



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®



**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE LOS MOCHIS**

**REPORTE PERIODO SABÁTICO
(SEMESTRE DOS)**

**APUNTES DE LA ASIGNATURA
SÍNTESIS Y OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS**

**DOCENTE
MC. FLORENCIO MORENO OSUNA**

SEPTIEMBRE 2025

ÍNDICE

CONTRIBUCIÓN ACADEMICA	6
DESARROLLO	11
Unidad I. Síntesis y análisis de procesos.....	13
1.1. Selección de rutas de reacción	13
1.2. Desarrollo de diagramas de flujo	18
1.3. Selección de procesos de separación	25
Complementos educacionales	28
Ejercicios prácticos (Excel).....	28
Estudio de casos, aprendizaje basado en problemas (AutoCAD)	28
Presentación (PowerPoint).....	28
Unidad II. Integración de energía	29
2.1. Significado del acercamiento mínimo de energía	30
2.2. Determinación de redes con el método de diagramas de contenido de calor	32
2.3. Determinación de redes con el método del punto de pliegue	33
2.4. Predicción de requerimiento de áreas en redes de intercambiadores de calor	42
2.5. Revisión de redes de intercambiadores de calo existentes	44
Complementos educacionales	47
Ejercicios prácticos (Excel).....	47
Infografía (Canva)	47
Presentación (PowerPoint).....	47
Unidad III. Evaluación económica de procesos	49
3.1 Selección de materiales.....	50

3.2. Técnicas de análisis económico de procesos	62
3.3. Estimación de costos de inversión y operación	66
Complementos educativos	76
Ejercicios prácticos (Excel).....	76
Presentación (PowerPoint).....	76
Cuestionario de evaluación (Socrative)	76
Unidad IV. Optimización de procesos	77
4.1. Modelación de procesos.....	78
4.2. Optimización de una variable.....	92
4.3. Programación dinámica	100
Complementos educativos	104
Estudio de caso (Excel).....	104
Ejercicio práctico (Word).....	104
Infografía (Canva)	104
REFERENCIAS.....	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura. 1 Cascada de calor en los intervalos de temperaturas.....	38
Figura. 2 Determinación del $\Delta T_{\min}$ óptimo.	40
Figura. 3 Segmentos de área entre las curvas compuestas.	40
Figura. 4 Temperaturas en los extremos de (a) las curvas compuestas y (b) un cambiador de calor.	41
Figura. 5 Gran curva compuesta.....	42
Figura. 6 Requerimientos mínimos de área respecto a energía para diseño de redes de intercambiadores.	45
Figura. 7. Esquema resumen.	52
Figura. 8 Diagrama de flujo de efectivo hipotético.....	57
Figura. 9 Diagrama de elementos de Inversión de Capital Total.....	67
Figura. 10 Diagrama de elementos de Inversión de Capital Total.....	69
Figura. 11 Metodología de modelado.....	80
Figura. 12 Metodología de modelado vertical.....	81
Figura. 13 Diagrama de la identificación de factores y mecanismos controlantes.	82
Figura. 14 Diagrama de balance.	85
Figura. 15 Diagrama de variables exógenas y endógenas.	94
Figura. 16 Plano convexo.	98
Figura. 17 Plano no convexo.....	98
Figura. 18 Flujo de materiales en el proceso.....	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ejemplos de parámetros típicos de dispositivos de control.	71
Tabla 2. Tabla de transporte molecular (fenómenos microscópicos).	87
Tabla 3. Tabla de transporte global (fenómenos macroscópicos).	88

CONTRIBUCIÓN ACADEMICA

Dentro del modelo educativo que tiene implementado el Sistema Tecnológico Nacional es muy importante la consolidación de los planes y programas de estudio de cada una de las materias que conforman las currículas de las distintas carreras que oferta a lo largo y ancho del territorio nacional.

La práctica docente como factor fundamental para esta consolidación, se ve favorecida en un alto porcentaje cuando se cuenta con herramientas didácticas objetivas, fáciles y de alta aplicación para que el alumno pueda entender a la perfección los contenidos de las mismas. Es en este tenor que el desarrollo de apuntes de materias juega un papel importantísimo ya que permite contar con guías básicas para su impartición tanto por profesores especializados como aquellos que con cierto perfil, las puedan cubrir en casos excepcionales.

