K_3 = 0.11070 \\ B_2 = 1.5 & , & CEPCI(1996) = 382 \end{cases}$$

En este caso, el área de transferencia caracteriza la capacidad del intercambiador. En forma análoga al equipo anterior.

$$\begin{cases} C_{Eq(E-1002)}^0 = \left(\frac{400}{382} \right) \cdot 10^{(3.5638 + 0.1906 \cdot \text{Log}_{10}(90) + 0.11070 \cdot (\text{Log}_{10}(90))^2)} = 23,935.67 \text{ USD} \\ F_{CM(E-1002)}^0 = 1.8 + 1.5 \cdot 1 \cdot 1 = 3.3 \\ C_{M(E-1002)} = 150,794.73 \text{ USD} \\ C_{M(E-1002)}^0 = 78,987.71 \text{ USD} \\ F_{CM(E-1002)} = 1.8 + 1.5 \cdot 3 \cdot 1 = 6.3 \end{cases}$$

Reuniendo los valores de todos los elementos:

$$\begin{cases} C_{MT} = 1.18 \cdot \left(\sum_{k=1}^{NEq} C_{M(k)} \right) = 1.18 \cdot (440,630.14 + 19,977.73 + 143,528.57 + 150,794.73) \\ \quad \quad \quad = 890,818.78 \text{ USD} \\ C_{MG} = C_{MT} + 0.35 \cdot \sum_{k=1}^{NEq} C_{M(k)}^0 = 890,818.78 \\ \quad \quad \quad + 0.35 \cdot (198,236.59 + 11,986.64 + 75,181.62 + 78,987.71) \\ \quad \quad \quad = 1,018,356.19 \text{ USD} \end{cases}$$

Como se trata de un proyecto de modificación de una planta química, la inversión en capital fijo (ICF) está dada por el costo modular total (C_{MT}), es decir:

$$|ICF = 890,818.78 \text{ USD}$$

4. COSTOS OPERATIVOS DE UNA PLANTA QUÍMICA

En el ámbito de los proyectos, los costos operativos son aquellos en los que se incurre para mantener la operación de un sistema. Para el caso de una planta química se relacionan con el ritmo de producción, e incluyen el valor de la materia prima y los servicios industriales que se consumen, la mano de obra operativa empleada, el costo de tratamiento de residuos, etc. Es decir, todos los costos que implica mantener la planta en operación.

Antes de presentar los algoritmos para calcular estos costos, es bastante útil establecer una clasificación.

4.1. CLASIFICACIÓN DE LOS COSTOS OPERATIVOS

Al igual que en el caso de los costos de capital, no es necesario elaborar un listado detallado de los costos operativos de una planta. Basta con establecer una clasificación general. La Tabla 3 muestra una clasificación bastante útil para los costos operativos.

Costos variables

Dentro de todos los costos, los variables (también llamados directos en algunos casos) son aquellos directamente proporcionales al ritmo de producción de la planta. Es decir, si debido a la fluctuación en los niveles de demanda es necesario incrementar o disminuir el ritmo de producción (siempre dentro de los límites de capacidad de la planta), los costos variables aumentan o disminuyen en la misma proporción.

Costos fijos

Estos costos son completamente independientes del ritmo de producción, y de hecho, mantienen sus valores aún si se detiene la producción en la planta. Por ejemplo, independientemente del ritmo de producción es necesario pagar los seguros y los impuestos de propiedad.

COSTOS VARIABLES		
Materias primas	C_{MP}	Corresponde al costo de las sustancias químicas empleadas para alimentar la planta. (*)
Tratamiento de residuos	C_{TR}	Corresponde al costo de tratamiento de los desechos generados por la planta durante su operación. (*)
Servicios industriales	C_{SI}	Corresponde al costo de los servicios industriales (combustible, vapor, refrigerantes, agua de enfriamiento, agua de proceso, agua de caldera, electricidad, aire para instrumentos, etc.) consumidos durante la operación de la planta. (*)
Mano de obra operativa	C_{MOO}	Corresponde a los salarios de todo el personal necesario para operar la planta.
Mano de obra de supervisión y soporte	C_{MOS}	Incluye los salarios de todo el personal administrativo, de ingeniería y de soporte de la planta.
Mantenimiento y reparación	C_{Mant}	Incluye el costo de la mano de obra y los materiales necesarios para el desarrollo del mantenimiento de los equipos de la planta.
Suministros de operación	C_{SO}	Corresponde al costo de los suministros necesarios para la operación de la planta, pero que no constituyen materias primas, es decir: Lubricantes, filtros, sustancias químicas varias, elementos de protección de los operarios, etc.
Pruebas de laboratorio	C_{Lab}	Corresponde al costo de las pruebas de laboratorio para el control de la calidad y la solución de problemas de producción.
Patentes y derechos de autor	C_{Pat}	Incluye el costo de adquisición de patentes y el pago de regalías por el uso de ciertos tipos de tecnología.
(*) Las cantidades involucradas se obtienen de los balances de materia y energía.		

Tabla 3: Clasificación de los costos operativos de una planta química.

Estos costos son generalmente Independientes del ritmo de producción aunque, en algunos casos, algunos de ellos pueden cambiar cuando se mantienen niveles anormales de producción durante periodos prolongados de tiempo.

4.2. MÉTODO PARA EL CÁLCULO DE COSTOS OPERATIVOS

Al igual que en el caso de los costos de capital, los costos operativos de una planta pueden determinarse mediante la evaluación detallada de cada uno. Sin embargo, existe un conjunto de relaciones entre los costos que simplifican los cálculos. En principio, cada uno de los costos es directamente proporcional a uno o a la suma de algunos de los siguientes costos.

- Inversión de capital fijo (ICF).
- Costos de materia prima (C_{MP}).
- Costos de tratamiento de residuos (C_{TR}).
- Costos de servicios industriales (C_{SI}).
- Costos de mano de obra operativa (C_{MOO}).

COSTOS FIJOS		
Depreciación	C_{Dep}	Corresponde al costo debido al desgaste de los equipos de la planta. El registro de este costo permite el reemplazo de los equipos una vez se agota su tiempo de vida.
Impuestos de propiedad y seguros	C_{IS}	Corresponde al pago de los impuestos de propiedad y los seguros de operación.
Gastos generales de la planta	C_{GP}	Reúne todos los costos asociados con la operación de las instalaciones auxiliares que soportan el proceso. Incluye los servicios de nómina y contabilidad, servicios de seguridad y protección contra el fuego, servicios médicos, cafetería e instalaciones de recreación, servicios de ingeniería, las prestaciones y beneficios de todos los empleados, etc..
GASTOS GENERALES		
Administración	C_{Admon}	Incluye los salarios del personal administrativo.
Distribución y ventas	C_{Dist}	Corresponde a los costos de distribución y mercadeo necesarios para vender los productos, así como los salarios del personal que desarrolla estas actividades.
Investigación y desarrollo	$C_{I\&D}$	Corresponde al costo de las investigaciones encaminadas al mejoramiento ó al diseño de nuevos procesos y productos. Incluye el costo del personal de investigación, equipos, materiales, etc..

Tabla 3 (Cont.): Clasificación de los costos operativos de una planta química

Una vez se han calculado estos cinco costos básicos, es posible calcular los costos (empleando las relaciones mencionadas) y el Costo Operativo Total (COT, equivalente a la suma de todos los costos operativos).

Las relaciones entre los costos se muestran en la Tabla 4.

Costos Anuales		Relación	Constante K	Valor de K
COSTOS VARIABLES				
Materias primas	C_{MP}	---	---	---
Tratamiento de residuos	C_{TR}	---	---	---
Servicios industriales	C_{SI}	---	---	---
Mano de obra operativa	C_{MOO}	---	---	---
Mano de obra de supervisión	C_{MOS}	$= K_{MOS} \cdot C_{MOO}$	K_{MOS}	Entre 0.10 y 0.25
Mantenimiento y reparación	C_{Mant}	$= K_{Mant} \cdot ICF$	K_{Mant}	Entre 0.02 y 0.10
Suministros de operación	C_{SO}	$= K_{SO} \cdot C_{Mant}$	K_{SO}	Entre 0.10 y 0.20
Pruebas de laboratorio	C_{Lab}	$= K_{Lab} \cdot C_{MOO}$	K_{Lab}	Entre 0.10 y 0.20
Patentes y licencias	C_{Pat}	$= K_{Pat} \cdot COT$	K_{Pat}	Entre 0.00 y 0.06
COSTOS FIJOS				
Depreciación	C_{Dep}	$= K_{Dep} \cdot ICF$ (*)	K_{Dep}	0.1
Impuestos locales y seguros	C_{IS}	$= K_{IS} \cdot ICF$	K_{IS}	Entre 0.014 y 0.05
Gastos generales de la planta	C_{GP}	$= K_{GP} \cdot (C_{MOO} + C_{MOS} + C_{Mant})$	K_{GP}	Entre 0.50 y 0.7
GASTOS GENERALES				
Administración	C_{Admon}	$= K_{Admon} \cdot (C_{MOO} + C_{MOS} + C_{Mant})$	K_{Admon}	0.15
Distribución y ventas	C_{Dist}	$= K_{Dist} \cdot COT$	K_{Dist}	Entre 0.02 y 0.20
Investigación y desarrollo	$C_{I\&D}$	$= K_{I\&D} \cdot COT$	$K_{I\&D}$	0.05
(*) Esta expresión equivale al método de la línea recta a 10 años para el cálculo de la depreciación. Existen otros métodos alternativos más realistas para efectuar el cálculo de la depreciación.				

Tabla 4: Relaciones entre los operativos anuales de una planta química

Con estas relaciones y empleando el valor medio del intervalo en el que se encuentra cada una de las constantes es posible llegar a lo siguiente:

$$\begin{aligned}
 \left(\begin{array}{l} \text{Costos} \\ \text{variables} \end{array} \right) &= \left(\begin{array}{l} C_{MP} + C_{TR} + C_{SI} + 1.33 \cdot (C_{MOO}) \\ + 0.069 \cdot (ICF) + 0.03 \cdot (COT) \end{array} \right) \\
 \left(\begin{array}{l} \text{Costos} \\ \text{fijos} \end{array} \right) &= 0.708 \cdot (C_{MOO}) + 0.168 \cdot (ICF) \\
 \left(\begin{array}{l} \text{Gastos} \\ \text{generales} \end{array} \right) &= \left(\begin{array}{l} 0.177 \cdot (C_{MOO}) + 0.009 \cdot (ICF) \\ + 0.16 \cdot (COT) \end{array} \right)
 \end{aligned}$$

(10,11,12)

Si se suman todos los costos y se resuelve para el costo operativo total (COT):

$$\boxed{COT = 2.73 \cdot (C_{MOO}) + 0.304 \cdot (ICF) + 1.23 \cdot (C_{MP} + C_{TR} + C_{SI})}$$

(13)

4.3. CÁLCULO DEL COSTO DE MATERIAS PRIMAS

Teniendo en cuenta los flujos anuales de cada materia prima que es necesario alimentar a la planta ($F_{MP(k)}$) y los precios por unidad de cada una de las materias primas (Pune), es posible encontrar el costo total de materias primas:

$$C_{MP} = \sum_k F_{MP(k)} \cdot P_{MP(k)} \quad (15)$$

Existen muchas fuentes de precios actualizados para diferentes sustancias químicas.

4.4. CÁLCULO DEL COSTO DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS

Teniendo en cuenta los flujos anuales de cada uno de los residuos que se generan en la planta ($F_{R(k)}$) y los precios del tratamiento por unidad de cada uno de los residuos ($P_{R(k)}$), es posible encontrar el costo total de tratamiento mediante:

$$C_{TR} = \sum_k F_{R(k)} \cdot P_{R(k)} \quad (16)$$

En la literatura se reportan los costos para el tratamiento de diferentes tipos de residuos industriales. Algunos valores típicos se presentan en la tabla 5.

4.5. CÁLCULO DEL COSTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES

Con las cantidades anuales de cada servicio industrial que es necesario alimentar a la planta ($Q_{SI(k)}$) y los precios por unidad de cada uno ($P_{SI(k)}$), es posible encontrar el costo total debido al consumo de servicios industriales mediante:

$$C_{SI} = \sum_k Q_{SI(k)} \cdot P_{SI(k)} \quad (17)$$

Tipo de residuo y tratamiento		Precio unitario	
		Valor	Unidades
Residuos sólidos y líquidos generales	No peligrosos	36	USD/ton
	Peligrosos	145	USD/ton
Tratamiento de aguas residuales	Primario (filtración)	0.039	USD/ton
	Secundario (filtración + lodos activados)	0.041	USD/ton
	Terciario (filtración + lodos activados+ tratamiento químico)	0.053	USD/ton

Tabla 5: Costos unitarios aproximados para el tratamiento de residuos industriales

Servicio Industrial		Precio unitario			
		Valor	Unidades	Valor	Unidades
Aire seco y presurizado	De proceso	0.023	USD/m ³	---	---
	Para instrumentos	0.047	USD/m ³	---	---
Vapor de caldera	De baja presión (5 barg, 160°C)	6.62	USD/ton	3.17	USD/GJ
	De media presión (10 barg, 185°C)	7.31	USD/ton	3.66	USD/GJ
	De alta presión (40 barg, 250°C)	8.65	USD/ton	5.09	USD/GJ
Agua de enfriamiento (T _{Suministro} = 30°C, T _{Retorno} = 40°C ó ΔT=10° y T _{Retorno} <45°C)		0.0067	USD/ton	0.16	USD/GJ
Agua purificada	De proceso	0.04	USD/ton	---	---
	De calderas	2.54	USD/ton	---	---
	Potable	0.26	USD/ton	---	---
	Deionizada	1.00	USD/ton	---	---
Energía eléctrica (110V, 220V, 440V)		0.06	USD/kWh	16.8	USD/GJ
Combustible	Aceite combustible	170.0	USD/m ³	4.0	USD/GJ
	Gas natural (Teniendo en cuenta el poder calorífico inferior)	0.085	USD/Std.m ³	2.5	USD/GJ
	Carbón (Puesto en boca de mina. Sin incluir costos de transporte etc.)	31.0	USD/ton	1.2	USD/GJ
Refrigeración	De temperatura moderadamente baja (T= 5°C)	---	---	20	USD/GJ
	De temperatura baja (T= -20°C)	---	---	32	USD/GJ
	De temperatura muy baja (T= -50°C)	---	---	60	USD/GJ
Calentamiento térmico	De temperatura moderadamente alta (T= 330°C)	---	---	4.9	USD/GJ
	De temperatura alta (T= 400°C)	---	---	5.2	USD/GJ
	De temperatura muy alta (T= 600°C)	---	---	5.9	USD/GJ

Tabla 6: Costos unitarios aproximados para diferentes servicios industriales

En la literatura se reportan los costos para el tratamiento de diferentes servicios industriales. Algunos valores típicos se presentan en la tabla 6.

4.6. CÁLCULO DEL COSTO DE MANO DE OBRA OPERATIVA

Este costo, compuesto por la nómina anual del personal operativo de la planta, puede calcularse a partir del número de operadores que trabajan tiempo completo para mantener la planta operando (N_{Op}) y el salario anual promedio por operador (S_{Op}):

$$C_{MOO} = N_{Op} \cdot S_{Op} \quad (18)$$

Para determinar el número necesario de operarios que garantiza la operación de la planta, se debe cuantificar la cantidad total de trabajo necesario para operar la planta.

$$L_S = \sum_k L_{S(k)} \cdot N_k$$

Donde :

$$L_S \left[\frac{\text{turnos-operador}}{\text{turno}} \right] = \left(\begin{array}{l} \text{Cantidad de trabajo operativo para} \\ \text{mantener en funcionamiento la planta} \\ \text{completa durante un turno.} \end{array} \right)$$

$$L_{S(k)} \left[\frac{\text{turnos-operador}}{\text{turno, equipo "k"}} \right] = \left(\begin{array}{l} \text{Cantidad de trabajo operativo para} \\ \text{mantener en funcionamiento un equipo} \\ \text{del tipo "k" durante un turno.} \end{array} \right)$$

$$N_k [\text{equipo "k"}] = \left(\begin{array}{l} \text{Número de equipos del tipo "k"} \\ \text{que existen en la planta.} \end{array} \right)$$
(19)

Teniendo en cuenta la cantidad de trabajo operativo necesaria en un turno, puede calcularse la cantidad de trabajo operativo necesaria en un año.

$$L_Y = \tau_Y \cdot L_S$$

Donde :

$$L_Y \left[\frac{\text{turnos-operador}}{\text{año}} \right] = \left(\begin{array}{l} \text{Cantidad de trabajo operativo para} \\ \text{mantener en funcionamiento la planta} \\ \text{completa durante un año.} \end{array} \right)$$

$$\tau_Y \left[\frac{\text{turnos}}{\text{año}} \right] = \left(\begin{array}{l} \text{Número de turnos de operación de la planta durante un año.} \end{array} \right)$$
(20)

Teniendo en cuenta la cantidad de trabajo operativo necesaria para mantener la planta en funcionamiento durante un año, y la cantidad de trabajo de operación número total de operarios que se requieren en la operación de la planta.

$$N_{Op} = \frac{L_Y}{L_{Y(Op)}}$$

Donde :

$$L_{Y(Op)} \left[\frac{\text{turnos-operador}}{\text{operador.año}} \right] = \left(\begin{array}{l} \text{Cantidad de trabajo operativo que} \\ \text{un operador realiza durante un año.} \end{array} \right)$$
(21)

Combinando las expresiones resulta:

$$C_{MOO} = \frac{\tau_Y \cdot \sum_k L_{S(k)} \cdot N_k}{L_{Y(Op)}} \cdot S_{Op}$$
(22)

Instalaciones auxiliares		Equipos de proceso	
Planta de aire	1.00	Evaporadores	0.30
Calderas	1.00	Vaporizadores	0.05
Chimeneas	0.00	Hornos	0.50
Torres de enfriamiento	1.00	Ventiladores	0.05
Desmineralizadores de agua	0.50	Sopladores y compresores	0.15
Plantas de generación eléctrica	0.50	Intercambiadores de calor	0.10
Plantas portátiles de generación	3.00	Torres separadoras	0.35
Subestaciones eléctricas	0.00	Recipientes	0.00
Incineradores	2.00	Bombas	0.00
Unidades mecánicas de refrigeración	0.50	Reactores	0.50
Plantas de tratamiento de aguas	2.00		
Planta de tratamiento de residuos	2.00		

Tabla 7: Requerimientos de mano de obra operativa para diferentes equipos de proceso $L_{S(k)}$

La información necesaria para emplear esta expresión puede encontrarse así:

$L_{S(k)}$: Depende del tipo de equipo. En la literatura pueden encontrarse tablas con valores de este parámetro para diferentes equipos. Algunos valores típicos se muestran en la Tabla 7

N_k : Información que se extrae del PFD.