La elaboración de material didáctico actualizado y estructurado beneficiará tanto a estudiantes como a docentes, permitiendo:

- Mejorar la calidad educativa, proporcionando una guía clara y aplicada al contexto industrial.
- Facilitar la enseñanza y aprendizaje, con explicaciones detalladas, ejercicios prácticos y estudios de caso reales.
- Actualizar los contenidos, alineándolos con los avances tecnológicos y normativos del sector.
- Impulsar la investigación y el desarrollo de proyectos, incentivando a los estudiantes a aplicar los conocimientos adquiridos en la resolución de problemas industriales.

Por otro lado, la elaboración de apuntes estructurados y actualizados durante un año sabático en el Sistema Tecnológico Nacional de México representa una oportunidad invaluable para consolidar y mejorar los recursos educativos en esta área. Este material contribuirá a:

1. Fortalecer la enseñanza y aprendizaje mediante la integración de enfoques teóricos y prácticos con estudios de caso reales, alineados a los desafíos actuales de la industria química.

2. Actualizar los contenidos incorporando avances tecnológicos, normativas ambientales y tendencias en procesos industriales sostenibles.
3. Favorecer la accesibilidad y calidad educativa, proporcionando material de apoyo claro y estructurado que facilite la comprensión de conceptos complejos.
4. Impulsar la investigación y aplicación práctica de los procesos de producción en sectores clave como la petroquímica, farmacéutica, alimentaria y ambiental.

En este sentido, el desarrollo de estos apuntes no solo beneficiará a estudiantes y docentes del Sistema Tecnológico Nacional de México, sino que también reforzará la formación de ingenieros químicos con una visión más integral, crítica y orientada a la innovación en procesos de separación.

La materia **Síntesis y Optimización de Procesos** es un pilar fundamental en la formación de ingenieros químicos, ya que profundiza en los principios y aplicaciones del diseño de los procesos y operaciones esenciales para la industria de transformación. Su estudio permite desarrollar competencias clave en la forma de procesar las materias primas y el aprovechamiento de los recursos económicos y energéticos con que se cuenta a partir de temas tales como: síntesis y análisis de procesos, integración de energía, evaluación económica de procesos y principios de optimización.

Esta materia se imparte en el Tecnológico Nacional de México (TecNM) y contará con información actualizada y con complementos educativos que integren diversas herramientas tecnológicas para facilitar el aprendizaje de la asignatura en cuestión; les servirá a los docentes cuando la impartan y a los estudiantes cuando estén cursándola respectivamente.

La materia Síntesis y Optimización de Procesos permite el dominio de las técnicas básicas de síntesis de rutas de reacción mediante el análisis técnico y económico de alternativas basadas en la heurística y complementándose con la aplicación de principios termodinámicos y de transferencia de masa y energía. En este contexto, la elaboración de apuntes especializados durante el año sabático en el Sistema Tecnológico Nacional de México contribuirá significativamente a fortalecer la enseñanza y el aprendizaje en los siguientes temas clave:

Síntesis y análisis de procesos.- Se refiere al estudio sistemático para diseñar, evaluar y mejorar sistemas de producción o transformación de materias primas en productos útiles, considerando criterios técnicos, económicos y ambientales.

Síntesis de procesos: implica crear o estructurar un proceso industrial desde cero o modificar uno existente, seleccionando adecuadamente las operaciones unitarias, la secuencia de pasos, equipos, materias primas, y condiciones de operación para lograr un objetivo específico (por ejemplo, máxima eficiencia o menor costo).

Análisis de procesos: se enfoca en evaluar el comportamiento del proceso ya diseñado, determinando aspectos como balances de masa y energía, eficiencia, viabilidad económica, impacto ambiental y posibilidades de mejora.

Ambos enfoques son fundamentales para el diseño racional de procesos sostenibles, eficientes y económicamente viables en la ingeniería química y de procesos.

Integración de energía.- Tiene como objetivo estudiar cómo aprovechar y reutilizar eficientemente la energía térmica dentro de un proceso industrial, para reducir el consumo de energía externa, disminuir costos operativos y minimizar el impacto ambiental.

Esta integración se logra mediante el análisis de corrientes calientes y frías del proceso, utilizando herramientas como el análisis de pinch (pinch analysis), que permite identificar oportunidades para intercambiar calor entre corrientes y evitar pérdidas energéticas. También considera el diseño óptimo de redes de intercambiadores de calor.

Evaluación económica de procesos.- Esto tiene como objetivo analizar la viabilidad financiera de un proceso industrial, considerando todos los costos e ingresos asociados a su diseño, construcción y operación.

Esta evaluación incluye aspectos como: Inversión inicial (equipos, instalaciones, etc.). Costos de operación (materias primas, energía, mantenimiento, personal). Ingresos por venta de productos. Análisis de rentabilidad (valor presente neto, tasa interna de retorno, periodo de recuperación).