τ_y : La mayoría de las instalaciones trabajan en forma continua, es decir 365 días al año 3, turnos por día, lo cual implica 1095 (turnos/año).

$L_{Y(OP)}$: En forma general, un operador trabaja 49 semanas al año y desempeña 5 turnos por semana, lo cual equivale a 245 (turnos operador/año).

4.7. PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DEL COSTO OPERATIVO DE UNA PLANTA QUÍMICA

A partir de todas las expresiones mostradas puede plantearse el siguiente procedimiento para el cálculo del costo operativo de una planta química:

1. A partir del PFD elabore una tabla y registre los tipos de equipos que componen la planta y el número de equipos de cada tipo presentes en la planta (N_k)
2. Haga un listado de las materias primas consumidas, servicios industriales utilizados y residuos producidos en la planta.
3. Construya una tabla en la que se indique el consumo de servicios industriales de cada uno de los equipos y calcule el consumo total de cada tipo de servicio industrial ($Q_{SI(k)}$). De igual forma registre el consumo total de cada una de las materias primas ($F_{MP(k)}$) y la producción total de cada uno de los tipos de residuos ($F_{R(k)}$).
4. Busque en la literatura las tablas con los precios de las materias primas ($P_{MP(k)}$), servicios industriales ($P_{SI(k)}$) y tratamiento de residuos ($P_{R(k)}$); así como las cantidades de trabajo operativo que requiere cada uno de los tipos de equipos en la planta ($L_{S(k)}$).
5. Con los $F_{MP(k)}$ y los $P_{MP(k)}$ encuentre el costo operativo por consumo de materia prima (C_{MP}).
6. Con los $F_{R(k)}$ y los $P_{TR(k)}$ encuentre el costo operativo por tratamiento de residuos (C_{TR}).

7. Con los $Q_{SI(k)}$ y los $P_{SI(k)}$ encuentre el costo operativo por consumo de servicios industriales (C_{SI}).
8. Con las N_k las $L_{S(k)}$ y un estimativo medio del S_{OP} encuentre el costo total de mano de obra operativa (C_{MOO}).
9. Con C_{MP} , C_{TR} , C_{SI} , C_{MOO} y el ICF encuentre el costo operativo total (COT) o el costo operativo sin depreciación (COT_d) empleando (13) o (14).

EJEMPLO 2

Una empresa que se dedica a la recuperación de sustancias químicas recibe sin costo alguno un residuo acuoso proveniente de otra empresa vecina y lo envía a una de sus plantas, en donde, por medio de evaporación y destilación, se recupera una serie de sustancias valiosas y se generan 3650 ton/año de un residuo acuoso no peligroso. Durante la operación, la planta consume 94600 ton/año de vapor de alta presión, 31536 ton/año de agua de enfriamiento y 175200 kWh/año de energía eléctrica.

El listado de quipos de la planta se incluye a continuación:

- 2 Evaporadores.
- 2 Torres.
- 6 Bombas.
- 3 Recipientes separadores.

Determine el costo operativo total de la planta.

Suponga que la planta opera en continuo, 365 días al año, y que los operadores trabajan 49 semanas al año. Suponga que el salario medio de un operario es de 17.000 USD/año, y un ICF de 5.000.000,00

Solución:

Costo por consumo de materias primas

En este caso la materia prima es el efluente del que se recuperan sustancias valiosas. El enunciado indica que esta materia prima se adquiere sin ningún costo, por tanto $C_{MP}=0$.

Costo de tratamiento de residuos:

Según el enunciado, el único residuo producido es de tipo acuoso no peligroso con $F_R=3650$ ton/año. Según la literatura este tipo de residuo se trata por P_{TR} 36 USD/Ton.

De esta forma:

$$C_{TR} = 3,650 \cdot (36) = 131,400.00 \left[\frac{USD}{año} \right]$$

Costo por consumo de servicios industriales:

Los precios del vapor de alta presión, agua de enfriamiento y energía eléctrica están dados por $P_{SI(HPS)}$ 8,65 USD/Ton, $P_{SI(CW)}$ 6,7E-3 USD/Ton, $P_{SI(EP)}$ 0,06 USD/kWh.

De esta forma:

$$C_{SI} = 8.65 \cdot (94,600) + 6.7E - 3 \cdot (31,536) + 0.06 \cdot (175,200) = 1'040,093.20 \left[\frac{USD}{año} \right]$$

Costo de mano de obra operativa:

Para evaporadores, torres, bombas y recipientes las cantidades de trabajo de supervisión están dadas por $L_{S(1)} = 0,3$, $L_{S(2)} = 0,35$, $L_{S(3)} = 0,0$, $L_{S(4)} = 0,0$ respectivamente. Adicionalmente, $\tau_r = 1095$ (turnos/año), $L_{Y(OP)} = 245$ (turnos- operador/operador.año).

De esta forma:

$$N_{Op} = \frac{\tau_Y \cdot \sum_k (L_{S(k)} \cdot N_k)}{L_{Y(Op)}} = \frac{1,095 \cdot (0.3 \cdot (2) + 0.35 \cdot (2) + 0.0 \cdot (6) + 0.0 \cdot (3))}{245} = 5.81$$

Lo anterior significa que se pueden tener 5 operarios de tiempo completo y uno con un poco menos de tiempo completo. Ahora, con el número de operarios y el salario medio:

$$C_{MOO} = 5.81 \cdot (17,000) = 98,773.47 \left[\frac{USD}{año} \right]$$

Finalmente:

$$\begin{aligned} COT &= 2.73 \cdot (C_{MOO}) + 0.304 \cdot (ICF) + 1.23 \cdot (C_{MP} + C_{TR} + C_{SI}) \\ &= 2.73 \cdot (98,773.47) + 0.304 \cdot (5,000,000.00) + 1.23 \cdot (0 + 131,400.00 + 1,040,093.20) \\ &= 3,230,588.21 \left[\frac{USD}{año} \right] \end{aligned}$$

Si se desea encontrar el costo operativo teniendo en cuenta un método de depreciación diferente al lineal, se deben calcular en forma independiente el COT_d y el C_{dep} .

5. EVALUACIÓN FINANCIERA: CALCULO DE LA RENTABILIDAD DE UNA PLANTA QUÍMICA

Una vez se han calculado los costos de capital y los costos operativos del proyecto, es posible iniciar la construcción de un modelo de flujo de caja, base del análisis financiero.

En su forma más simple, el modelo de flujo de caja de un proyecto es un registro de los flujos de fondos (entradas y salidas) a lo largo del tiempo de vida del proyecto. Dos son los aspectos que definen un flujo de caja:

- La magnitud de los flujos de fondos.
- El instante de tiempo en el que ocurre cada uno de los flujos.

Tanto la magnitud como el instante en el que ocurren los flujos son importantes, ya que en el análisis financiero se debe tener en cuenta el valor del dinero en el tiempo debido a las tasas de interés.

Estrictamente hablando, un análisis financiero detallado debe basarse en la identificación completa de los flujos de fondos y los instantes precisos en los que ocurre cada uno de esos flujos. Sin embargo, este grado de precisión no es necesario en muchas aplicaciones incluyendo la evaluación financiera durante el diseño conceptual de plantas químicas. Por lo anterior, la construcción del modelo de flujo de fondos puede basarse en una discretización del horizonte de vida del proyecto, dividiéndolo en periodos de 1 año. De esta forma, los flujos de fondos del mismo tipo causados durante un periodo en particular pueden totalizarse y ubicarse como un flujo único al final del periodo en cuestión.

A continuación se identificarán los elementos que componen el flujo de caja para proyectos de producción de sustancias mediante plantas químicas.

5.1. ELEMENTOS EN UN MODELO DE FLUJO DE CAJA

En general, para cualquier periodo "n" (año "n"), el flujo de caja ($F_{C(n)}$) se relaciona con los ingresos por ventas ($V(n)$), el costo operativo total sin depreciación ($COT_{d(n)}$), el pago de impuestos a la renta ($C_{imp(n)}$), la inversión de capital fijo (ICF), los ingresos debidos a la venta de activos fijos por

el valor de salvamento ($S_{(n)}$), los ingresos por la venta del terreno de la planta ($L_{(n)}$), el capital de trabajo requerido ($WC_{Req(n)}$) y el capital de trabajo recuperado ($WC_{Rec(n)}$). Esta relación está dada

$$FC_{(n)} = \left(\begin{array}{l} V_{(n)} - COT_{d(n)} - C_{Imp(n)} - ICF_{(n)} + S_{(n)} \\ + L_{(n)} - WC_{Req(n)} + WC_{Rec(n)} \end{array} \right) \quad (23)$$

Cada uno de los elementos que compone el flujo de caja se ubica en periodos particulares dentro del horizonte de vida del proyecto. Es raro tener un periodo en el que se presenten todos estos elementos, pero la expresión mostrada arriba es útil por su generalidad, ya que es válida para todo el horizonte de vida del proyecto.

5.1.1. HORIZONTE DE VIDA EN LA EVALUACIÓN DE UNA PLANTA QUÍMICA

Con el fin de establecer los instantes de tiempo en los que ocurren cada uno de los flujos es necesario definir primero cual es el horizonte de vida en proyectos de producción. Tradicionalmente, una planta química es una instalación de producción que requiere una gran cantidad de capital de inversión y que genera productos con valor unitario relativamente bajo. Por esto, las plantas químicas deben operar durante periodos de tiempo relativamente largos 10, 15, 20 años, para permitir una recuperación de la inversión y ser rentables.