El propósito es determinar si el proceso es económicamente rentable, compararlo con alternativas y tomar decisiones informadas que combinen eficiencia técnica con sostenibilidad económica.

Optimización de procesos. Se enfoca en encontrar las mejores condiciones de operación o diseño de un proceso industrial para maximizar o minimizar una función objetivo, como puede ser la producción, eficiencia, rentabilidad, consumo de energía o impacto ambiental.

Este estudio utiliza herramientas matemáticas y computacionales para: definir variables de decisión (como temperatura, presión, caudales). Establecer restricciones técnicas, económicas y ambientales. Aplicar métodos de optimización (lineal, no lineal, entera, entre otros). El objetivo es lograr un proceso más eficiente, rentable y sustentable, mejorando su desempeño sin comprometer la calidad ni la seguridad.

El desarrollo de estos apuntes durante un año sabático no solo beneficiará a estudiantes y docentes del Sistema Tecnológico Nacional de México, sino que también fortalecerá la formación de ingenieros químicos preparados para enfrentar los desafíos actuales en el diseño de procesos químicos técnica y económicamente rentables.

Contribución a los objetivos educativos

La materia Síntesis y Optimización de Procesos contribuye al cumplimiento de los objetivos educativos del programa de Ingeniería Química al desarrollar en los estudiantes:

1. Capacidad para aplicar conocimientos de ingeniería química en el análisis, diseño y optimización de procesos térmicos y de separación de fases.
2. Habilidades para resolver problemas complejos de ingeniería, integrando principios de termodinámica, transferencia de masa y energía en la operación de equipos industriales.
3. Competencias en el uso de herramientas tecnológicas y software de simulación para evaluar el desempeño de sistemas de redes de intercambio de calor, modelación de procesos, así como programación lineal y dinámica.

4. Conciencia de la importancia de la sustentabilidad y la eficiencia energética, promoviendo el uso racional de recursos en la industria química.
5. Habilidades para la comunicación técnica y el trabajo en equipo, esenciales para la integración en el sector industrial y de investigación.

Contribución al perfil de egreso del programa educativo

La asignatura refuerza competencias clave del perfil de egreso del ingeniero químico egresado del Instituto Tecnológico de Los Mochis, permitiendo que los estudiantes:

- Diseñen y operen procesos industriales de separación térmica con base en principios científicos y tecnológicos.
- Seleccionen y optimicen equipos de transferencia de calor e integración de energía para mejorar la eficiencia energética y generar ganancias al empresario.
- Apliquen criterios de sustentabilidad y normativas ambientales en el desarrollo y mejora de procesos químicos.
- Utilicen modelos matemáticos y herramientas computacionales para el análisis y simulación de procesos de intercambio de calor y procesos generales de producción.
- Desarrollen habilidades de aprendizaje autónomo y actualización continua, necesarias para enfrentar los retos de la industria química en un entorno globalizado.

En conclusión, el desarrollo de estos apuntes durante este periodo fortalecerá la formación académica y profesional de los estudiantes de Ingeniería Química del Instituto Tecnológico de Los Mochis, alineándose con los objetivos del programa educativo y contribuyendo a la preparación de egresados altamente competentes en la operación y optimización de procesos.

DESARROLLO

En el campo de la Ingeniería Química, los diseños de procesos de producción desempeñan un papel fundamental en la operación y optimización de sistemas industriales destinados a la producción de bienes y materiales esenciales. La asignatura Síntesis y Optimización de Procesos es clave dentro del plan de estudios, ya que permite a los estudiantes desarrollar habilidades para la selección y aplicación de tecnologías avanzadas de síntesis de rutas de reacción, considerando criterios de eficiencia, sostenibilidad y viabilidad técnica y económica.

Su pertinencia radica en que estos procesos son transversales a diversas industrias, como la petroquímica, farmacéutica, alimentaria, energética y ambiental entre otras, lo que brinda a los futuros ingenieros químicos del Instituto Tecnológico de Los Mochis una formación sólida y aplicable a escenarios reales. A través de la comprensión de temas tales como síntesis y análisis de procesos, integración de energía, evaluación económica de procesos y principios de optimización, los alumnos adquieren competencias esenciales para la resolución de problemas en entornos industriales altamente dinámicos.