Es necesario resaltar que en la actualidad, además de las plantas químicas tradicionales dedicadas a la producción de grandes cantidades de sustancias básicas de bajo valor unitario, se encuentran plantas de baja capacidad dedicadas a la producción de sustancias de altísimo valor agregado. En estos casos, la estimación de los horizontes de vida es algo más complicada. De todas formas, tanto en la producción de sustancias básicas como en la producción de sustancias especializadas, el horizonte de vida preciso de una planta depende de factores como el tipo de planta, velocidad del desarrollo de tecnologías sustitutas en la generación de los mismos productos, velocidad de desarrollo de productos sustitutos, tendencias generales del mercado de los productos químicos, etc.

Para efectos de evaluación y cálculo de la rentabilidad de una planta química se acostumbra emplear un horizonte de tiempo cercano a 10 años de operación ($N_{Op} = 10$). En cuanto al período pre-operativo, es común suponer que comprende de tiempo de 2 años ($N_{Pre} = 2$) que va desde el momento en que se compra el terreno de la planta hasta momento en el que se inicia la operación.

5.1.2. INVERSIÓN DE CAPITAL FIJO (ICF)

Como es de esperarse, la inversión en capital fijo se realiza durante el período pre-operativo (de construcción) de la planta.

Para un proyecto en el que se involucra una planta nueva:

Si se supone que el costo del terreno equivale al 10% del costo modular de referencia de la planta y que $N_{Pre} = 2$

$$\left| \begin{array}{l} ICF = C_{MG} = ICF_{(0)} + ICF_{(1)} + ICF_{(2)} \\ \\ \\ \text{Además :} \end{array} \right. \begin{array}{l} ICF_{(0)} = L \\ ICF_{(1)} = 0.6 \cdot ICF_L \\ ICF_{(2)} = 0.4 \cdot ICF_L \\ \\ L = 0.1 \cdot \sum_k C_{M(k)}^0 \\ \\ ICF_L = C_{MT} + 0.25 \cdot \sum_k C_{M(k)}^0 \end{array}$$

(24)

En este caso, el primer monto de inversión equivale al costo de adquisición del terreno (sin el que no es posible Iniciar las labores de desarrollo del sitio y compra de equipos). Luego de comprar el terreno en $t=0$, se pueden iniciar las labores de construcción de la planta. En el primer periodo de construcción se supone un consumo del 60% de la ICF, y en el segundo periodo de construcción se supone un consumo equivalente a lo que resta del ICFL. Estos flujos se representan gráficamente en la Figura 1.

Para un proyecto en el que se involucra la modificación de una planta existente:

Si se supone que no es necesario comprar terreno adicional ni construir más instalaciones auxiliares y que $N_{pre} = 2$:

$$\left| \begin{array}{l} ICF = C_{MT} = ICF_{(0)} + ICF_{(1)} + ICF_{(2)} \\ \\ \\ \text{Además :} \end{array} \right. \begin{array}{l} ICF_{(0)} = 0 \\ ICF_{(1)} = 0.6 \cdot C_{MT} \\ ICF_{(2)} = 0.4 \cdot C_{MT} \end{array}$$

(25)

En cualquiera de los dos casos, si no hay inversión durante la operación (caso estándar) no existen más flujos por inversión en capital fijo. Esto se muestra en la Figura 1.

Es importante resaltar que este modelo para el cálculo de los montos de inversión en cada año es un caso particular más o menos común, que puede reconstruirse a partir de suposiciones diferentes. De hecho, tanto el número de años del periodo pre-operativo como los porcentajes de inversión asociados a cada año provienen de la planeación del proyecto. Incluso, algunos proyectos pueden implicar montos de inversión realizados luego de terminado el período pre-operativo.

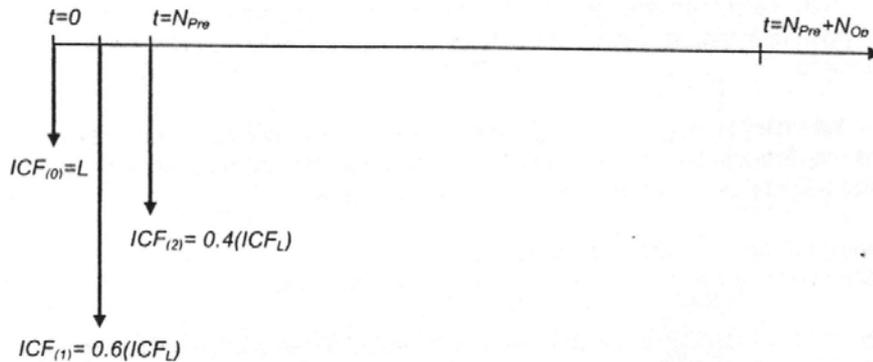


Figura 1: Posición de los flujos relacionados con la ICF

5.1.3. CAPITAL DE TRABAJO REQUERIDO (WC_{Req}) Y RECUPERADO (WC_{Rec})

El capital de trabajo constituye una suma de dinero que es necesario tener a disposición para iniciar la operación de la planta. En realidad se constituye como un fondo al inicio del primer periodo de producción, y se emplea para la adquisición de materias primas y todo lo necesario para iniciar la producción.

Durante el resto de la fase operativa de la planta, parte de los ingresos obtenidos al final de un periodo se emplean para reconstituir este fondo, y así, permitir la adquisición de todo lo necesario para continuar la operación de la planta durante el periodo siguiente.

Al final del último periodo de operación de la planta se tiene un fondo reconstituido que en lugar de emplearse para soportar la operación del periodo siguiente (el cual no existe) se emplea para recuperar el requerimiento inicial de capital de trabajo.

Suponiendo que el capital de trabajo requerido equivale a un 20% de la inversión de capital fijo sin incluir el costo del terreno:

$$\begin{cases} WC_{Req}(N_{Pre}) = 0.2 \cdot ICF_L \\ WC_{Rec}(N_{Pre} + N_{Op}) = 0.2 \cdot ICF_L \end{cases}$$

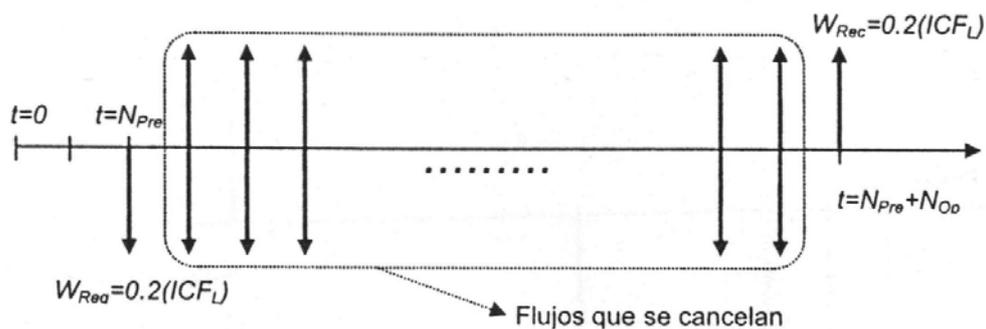


Figura 2: Posición de los flujos relacionados con W_{Req} y W_{Rec}

Las expresiones anteriores suponen en forma implícita que el capital de trabajo se gasta al inicio del primer periodo operativo ($t=N_{Pre}$ fin del último periodo de construcción), y que se recupera al final del último periodo de producción ($t=N_{Pre}+N_{Op}$). Estos dos son los únicos flujos de fondos relacionados con el capital de trabajo, ya que los flujos intermedios se cancelan (la

reconstitución del fondo al final de cada periodo se cancela con el gasto de este monto al inicio del periodo siguiente) tal cual se muestra en la Figura 2.

Al igual que en el caso anterior, el cálculo del capital de trabajo puede estimarse empleando otros supuestos.

5.1.4. INGRESOS POR VENTAS (V)

Los ingresos anuales por la venta una serie de productos generados pueden calcularse a partir del flujo anual de cada uno de los productos ($F_{Prod(k)(n)}$) y sus precios unitarios ($P_{Prod(k)}$).

$$V_{(n)} = \sum_k F_{Prod(k)(n)} \cdot P_{Prod(k)} \quad \text{con } n = (N_{Pre} + 1), \dots, (N_{Pre} + N_{Op})$$

La Figura 3 muestra un caso general en el que los ingresos por ventas varían en el tiempo debido a que los niveles de producción cambian en el tiempo. En algunos casos, se acostumbra operar las plantas por debajo de su capacidad nominal durante los primeros períodos de producción, previendo factores como el incremento futuro de la demanda, etc.

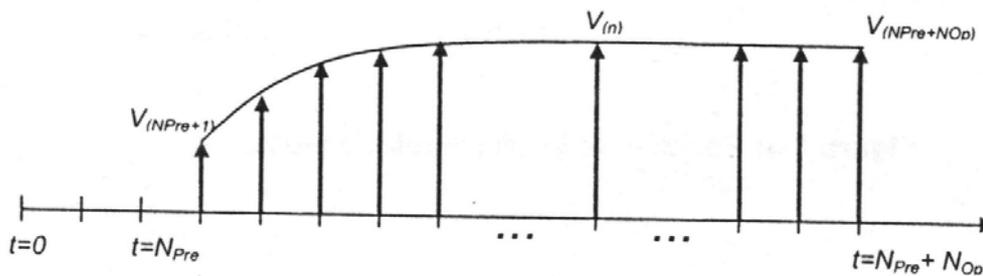


Figura 3: Posición de los flujos relacionados con V

En teoría, cuando una planta se encuentra adecuadamente dimensionada, se alcanza a vender todo lo que se produce. Esta condición ideal, aunque poco realista en algunos casos, es un supuesto que se toma para poder calcular los Ingresos por ventas. Sin embargo, el supuesto es válido cuando la determinación de la capacidad de producción de la planta se fundamenta en un estudio de mercado serio que incluye un estimativo del impacto del proyecto sobre el nivel de oferta general de los productos y sobre el nivel de precios de los mismos, lo que permite precios que garantizan la rentabilidad del proyecto.

5.1.5. COSTOS OPERATIVOS EXCLUYENDO LA DEPRECIACIÓN (COT)

En la sección 4 se mostró la forma de calcular el costo operativo anual de una planta. Si se supone que la planta opera a capacidad máxima desde el inicio de su operación hasta el final:

$$COT_{d(n)} = COT_d \quad \text{con } n = (N_{Pre} + 1), \dots, (N_{Pre} + N_{Op}) \quad (28)$$

Cuando la operación se inicia con un ritmo de producción menor al nominal y este se alcanza luego de unos cuantos periodos (3 o 4), es necesario indicar el porcentaje del nivel de producción al cual está operando la planta en cada periodo. Con estos porcentajes es posible corregir los costos operativos que sea necesario corregir (principalmente los variables) y los ingresos por venta de productos.

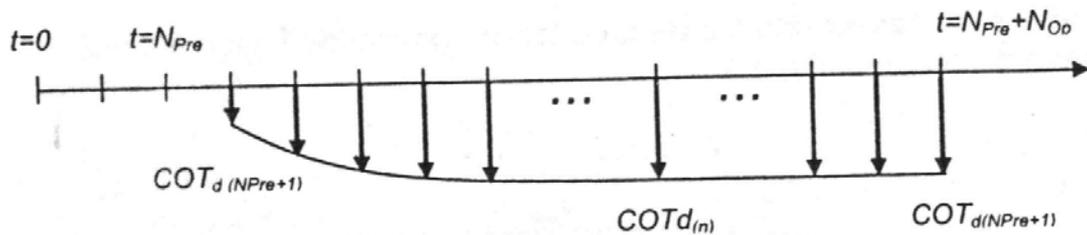


Figura 4: Posición de los flujos relacionados con COT_d

5.1.6. COSTOS POR DEPRECIACIÓN (C_{ep}) E INGRESOS POR SALVAMENTO (S)

Como ya se había mencionado, la depreciación es un costo ficticio, equivalente al desgaste natural de la planta debido al uso. Se contabiliza con el fin de generar un fondo de dinero que permita reponer la infraestructura física de la empresa (ICF) una vez ha cumplido con su periodo de vida.

En la Tabla 4 se indicó una manera simple de relacionar depreciación con la ICF. Esta relación da origen a lo que se conoce como el método de la línea recta, llamado así porque supone implícitamente que el desgaste de la infraestructura es homogéneo en el tiempo, y por tanto, constate para periodos iguales de tiempo. A pesar de su simplicidad, el método de la línea recta no es el único que se usa en el análisis de proyectos, y en algunos casos se prefieren los denominados métodos no lineales, también llamados métodos acelerados. En general, para un periodo de vida que comprende N_{pv} , años y un valor de salvamento S , el costo por depreciación para cualquier periodo está dado por:

$$C_{Dep(n)} = \frac{ICF_L - S}{N_{PV}} \quad \text{con } n = (N_{pre} + 1), \dots, (N_{pv} + N_{pre}) \quad (29)$$

Es posible calcular el costo por depreciación de cada uno de los elementos físicos de la planta (equipos, edificios, etc.) a partir de sus características. Sin embargo, teniendo en cuenta que en un estudio de ingeniería conceptual y básica no se requiere una gran precisión en el cálculo de la rentabilidad, resulta más conveniente reunir todos los elementos de infraestructura en un conjunto al que se le asigna un tiempo de vida medio de 10 años y un valor de salvamento equivalente al 10 % del valor original. Estos son los valores recomendados, pero pueden utilizarse otros para cubrir situaciones particulares. Cuando se tienen en cuenta estas recomendaciones:

$$\begin{cases} C_{Dep(n)} = \frac{0.9 \cdot ICF_L}{10} & \text{con } n = (N_{pre} + 1), \dots, (N_{pre} + N_{op}) \\ S_{(N_{pre} + N_{op})} = 0.1 \cdot ICF_L \end{cases} \quad (30)$$

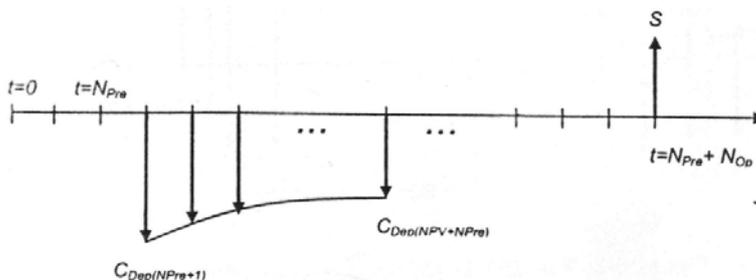


Figura 5: Posición de los flujos relacionados con C_{Dep} y S .

En los períodos no mencionados, no se presentan costos por depreciación ni ingresos por la venta de los elementos de la planta por su valor de salvamento. La ubicación de los flujos de caja asociados a estas variables se presenta en la Figura 5. En esta figura se muestra la forma general de los costos de depreciación calculados por un método no lineal. Si se calculan mediante un método lineal C_{Dep} tiene el mismo valor para todos los periodos.

5.1.7. IMPUESTOS SOBRE LAS GANANCIAS

El gobierno se encarga de cobrar un impuesto de renta durante la operación de la planta. Este impuesto se calcula con una tasa de impuestos (TI) aplicada sobre la base de los ingresos por ventas (V) menos los costos operativos totales incluyendo la depreciación ($COT_d + C_{Dep}$); es decir:

$$C_{imp(n)} = \begin{cases} (V_{(n)} - (COT_{d(n)} + C_{Dep(n)})) \cdot TI & \text{Si } V_{(n)} > (COT_{d(n)} + C_{Dep(n)}) \\ 0 & \text{Si } V_{(n)} \leq (COT_{d(n)} + C_{Dep(n)}) \end{cases}$$

con $n = (N_{Pre} + 1), \dots, (N_{Pre} + N_{Op})$

(31)

Los períodos pre-operativos se encuentran exentos de impuestos al igual que los períodos en donde se tienen pérdidas operativas. En la Figura 6 se presenta un caso general en el que los costos de los impuestos varían año a año ya sea debido al cambio del nivel de ventas, costos operativos o tasa de impuestos.

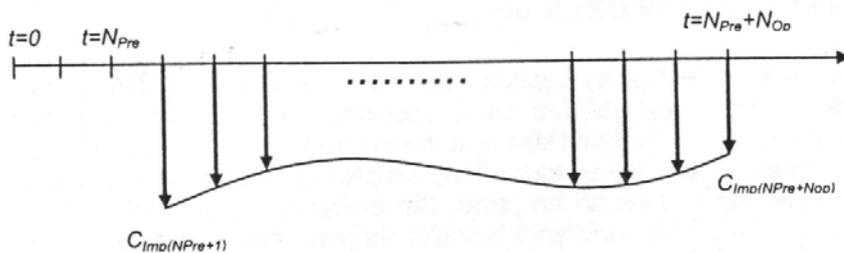


Figura 6: Posición de los flujos relacionados con C_{imp}

5.1.8. INGRESOS POR VENTA DEL TERRENO (L)

Si se desprecian los efectos de valorización y desvalorización del terreno, y adicionalmente se supone que es posible vender el terreno al final del último periodo operativo por el mismo monto invertido al inicio del proyecto:

$$L_{(N_{Pre} + N_{Op})} = 0.1 \cdot \sum_k C_{M(k)}^0$$

(32)

El ingreso por este concepto sólo se presenta al final del último periodo, tal cual se ilustra en la Figura 7.

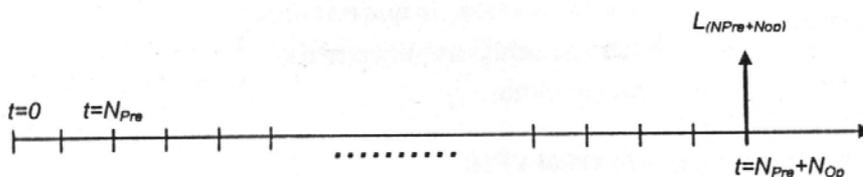


Figura 7: Posición del flujo relacionado con L

5.2. RENTABILIDAD A PARTIR DE FLUJOS DE CAJA

Como se indicó en la ecuación (23), al totalizar todos los elementos mencionados se obtiene una serie de flujos de caja FC con $n=0\dots(N_{pre}+N_{op})$. A partir de estos flujos de caja es posible calcular algunos parámetros que cuantifican la rentabilidad del proyecto.

5.2.1. VALOR PRESENTE NETO (VPN)

El VPN representa la suma de todos los flujos de caja descontados a valor presente ($t=0$), teniendo en cuenta una tasa de descuento "i".

Es decir:

$$| \text{VPN} = \sum_{n=0}^{(N_{pre}+N_{op})} FC_{(n)} \cdot (1+i)^{-n} \quad (33)$$

La tasa de descuento "i" caracteriza el costo de oportunidad asumido por el inversionista que compromete dinero en el proyecto que se está evaluando. Es decir, representa la tasa de Interés máxima que el inversionista podría obtener en otro proyecto diferente al que se está considerando.