La realización de apuntes facilita la comprensión y retención del contenido. Al realizar apuntes se procesa activamente la información, lo que mejora su comprensión y retención del mismo. Aunque los libros de texto son útiles, a menudo no incluyen todos los pasos necesarios para resolver problemas, lo que puede dificultar su comprensión. Por eso, tener apuntes detallados que expliquen cada paso de manera clara es muy beneficioso para los estudiantes. Estos apuntes llenan los vacíos dejados por los libros y proporcionan una guía práctica para entender y resolver los problemas de la materia.

Estos apuntes han sido elaborados con el objetivo de fortalecer el proceso enseñanza-aprendizaje, ofreciendo una estructura clara y metodológicamente eficaz para complementar la labor docente. Se integran enfoques didácticos innovadores, como el aprendizaje basado en problemas, el análisis de casos industriales y la experimentación en laboratorio, lo que facilita la conexión entre la teoría y la práctica. Asimismo, se promueve el desarrollo del pensamiento crítico, la capacidad analítica y la toma de decisiones fundamentadas en principios científicos y tecnológicos.

En este contexto, la asignatura Síntesis y Optimización de Procesos no solo constituye un pilar del conocimiento en la disciplina, sino que también aporta al desarrollo integral de los estudiantes, dotándolos de habilidades que potenciarán su desempeño profesional. Se espera que estos apuntes sirvan como un recurso valioso para consolidar sus conocimientos y estimular su interés en el aprendizaje continuo, con miras a convertirse en profesionistas de alto nivel egresados del Instituto Tecnológico de Los Mochis.

El diseño de este material se ha hecho en función de los muchos años de experiencia que el titular de la materia tiene tanto en la práctica docente como en la vida profesional dentro de la industria y la investigación. Se ha procurado incluir temas selectos dentro de la carta descriptiva de la materia y también se han incorporado herramientas tecnológicas diversas de Office como: Word, Power Point, Canva y algunas otras estrategias didácticas para facilitar el entendimiento de los temas que incluye la carta descriptiva.

Este material está diseñado para complementar las clases impartidas en la carrera de Ingeniería Química, proporcionando una base sólida para el análisis y diseño de procesos industriales, así como la evaluación técnica y económica de los mismos. Se invita a los alumnos a utilizar estos apuntes como una herramienta de apoyo en su formación, contribuyendo a su desarrollo profesional y académico.

Unidad I. Síntesis y análisis de procesos

1.1. Selección de rutas de reacción

Generalidades

La selección de rutas de reacción es un paso crítico en la síntesis y optimización de procesos químicos, ya que determina la vía más eficiente, segura, económica y sostenible para producir un producto deseado a partir de materias primas disponibles. Esta elección influye directamente en la viabilidad técnica, económica y ambiental del proceso.

Una buena consecución de datos sobre rutas químicas puede llevarnos a una ruta de reacción económicamente óptima. Estos datos deberán acompañar siempre a la reacción química y deberán ser obtenidos de publicaciones confiables o de pruebas a nivel laboratorio. Cabe hacer notar las dificultades implícitas de pasar de escala laboratorio a escala industrial.

La selección de rutas de reacción implica evaluar múltiples criterios dentro de los que destacan:

- Disponibilidad y costo de materias primas.
- Rendimiento y selectividad de cada reacción.
- Condiciones de operación (temperatura, presión, catalizadores).
- Impacto ambiental y generación de subproductos.
- Seguridad del proceso.
- Requerimientos energéticos.
- Facilidad de separación y purificación.
- Número de reacciones que se llevan a cabo
- Características del producto deseado
- Procedimiento seguido en el laboratorio o en la planta piloto incluyendo purificación del producto, etcétera.
- Técnicas de síntesis de procesos.

Son las técnicas que se utilizan al momento de idear o diseñar un proceso y constan de una serie de pasos para lograr completar el método de una forma concisa y correcta. Aquí se conjunta una serie de conocimientos basados tanto en la experiencia del ingeniero químico como en soluciones algorítmicas para lograr un proceso ideal.

Descomposición

La técnica de descomposición o la descomposición jerárquica de Douglas, propone descomponer un problema grande y complejo en un numero pequeño de problemas simples para manejarlo más fácilmente; este método varios niveles:

Discontinuo vs continuo. Se opta por un proceso discontinuo cuando, el proceso debe operar en pocos meses. El producto a obtener solo requiere unos cuantos días de la operación de la planta por año, hay poca información para el diseño y el proceso es bastante sensible, el producto es de vida corta y el valor del producto es considerablemente mayor al costo de manufactura.

Estructura de entrada-salida del proceso. Se considera el número de corrientes materias primas y productos, así como su interacción global. También se tiene en cuenta los subproductos e inertes (la forma en que intervienen y el modo de recuperación o eliminación)

Estructura del reciclo y sistema de reactores. La recuperación y o eliminación de componentes lleva a considerar la existencia de corrientes de recirculación y de purga.

Especificación del sistema de separación. Generalmente las materias primas se recirculan al equipo en operación, los productos se recuperan y los subproductos se eliminan o recuperan en función de su cantidad e importancia. La selección de equipamiento implica la realización de evaluaciones económicas y de un buen conocimiento del proceso.

Heurística

En palabras concisas es el conjunto de conocimientos acumulados y puestos en práctica por el ingeniero químico de diseño para la obtención de una nueva ruta de reacción. En este sentido pueden considerarse como reglas o procedimientos propuestas nacidos de la “expertis” de las personas. Podemos entender entonces a la Síntesis Heurística como una técnica basada en buscar la solución a un problema por medio de suposiciones posibles pero falibles, basadas en la experiencia.

Heurísticas generales y de línea

- Siempre generar más que un método o secuencia alternativa de separación.
- Al desarrollar una línea de flujo, seleccione el esquema de separación antes de ajustar temperaturas o proporciones de flujo.

- No introduzca productos más puros de los que requirió.
- No mezcle parcialmente los vapores separados.
- Propicie métodos de separación conocidos en la compañía.
- Seleccione métodos que impliquen mínimas reacciones químicas para evitar o reducir el manejo y almacenaje de productos químicos peligrosos.
- Elimine los inertes antes de la reacción cuando el catalizador se pueda ver afectado por estos o bien cuando la separación es más fácil sin éste. No purgue especies valiosas o que son tóxicas y arriesgadas, incluso en concentraciones pequeñas.
- Agregue separaciones para recuperar las especies valiosas. Agregue reactores para eliminar, si es posible, especies tóxicas, y arriesgadas.

Heurísticas de diseño

- Si la masa del agente de separación es usada, remuévala tempranamente y no use masa de agente de separación para recobrar este.
- Utilice procesos que solo tienen uno y no dos agentes de separación.
- Evite excursiones en temperatura y presión.
- Utilice el método más barato.
- Remuévalos inmediatamente si están presentes.

Heurísticas de componente y composición

- Remueva compuestos corrosivos, peligrosos e inestables primero.
- Hacer la separación más difícil hasta el final.
- Remueva el componente más abundante.
- Si las composiciones de los componentes son similares propicie una alimentación 50/50.
- En sistemas inorgánicos remover el agua.

Heurísticas de separación específicas

- Propicie destilación a menos que la volatilidad sea menor que la volatilidad crítica.
- En destilación remueva productos como destilados.
- Si el producto es vendido como un sólido el último paso de purificación debe ser cristalización.

- Considere ósmosis inversa para la preconcentración de la alimentación acuosa en un proceso híbrido.
- Considere desplazamiento por adsorción cuando el factor de separación de adsorción es mayor que 2 y el factor de separación de destilación es menor que 1.2.

Optimización

La optimización es una técnica donde continuamente se busca obtener los mayores beneficios empleando en ello la menor cantidad de recursos posibles para cumplir con ciertos objetivos de forma satisfactoria. En la ingeniería se llegan a encontrar problemas de optimización, tratando siempre de reducir los costos de producción, materiales, mano de obra, etc.

El proceso de optimización actualmente, y en el pasado, se hace simplemente mediante “prueba y error”. Aunque, este proceso puede llegar a hacerse en forma mucho más eficiente y económica si se apoya en métodos numéricos y simulaciones por computadora. En los últimos años han cobrado un auge los algoritmos evolutivos, que se han aplicado en problemas de optimización.

Optimización Directa.

Es una técnica analítica para la solución de problemas de programación lineal capaz de resolver modelos muy complejos. El objetivo de esta técnica es identificar el intervalo de incertidumbre que comprenda al punto de solución óptima.

Es una técnica importante ya que puede tratar el problema de asignación de recursos limitados entre actividades, así como para otros problemas que tengan un planteamiento matemática semejante.

Los algoritmos de optimización directa son funciones objetivas para los que no se pueden calcular derivados. Los métodos de búsqueda directa también suelen denominarse “búsqueda de patrones” ya que pueden navegar por el espacio de búsqueda usando forma o decisiones geométricas, por ejemplo, patrones.