5.2.2. TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)

La TIR es un indicativo del ritmo de crecimiento del capital invertido en un proyecto. Se calcula mediante la solución de la ecuación:

$$| 0 = \sum_{n=0}^{(N_{pre}+N_{op})} FC_{(n)} \cdot (1+TIR)^{-n} \quad (34)$$

Es decir, representa la tasa de descuento que conduce a un $VPN=0$.

Por razones que no se discutirán en este texto, desde el punto de vista del inversionista, el criterio de evaluación preferido para comparar los resultados financieros de dos proyectos es el VPN y no la TIR. Sin embargo, en el ámbito de los procesos químicos, cualquiera de los dos parámetros puede emplearse con propósitos de diseño y optimización. Aún así, matemáticamente resulta más sencillo emplear el VPN como criterio de evaluación, ya que el cálculo de la TIR siempre implica la solución de un polinomio.

5.2.3. COSTO ANUAL EQUIVALENTE (CAE)

A pesar de que no es una medida de la rentabilidad en el sentido estricto, el CAE es un parámetro de evaluación muy útil a la hora de comparar piezas individuales de equipo, subsistemas o sistemas completos de producción. En el diseño de plantas químicas es muy empleado para evaluar alternativas y orientar las decisiones de ingeniería.

Este costo es la suma de los costos operativos anuales del sistema y la cuota anual constante que sería necesario pagar para amortizar la inversión de capital fija durante el tiempo de vida del sistema.

$$| \text{CAE} = \text{COT} + (A/P) \cdot \text{ICF} \quad , \quad (A/P) = \frac{\text{TMR} \cdot (1+\text{TMR})^{N_{pv}}}{(1+\text{TMR})^{N_{pv}} - 1} \quad (35)$$

5.3. PASOS PARA EL CÁLCULO DE LA RENTABILIDAD DE UNA PLANTA QUÍMICA

1. Con la información necesaria, calcule la inversión de capital de la planta sin incluir el terreno (ICF_L) y el costo del terreno (L). A partir de estos valores, determine los montos de inversión en cada uno de los períodos ($ICF_{(n)}$), el valor de salvamento ($S_{(n)}$) y el valor que se recuperará por la venta del terreno al final del tiempo de vida de la planta ($L_{(n)}$).
2. Con la información adecuada, calcule el costo operativo total de la planta sin incluir depreciación ($COTd_{(n)}$) y el costo por depreciación ($CDep_{(n)}$) de cada periodo.
3. Construya una tabla en la que se indiquen los niveles de producción de cada producto para cada periodo ($F_{Prod(k)(n)}$) y consulte el precio unitario de cada uno de los productos $P_{Prod(k)}$. Suponiendo que es posible vender toda la producción, calcule los ingresos por ventas de producto en cada uno de los periodos ($V_{(n)}$).
4. A partir de $V_{(n)}$, $COTd_{(n)}$, $Cdep_{(n)}$, y la tasa de impuestos sobre la renta (TI). calcule el valor de los impuestos que es necesario pagar en cada período ($C_{imp(n)}$).
5. A partir del ICF_L , calcule el capital de trabajo requerido y recuperado ($WC_{Req(n)}$). ($WC_{Rec(n)}$).
6. Totalice el efecto de $V_{(n)}$, $COTd_{(n)}$, $Cimp_{(n)}$, $ICF_{(n)}$, $S_{(n)}$, $L_{(n)}$, $WC_{Req(n)}$, $WC_{rec(n)}$ para obtener los $FC_{(n)}$.
7. Plantee y resuelva las ecuaciones que permiten estimar la rentabilidad.

5.4. ANÁLISIS DE LOS VALORES DE RENTABILIDAD

Como se ha visto a lo largo de este capítulo, en el ámbito del diseño de plantas químicas, el cálculo de la rentabilidad tiene asociado una gran cantidad de simplificaciones que limitan su aplicabilidad a la determinación de cuales opciones de diseño son mejores, y que sólo en casos muy simples constituye un estimativo preciso de la rentabilidad real de un proyecto. Sin embargo, en el ámbito de la evaluación de proyectos no es suficiente calcular valores representativos de la rentabilidad, también es necesario interpretarLos. En particular, existe una relación entre los criterios y las decisiones adecuadas de inversión.

Decisiones de inversión basadas en la TIR:

Como ya se dijo, la TIR es una medida del crecimiento del capital invertido en el proyecto, mientras que la TMR representa el crecimiento mínimo que esperan los inversionistas para considerar que el proyecto es atractivo. Esta TMR se calcula totalizando los efectos del costo de oportunidad del inversionista y el nivel de riesgo del proyecto. La TMR es mayor entre más grande es el costo de oportunidad y el riesgo inherente al proyecto.

Comparando TIR y TMR, las decisiones se deben tomar teniendo en cuenta:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Si } TIR \geq TMR \\ \text{Si } TIR < TMR \end{array} \right\} \Rightarrow \left. \begin{array}{l} \text{El proyecto es atractivo para el} \\ \text{inversionista, ya que supera o} \\ \text{igual a sus expectativas mínimas} \\ \text{de crecimiento.} \\ \text{El proyecto no es atractivo para} \\ \text{el inversionista, ya que no cubre} \\ \text{sus expectativas mínimas de} \\ \text{crecimiento.} \end{array} \right\} \quad (36)$$

Decisiones de inversión basadas en el VPN:

Por su parte, el VPN representa una cantidad de dinero que, puesta a una tasa igual a la TMR a partir de $t=0$, causa los mismos efectos de generación de capital que aquellos implícitos en el proyecto. Por esto, un VPN positivo indica que el proyecto genera capital adicional, mientras que un VPN negativo indica que el proyecto genera pérdidas de capital.

En términos generales puede probarse que una VPN negativa implica un crecimiento del capital que está por debajo de lo requerido, es decir por debajo de la TMR. De esta forma:

$$\left. \begin{array}{l}
 \text{Si } VPN \geq 0 \Rightarrow TIR \geq TMR \Rightarrow \left(\begin{array}{l} \text{El proyecto es atractivo para el} \\ \text{inversionista, ya que supera o} \\ \text{igual a sus expectativas mínimas} \\ \text{de crecimiento.} \end{array} \right) \\
 \text{Si } VPN < 0 \Rightarrow TIR < TMR \Rightarrow \left(\begin{array}{l} \text{El proyecto no es atractivo para} \\ \text{el inversionista, ya que no cubre} \\ \text{sus expectativas mínimas de} \\ \text{crecimiento.} \end{array} \right)
 \end{array} \right\} (37)$$

Todos estos conceptos se aplican en el siguiente ejemplo.

EJEMPLO 3

Se pretende evaluar la rentabilidad de un proceso de producción de DME, por medio del VPN y la TIR. El diagrama del proceso se muestra en la Figura 8 y las características de los equipos, las entradas y las salidas de la planta se muestran en la Tabla 8.

En sus cálculos tenga en cuenta las siguientes consideraciones:

- Para definir el horizonte de tiempo suponga 2 años de construcción, 10 años de operación y un CEPCI actual de 400.
- El nivel de producción de la planta causará una sobreoferta con la que el precio local del DME disminuirá hasta 0.5 \$/kg.
- El agua residual que genera la planta puede clasificarse como un residuo no peligroso.
- Suponga operación continua de la planta durante todo el año; es decir, $\tau_y = 1095$ turnos/año.
- Salario medio de los operarios 17.000 (\$/año) y $L_{y(op)} = 245$ (turnos-operador/(operador.año)).
- Depreciación por el método de la línea recta a 10 años.
- Las relaciones de los costos modulares con algunas de las demás magnitudes están dadas por: $L = (0,1) \cdot C_M^0$, $ICF_L = (1,18) \cdot CM + 0,25 \cdot (C_M)$, $S = (0,1) \cdot ICF_L$, $WC = (0,2) \cdot ICF_L$.
- Tasa de impuestos 35%.
- Tasa de descuento para la evaluación del proyecto (Tasa mínima de retorno) = 29%. Esta tasa resulta de la combinación de una tasa real de descuento del 17% y un nivel de inflación esperada del 10 % para el horizonte de tiempo en el que se evaluará la planta.

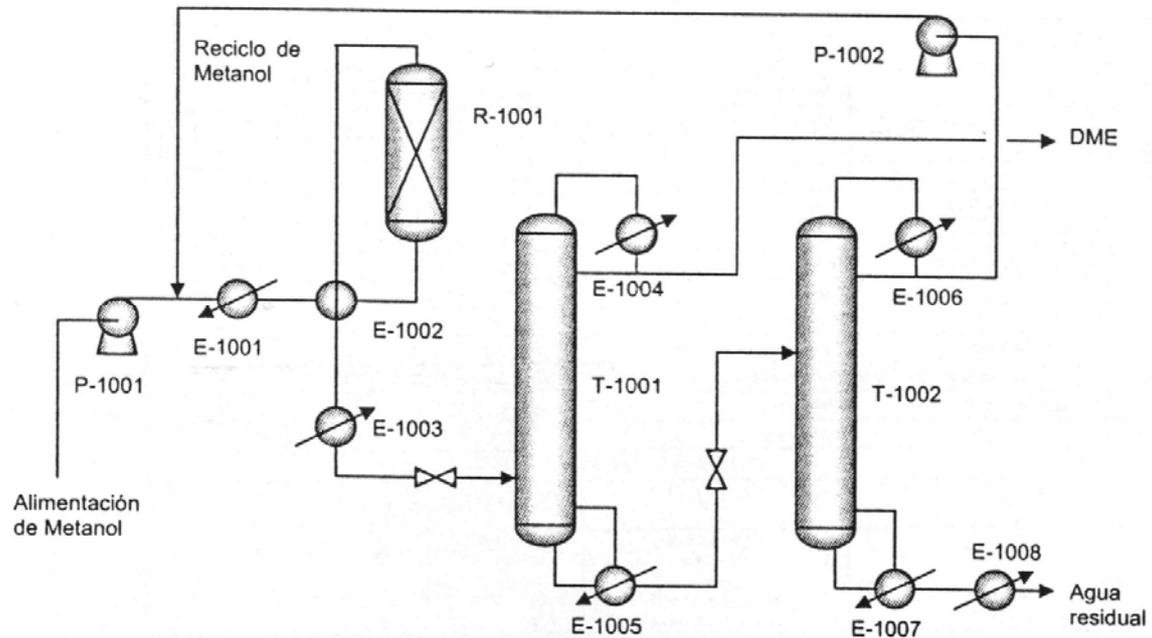


Figura 8: Diagrama de flujo simplificado de una planta de producción de Dimetil Éter (DME). residual

Solución:

La Tabla 9 contiene las constantes y las ecuaciones empleadas así como los resultados obtenidos en el cálculo de los costos de capital de la planta, incluyendo la discriminación en los elementos que constituyen los flujos de caja.