Los ejemplos de algoritmos de búsqueda directa son:

2. Búsqueda de coordenadas cíclicas.
3. El método de Powell.
4. El método Hooke-Jeeves.

5. La búsqueda de Nelder-Mead Simplex.

Evolutiva

Las estrategias evolutivas son técnicas heurísticas que están basadas en una población de individuos, y utilizan operadores de recombinación, mutación y selección de búsqueda de la mejor solución en variables reales. El algoritmo general de una estrategia evolutiva es el siguiente:

- **Recombinación:** se recombinan las variables de control y variables objetivo.
- **Mutación:** primero deben mutarse las variables de control, y luego las variables objetivo.
- **Evaluación:** calcular la aptitud.
- **Selección:** seleccionar los individuos que pasan a la siguiente generación.
- Se pueden realizar modificaciones al algoritmo, criterios de paro adicionales al número de máximo de generaciones, basados en estancamiento y convergencia de la solución.

Herramientas y metodologías utilizadas.

- **Análisis retrosintético:** Parte del producto final para identificar posibles precursores.
- **Redes de reacción:** Se crean diagramas que muestran diferentes rutas posibles.
- **Cálculos de eficiencia atómica y económica.**
- **Simulación de procesos:** Para comparar rendimiento y consumo energético (por ejemplo, en Aspen Plus).
- **Criterios de sustentabilidad** (evaluaciones LCA - Life Cycle Assessment).

1.2. Desarrollo de diagramas de flujo

En el ámbito de la ingeniería química, la comprensión y dominio de las herramientas de representación gráfica de procesos son fundamentales para el diseño, análisis y optimización de sistemas productivos. Entre estas herramientas, los diagramas de flujo (ya sean de bloques, de procesos o de tuberías e instrumentación) destacan por su utilidad en la síntesis y optimización de procesos químicos. Estos diagramas no solo permiten representar de manera visual la secuencia de operaciones unitarias, equipos y flujos involucrados en un proceso, sino que también sirven como base para estudios de viabilidad técnica y económica, simulaciones computacionales y la toma de decisiones estratégicas en diseño de plantas.

Tipos de diagramas de flujo y su importancia en ingeniería química

En general, existen tres niveles fundamentales de diagramas de flujo:

Diagrama de flujo de bloques (DFB): Representa de forma simple y esquemática las etapas generales de un proceso sin entrar en detalles de equipos o condiciones operativas. Es útil en etapas tempranas del diseño conceptual, facilitando la visualización general del proceso.

Diagrama de flujo de procesos (DFP): Incluye información sobre las corrientes de materia y energía, equipos principales, condiciones de operación (temperatura, presión, caudal), balances de masa y energía, y ubicación de equipos en una secuencia lógica. Es esencial para los estudios de síntesis de procesos, pues permite identificar rutas de producción viables y optimizables.

Diagrama de tuberías e instrumentación (DTI): Contiene el mayor nivel de detalle. Se especifican todos los equipos, instrumentos, válvulas, tuberías y controles asociados. Aunque se emplea principalmente en etapas finales del diseño de planta, también permite analizar la factibilidad operativa y las estrategias de control.

Estos diagramas son herramientas fundamentales para lograr una integración coherente entre las etapas de producción, asegurando que los recursos se utilicen de manera eficiente y segura.

Diagramas de flujo en la síntesis de procesos

La síntesis de procesos es la etapa del diseño en la que se determina qué operaciones unitarias y secuencias se utilizarán para convertir materias primas en productos deseados, cumpliendo

criterios de eficiencia, seguridad y sostenibilidad. El desarrollo del diagrama de flujo en esta fase cumple múltiples propósitos:

- Permite comparar diferentes alternativas de rutas químicas y tecnológicas, facilitando la selección de las más prometedoras.
- Ayuda a visualizar la interconexión entre reactores, separadores, intercambiadores de calor y unidades de tratamiento.
- Posibilita la identificación de cuellos de botella, puntos de reciclaje o integración térmica, elementos claves para lograr eficiencia energética.
- Sirve de base para el modelado y simulación de procesos mediante software como Aspen Plus, HYSYS o ProSim.

De esta forma, el diagrama de flujo deja de ser solo una representación gráfica para convertirse en una herramienta de decisión técnica.

Optimización de procesos mediante el uso de diagramas de flujo

En la etapa de optimización de procesos, los diagramas de flujo desempeñan un papel esencial al proporcionar un modelo estructurado sobre el cual se pueden aplicar criterios matemáticos, económicos y ambientales. La optimización puede tener diversos objetivos:

- Minimizar costos de operación o inversión.
- Maximizar la producción o la calidad del producto.
- Minimizar el impacto ambiental o el consumo energético.
- Un diagrama de flujo bien desarrollado permite realizar análisis como:
- Análisis de sensibilidad y simulaciones paramétricas, para evaluar cómo cambios en variables clave afectan el rendimiento del sistema.
- Estudios de integración energética, utilizando herramientas como el análisis pinch (pinch analysis).
- Evaluación de alternativas tecnológicas, como el uso de reactores catalíticos versus convencionales, o técnicas avanzadas de separación (membranas, extracción supercrítica, etc.).

Información a contener

1. Balance de masa

- Las características de las corrientes de alimentación, intermedias, reciclados y productos acabados se resumen en una tabla ubicada en la zona inferior del plano.
- La tabla contiene parte de los datos de proceso generados por el simulador de procesos.

2. Número de la corriente

- Descripción de la corriente (ej. crudo de alimentación).
- Flujo másico y/o flujo volumétrico.
- Temperatura de operación.
- Presión de operación.
- Densidad o gravedad específica.
- Viscosidad absoluta.

3. Estado físico

- Los datos de la tabla pueden variar de acuerdo al tipo de proceso. Es facultad del Ingeniero de Proceso, previa aprobación del Gerente del Proyecto, añadir o eliminar datos a fin de suministrar la información más relevante para el proceso que se está diseñando.
- Los componentes de las corrientes en forma porcentual y otras propiedades, generalmente se presentan en el documento “Balance de masa y energía y sumario de propiedades de las corrientes”.

4. Equipos de proceso

- Cada equipo debe tener los siguientes datos: código de identificación, nombre del equipo y características de operación normal.
- Los equipos de respaldo ó en paralelo no son mostrados. Sin embargo, la presencia de estos renglones es indicados por el número del equipo, por ejemplo, P-201 A/B/C.

5. Líneas de proceso

- Cada línea de proceso desde y hacia los equipos se identifica con un número dentro de un rombo para referirlo a los balances de masa y energía.
- La identificación de las corrientes de proceso en los DFP debe realizarse siguiendo los criterios siguientes:
- Numerar las corrientes principales y los ramales.
- Numerar una sola de las corrientes paralelas o trenes idénticos.

- Asignar los números a las corrientes de proceso en orden creciente de acuerdo al recorrido del flujo principal a través de la unidad de proceso.
- Cambiar la numeración de la corriente cuando hay cambios de condiciones: presión, temperatura o flujo, en la misma.
- Identificar como número uno (1) la corriente de alimentación principal, continuando la secuencia numérica a lo largo de la unidad de proceso y finalizar con los productos, aun cuando exista más de un (1) plano y continuar numerando los ramales en forma similar.
- Identificar cada una de las corrientes de proceso inmediatas a cada uno de los equipos; a manera de facilitar la especificación de los mismos.
- En los DFP no se debe mostrar el diámetro, numeración y material de las líneas.

6. Control básico del proceso

- El DFP muestra el esquema de control considerado para una operación segura y eficiente de la planta. De acuerdo a esto se debe indicar en forma simplificada los lazos de control requeridos, y si el alcance de trabajo así lo requiere, la ubicación de las principales válvulas de alivio.
- El esquema de control del proceso no pretende reflejar la instrumentación final de la planta, por lo tanto, no deberá indicar el tipo de transmisión de señal (neumática o electrónica), ni la ubicación de control será en campo, panel o si forma parte de un sistema computarizado.

Diagrama de balance de servicios industriales

Este diagrama indica los servicios necesarios para el funcionamiento de la planta. Muestra el balance de masa, si es necesario, para más de un caso: arranque, operación normal, producción máxima y parada.

Un diagrama por separado debe ser preparado para cada servicio. Los diagramas de balance típicamente se hacen para los siguientes sistemas:

- Sistema de generación de vapor y condensado.
- Tratamiento de agua de caldera y químicos.
- Agua de enfriamiento.
- Sistema de refrigeración.

- Sistemas de aceite de sello y lubricante.
- Compresores y secadores de aire de la planta y de instrumentos.
- Generación de potencia principal y auxiliar.
- Generadores de gas inerte.
- Sistemas contra incendio.
- Sistema de aceite caliente.

Diagrama de sistemas de efluentes

Este diagrama muestra todos los efluentes (líquidos, gases y sólidos) y su tratamiento para garantizar la calidad ambiental. Los diagramas que se preparan son:

- Distribución de efluentes y tratamiento.
- Sistema de alivios y mechorrios o antorchas para gases de escape.
- Diagrama de tubería e instrumentación.