La Tabla 5-10 contiene las constantes empleadas y los resultados obtenidos en el cálculo del costo operativo sin incluir la depreciación, el costo por depreciación y los ingresos por ventas del producto. La Tabla 5-11 contiene el cálculo de los flujos de caja, los flujos de caja descontados, los flujos de caja descontados con la TIR, el cálculo del VPN del proyecto, y el cálculo de la TIR. Particularmente, la TIR se calculó con la ayuda del Solver de Microsoft Excel, modificando el valor de la celda asociada con la TIR hasta anular el valor presente neto de los flujos descontados con esta tasa.

EQUIPOS								
	Descripción	Tipo	Cantidad	Capacidad		Material de construcción	Presión operativa (barg)	
P-1001	Bomba de alimentación	Centrífuga	1	W_{Em} [kW]	5.59	Cast.S.	14.2	
P-1002	Bomba de reciclo	Centrífuga	1	W_{Em} [kW]	0.95	Cast.S.	14.5	
E-1001	Precalentador	Cabeza flotante	1	A[m ²]	159.5	C.S.	S / T	14.2 9.0
E-1002	Intercambiador vapor-vapor	Cabeza flotante	1	A[m ²]	166.3	C.S.	S / T	14.1 12.9
E-1003	Condensador	Tubos en U	1	A[m ²]	39.6	C.S.	S / T	12.8 0.0
E-1004	Condensador de la T-1001	Tubos en U	1	A[m ²]	183.4	C.S.	S / T	9.4 0.0
E-1005	Rehervidor de la T-1001	Kettle	1	A[m ²]	27.7	C.S.	S / T	9.4 9.0
E-1006	Condensador de la T-1002	Tubos en U	1	A[m ²]	25.6	C.S.	S / T	6.4 0.0
E-1007	Rehervidor de la T-1002	Kettle	1	A[m ²]	100.0	C.S.	S / T	6.4 9.0
E-1008	Enfriador	Cabeza flotante	1	A[m ²]	17.3	C.S.	S / T	6.4 0.0
R-1001	Reactor	Recipiente empacado	1	D[m] , L[m]	1 16	C.S.	13.7	
T-1001	Torre de purificación	Torre de platos	1	D[m] , L[m]	1 6	C.S.	9.4	
T-1002	Torre de recuperación de metanol	Torre de platos	1	D[m] , L[m]	1 8	C.S.	6.4	
PT-1001	Platos de la T-1001	Perforados	12	D[m]	1	C.S.	9.4	
PT-1002	Platos de la T-1001	Perforados	16	D[m]	1	C.S.	6.4	
ENTRADAS Y SALIDAS								
	Tipo		Flujos [kg/año]					
Metanol	Materia prima		73,288,957					
DME	Producto		52,308,237					
Agua residual	Residuo		20,980,214					
Vapor de media presión (MPS)	Servicio Industrial		98,645,105					
Agua de enfriamiento (CW)	Servicio Industrial		4,927,694,523					

Tabla 8: Equipos principales, entradas y salidas de una planta de producción de Dimetil Éter (DME).

Los resultados muestran que el proyecto en apariencia es bastante rentable, y de hecho la inversión se recupera durante el primer año de operación. El cálculo de la rentabilidad empleando la metodología simplificada que aquí se presenta es adecuado para propósitos de evaluación de alternativas en el diseño de procesos, ya que indica la tendencia general del comportamiento financiero y permite identificar un conjunto reducido de alternativas prometedoras. Sin embargo, dada la gran cantidad de simplificaciones que fue necesario tomar, no es recomendable suponer que el comportamiento financiero detallado del proyecto es aquel que indica este modelo.

En un análisis financiero detallado, el dimensionamiento, el cálculo de los costos de capital y costos operativos son más elaborados. Adicionalmente, es necesario tener en cuenta aspectos como el impacto real de la producción sobre el mercado, la volatilidad del mercado local, el riesgo financiero del país en donde se realizará el proyecto, etc.

Bombas																					
FM	$F_p=C_1+C_2 \cdot \text{Log}_{10}(P)+C_3 \cdot (\text{Log}_{10}(P))^2$								$F_{CM}=B_1+B_2 \cdot F_p \cdot F_M, F_{CM}^0=B_1+B_2$				$C_{Eq}^0=(IP_{Act}/IP_{Ref}) \cdot 10^{(K_1+K_2 \cdot \text{Log}_{10}(A)+K_3 \cdot (\text{Log}_{10}(A))^2)}$						$C_M=F_{CM} \cdot C_{Eq}^0$		
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	P [barg]	F _p	B ₁	B ₂	F _{CM}	F _{CM} ⁰	K ₁	K ₂	K ₃	A	IP _{Ref.}	IP _{Act.}	C _{Eq} ⁰	C _M	C _M ⁰	
P-1001	1.8	0.1682	0.3477	0.4841	--	--	14.2	1.212	1.8	1.51	5.093	3.310	3.5793	0.3208	0.0285	5.59	382	400	\$ 7,161	\$ 36,473	\$ 23,704
P-1002	1.8	0.1682	0.3477	0.4841	--	--	14.5	1.225	1.8	1.51	5.129	3.310	3.5793	0.3208	0.0285	0.95	382	400	\$ 3,910	\$ 20,055	\$ 12,942
Intercambiadores de calor																					
FM	$\text{Log}_{10}(F_p)=C_1+C_2 \cdot \text{Log}_{10}(P)+C_3 \cdot (\text{Log}_{10}(P))^2$								$F_{CM}=B_1+B_2 \cdot F_p \cdot F_M, F_{CM}^0=B_1+B_2$				$C_{Eq}^0=(IP_{Act}/IP_{Ref}) \cdot 10^{(K_1+K_2 \cdot \text{Log}_{10}(A)+K_3 \cdot (\text{Log}_{10}(A))^2)}$						$C_M=F_{CM} \cdot C_{Eq}^0$		
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	P [barg]	F _p	B ₁	B ₂	F _{CM}	F _{CM} ⁰	K ₁	K ₂	K ₃	A	IP _{Ref.}	IP _{Act.}	C _{Eq} ⁰	C _M	C _M ⁰	
E-1001	1	-0.06499	0.05025	0.01474	--	--	14.2	1.029	1.8	1.5	3.344	3.300	3.4338	0.1445	0.1079	159.5	382	400	\$ 19,757	\$ 66,062	\$ 65,198
E-1002	1	-0.06499	0.05025	0.01474	--	--	14.1	1.029	1.8	1.5	3.343	3.300	3.4338	0.1445	0.1079	166.3	382	400	\$ 20,277	\$ 67,781	\$ 66,913
E-1003	1	-0.06499	0.05025	0.01474	--	--	12.8	1.020	1.8	1.5	3.330	3.300	3.2138	0.2688	0.07961	39.6	382	400	\$ 7,353	\$ 24,489	\$ 24,265
E-1004	1	--	--	--	--	--	--	1.000	1.8	1.5	3.300	3.300	3.2138	0.2688	0.07961	183.4	382	400	\$ 17,785	\$ 58,690	\$ 58,690
E-1005	1	--	--	--	--	--	--	1.000	1.8	1.5	3.300	3.300	3.5638	0.1906	0.1107	27.7	382	400	\$ 12,281	\$ 40,526	\$ 40,526
E-1006	1	--	--	--	--	--	--	1.000	1.8	1.5	3.300	3.300	3.2138	0.2688	0.07961	25.6	382	400	\$ 5,895	\$ 19,454	\$ 19,454
E-1007	1	--	--	--	--	--	--	1.000	1.8	1.5	3.300	3.300	3.5638	0.1906	0.1107	100.0	382	400	\$ 25,574	\$ 84,394	\$ 84,394
E-1008	1	--	--	--	--	--	--	1.000	1.8	1.5	3.300	3.300	3.4338	0.1445	0.1079	17.3	382	400	\$ 6,285	\$ 20,740	\$ 20,740
Recipientes a presión																					
FM	$F_p=C_1+C_2 \cdot \text{Log}_{10}(P)+C_3 \cdot (\text{Log}_{10}(P))^2+C_4 \cdot (\text{Log}_{10}(P))^3+C_5 \cdot (\text{Log}_{10}(P))^4$								$F_{CM}=B_1+B_2 \cdot F_p \cdot F_M, F_{CM}^0=B_1+B_2$				$C_{Eq}^0=(IP_{Act}/IP_{Ref}) \cdot 10^{(K_1+K_2 \cdot \text{Log}_{10}(A)+K_3 \cdot (\text{Log}_{10}(A))^2)}$						$C_M=F_{CM} \cdot C_{Eq}^0$		
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	P [barg]	F _p	B ₁	B ₂	F _{CM}	F _{CM} ⁰	K ₁	K ₂	K ₃	A	IP _{Ref.}	IP _{Act.}	C _{Eq} ⁰	C _M	C _M ⁰	
R-1001	1	0.5146	0.6838	0.297	0.0235	0.002	13.7	1.732	2.5	1.72	5.479	4.220	3.6237	0.5262	0.2146	16	382	400	\$ 38,766	\$ 212,397	\$ 163,594
T-1001	1	0.5146	0.6838	0.297	0.0235	0.002	9.4	1.483	2.5	1.72	5.050	4.220	3.6237	0.5262	0.2146	6	382	400	\$ 15,244	\$ 76,991	\$ 64,330
T-1001	1	0.5146	0.6838	0.297	0.0235	0.002	6.4	1.266	2.5	1.72	4.677	4.220	3.6237	0.5262	0.2146	8	382	400	\$ 19,675	\$ 92,022	\$ 83,030
Internos (Platos)																					
FM													$C_{Eq}^0=(IP_{Act}/IP_{Ref}) \cdot N \cdot Fq \cdot (K_1+K_2 \cdot A+K_3 \cdot A^2)$						$C_M=F_{CM} \cdot C_{Eq}^0$		
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	P [barg]	F _p	F _{CM}	F _{CM} ⁰	Fq	N	K ₁	K ₂	K ₃	A	IP _{Ref.}	IP _{Act.}	C _{Eq} ⁰	C _M	C _M ⁰	
PT-1001	--	--	--	--	--	--	--	1.200	1.200	1.4	12	235	19.8	75.07	1	382	400	\$ 5,803	\$ 6,964	\$ 6,964	
PT-1002	--	--	--	--	--	--	--	1.200	1.200	1.2	16	235	19.8	75.07	1	382	400	\$ 6,632	\$ 7,958	\$ 7,958	
																		Σ	\$ 834,997	\$ 742,702	
Costos totales																					
$C_{MT}=1.18(\Sigma C_{M(k)})$		\$	985,296	$ICF=C_{MG}=C_{MT}+0.35(\Sigma C_{M(k)})$		\$	1,245,242	$L=0.1(\Sigma C_{M(k)})$		\$	74,270	$ICF_L=C_{MT}+0.25(\Sigma C_{M(k)})$		\$	1,170,971						

Tabla 9: Cálculo de los costos de capital de la planta de producción de dimetil Eter (DME)

Costos de materias primas (C_{MP})			
Descripción	Consumo anual $F_{MP(k)}$ [kg/año]	Precio $P_{MP(k)}$ [\$/kg]	$C_{MP(k)}$ [\$/año]
Metanol	73,288,957	0.16	\$ 11,726,233
Total C_{MP} [\$/año]			\$ 11,726,233
Costos de tratamiento de residuos Industriales (C_{TR})			
Tipo	Consumo anual $F_{R(k)}$ [kg/año]	Precio $P_{TR(k)}$ [\$/kg]	$C_{TR(k)}$ [\$/año]
Agua residual (Residuo no peligroso)	20,980,214	0.036	\$ 755,288
Total C_{TR} [\$/año]			\$ 755,288
Costos de servicios Industriales (C_{SI})			
Tipo	Consumo anual $F_{SI(k)}$ [kg/año]	Precio $P_{SI(k)}$ [\$/kg]	$C_{SI(k)}$ [\$/año]
Vapor de media presión (MPS)	98,645,105	0.00731	\$ 721,096
Agua de enfriamiento (CW)	4,927,694,523	0.0000067	\$ 33,016
Tipo	Consumo anual $F_{SI(k)}$ [kW.h/año]	Precio $P_{SI(k)}$ [\$/kW.h]	$C_{SI(k)}$ [\$/año]
Energía eléctrica	57,290	0.06	\$ 3,437
Total C_{SI} [\$/año]			\$ 757,549
Costos de mano de obra operativa (C_{MOO})			
Equipo	N_k	$L_{s(k)}$	$L_{s(k)}.N_k$
Bombas	2	0.00	0.0000
Intercambiadores	8	0.10	0.8000
Torres	2	0.35	0.7000
Reactores	1	0.50	0.5000
$L_S = \sum L_{s(k)}.N_k$	2.0000	τ_Y	1095
S_{Op}	\$ 17,000	$L_{Y(Op)}$	245
N_{Op}	8.9388	C_{MOO} [\$/año]	\$ 151,959
Costos operativos sin depreciación y costo por depreciación			
COT_d	\$ 16,923,048	C_{Dep}	\$ 105,387
Ingreso por venta de productos (V)			
Tipo	Producción $F_{Prod(k)}$ [kg/año]	Precio $P_{Prod(k)}$ [\$/kg]	$V_{(k)}$ [\$/año]
DME	52,308,237	0.5	\$ 26,154,119
Total V [\$/año]			\$ 26,154,119

Tabla 10: Cálculo de los costos operativos de la planta de producción de dimetil Eter (DME)

(n)	V _(n)	COT _{d(n)}	C _{Dep(n)}	C _{imp(n)}	ICF _(n)	S _(n) =0.1(ICFL)	L _(n)	WC _{Req(n)}	WC _{Rec(n)}	FC _(n)	FC _{(n).(1+i)⁻ⁿ}	FC _{(n).(1+TIR)⁻ⁿ}
0					\$ 74,270					\$ (74,270)	\$ (74,270)	\$ (74,270)
1					\$702,583					\$ (702,583)	\$ (544,638)	\$ (247,868)
2					\$468,389			\$234,194		\$ (702,583)	\$ (422,200)	\$ (87,447)
3	\$26,154,119	\$16,923,048	\$105,387	\$3,193,989						\$6,037,082	\$ 2,812,276	\$ 265,092
4	\$26,154,119	\$16,923,048	\$105,387	\$3,193,989						\$6,037,082	\$ 2,180,059	\$ 93,523
5	\$26,154,119	\$16,923,048	\$105,387	\$3,193,989						\$6,037,082	\$ 1,689,968	\$ 32,995
6	\$26,154,119	\$16,923,048	\$105,387	\$3,193,989						\$6,037,082	\$ 1,310,053	\$ 11,640
7	\$26,154,119	\$16,923,048	\$105,387	\$3,193,989						\$6,037,082	\$ 1,015,545	\$ 4,107
8	\$26,154,119	\$16,923,048	\$105,387	\$3,193,989						\$6,037,082	\$ 787,244	\$ 1,449
9	\$26,154,119	\$16,923,048	\$105,387	\$3,193,989						\$6,037,082	\$ 610,267	\$ 511
10	\$26,154,119	\$16,923,048	\$105,387	\$3,193,989						\$6,037,082	\$ 473,075	\$ 180
11	\$26,154,119	\$16,923,048	\$105,387	\$3,193,989						\$6,037,082	\$ 366,725	\$ 64
12	\$26,154,119	\$16,923,048	\$105,387	\$3,193,989		\$117,097	\$74,270		\$234,194	\$6,462,643	\$ 304,322	\$ 24
										VPN	\$10,508,425	\$ (0)

Tasa de impuestos TI	35%
Tasa de descuento "i"	29%
Tasa Interna de retorno TIR	183%

6. RESUMEN

La construcción de un modelo que permita la evaluación de las decisiones de diseño utilizando criterios financieros requiere de metodologías especiales para estimar los montos de inversión y los costos operativos además de la rentabilidad del proyecto durante todo su ciclo de vida. En este capítulo se presentaron estas metodologías, y se mencionó en forma superficial la forma en la que los valores de rentabilidad pueden utilizarse para cuantificar la bondad de un diseño particular.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [01] Guthrie K.M. (1976). Capital Cost Estimating. Chemical Engineering Vol69, Pg114.
- [02] Turton, Baille, Whiting. Shaeiwitz. (1998). Analysis synthesis and design of chemical processes. Upper Saddle River: Prentice Hall.
- [03] Peters, M.S., Timerhausers K.D.(1991). Plant Design and Economics for Chemical Engineers. New York. McGraw-Hill
- [04] Alvares A.(1999), Matemáticas 2th Ed. Bogotá. McGraw-Hill.
- [05] Chain N.S., Chain R.S. (1995). Preparación y evaluación de proyectos 3" Ed. Bogotá. McGraw-Hill.
- [06] Park C. S., Sharp-Bette G.P. (1990). Advanced engineering economics. New York: Wiley.
- [07] <https://richardturton.faculty.wvu.edu/publications/analysis-synthesis-and-design-of-chemical-processes-5th-edition>
- [08] How to Estimate Utility Costs, Gael D. Ulrich and Palligarnai T. Vasudevan, University of New Hampshire-CHEMICAL ENGINEERING WWW.CHE.COM APRIL 2006
- [09] How to Estimate Operating Costs, William M. Vatavuk, Vatavuk Engineering- CHEMICAL ENGINEERING WWW.CHE.COM JULY 2005
- [10] Short-Cut Piping Costs, Gael D. Ulrich and Palligarnai T. Vasudevan University of New Hampshire - CHEMICAL ENGINEERING WWW.CHE.COM MARCH 2006