El Diagrama de Tubería e Instrumentación muestra el proceso principal con los detalles mecánicos de equipos, tuberías y válvulas, así como también los lazos de control para garantizar una operación segura en la planta. Esta información sirve de guía para llevar a cabo las actividades de Ingeniería y construcción de la planta, por lo cual su preparación requiere de un alto grado de precisión y una completa información.

Información a contener

Equipos

Todos los equipos de proceso, incluyendo equipos de respaldo, con el mismo detalle que los equipos principales.

Cada equipo con los siguientes datos: identificación, nombre, características de diseño, espesor y tipo de aislamiento. Las unidades de medición deberán ser consistentes con las utilizadas en los DFP y en las hojas de especificación de equipos. A continuación, se muestra la información básica a reportar:

Reactores:

- Identificación.
- Nombre.

- Diámetro interno y longitud.
- Presión y temperatura de diseño.
- Lechos de catalizador.
- Materiales de construcción.
- Requerimientos de aislamiento.

Columnas o Torres/ separadores o acumuladores

- Identificación
- Nombre.
- Diámetro interno y longitud tangente/tangente.
- Presión y temperatura de diseño.
- Platos (número, tipo, espacio entre platos).
- Empaques (Altura o profundidad, tamaño, tipo/suplidor y material).
- Materiales de construcción.
- Boquillas de los puntos de alimentación y productos, de instrumentos de control, venteos, drenajes, etc.
- Elevación desde el nivel de piso hasta la línea tangente del fondo de la columna y altura relativa respecto a termosifones.
- Requerimientos de aislamientos.
- Niveles de operación de líquido (normal, bajo y alto).

Hornos

- Identificación.
- Nombre.
- Diámetro interno y longitud tangente/tangente.
- Presión y temperatura de diseño.
- Materiales de construcción.

Bombas, compresores y ventiladores:

- Identificación.
- Nombre.
- Capacidad de diseño.

- Diferencial de presión.
- Densidad.

Instrumentación y control de proceso

- Cada instrumento con su identificación, símbolo y función en concordancia con las normas
- Se muestra todos los lazos de control en los equipos.
- Válvulas de control y válvulas de desvíos “by-pass” cuando sean requeridas.
- Instrumentos en línea, indicando su tamaño si es diferente al tamaño de la tubería.
- Válvulas de seguridad y de alivio con su respectiva presión de ajuste o disparo y dimensiones.
- Acción de las válvulas de control con falla de aire. Se indicará FO: falla abierta; FC: falla cerrada.
- Función y posiciones de selectores o conmutadores.
- Identificación de funciones en instrumentos especiales.
- Representación de interconexión neumática y eléctrica.
- Puntos de conexiones a la computadora o registrador de datos.

Plano de Planta (Plot Plan)

El plano de planta comúnmente llamado “PLOT PLAN” es un documento en donde se muestra la distribución y espaciamiento de las instalaciones y los equipos, para seguridad de la operación, acceso a los equipos para mantenimiento, así como una efectiva protección contra incendios. Se preparan tomando en cuenta también aspectos meteorológicos y económicos. En este diagrama se muestra el reparto del área de terreno para la distribución de los equipos. Generalmente se presenta el plano de planta general y el plano de distribución de los equipos.

1.3. Selección de procesos de separación

Una vez definida la ruta de síntesis química y los reactores necesarios, el siguiente paso clave en el diseño de un proceso industrial es la separación de productos y subproductos. La eficiencia y viabilidad económica de la planta dependen en gran medida de elegir la técnica de separación más adecuada para cada corriente.

La selección de procesos de separación es un paso crucial que conecta la síntesis química con la operación industrial eficiente. Un enfoque sistemático—que combine propiedades termodinámicas, criterios económicos y pruebas experimentales—garantiza que el proceso resultante sea rentable, seguro y respetuoso con el medio ambiente. La correcta elección de la técnica de separación impacta directamente en la productividad, calidad del producto y sostenibilidad de la planta química.

Clasificación general de los procesos de separación	
Basados en diferencias de volatilidad	• Destilación simple o fraccionada. • Evaporación / destilación al vacío.
Basados en solubilidad o afinidad	• Extracción líquido – líquido. • Extracción sólido – líquido. • Absorción química o física.
Basados en tamaño de partículas o fase	• Filtración. • Centrifugación. • Sedimentación.
Basados en transporte selectivo de especies	• Ósmosis inversa y ultrafiltración (membranas). • Permeación de gases.
Basados en cambios de fase / cristalización	• Cristalización fraccionada. • Criocondensación / criogenia.

Criterios de selección

Al elegir la técnica de separación, el ingeniero debe considerar simultáneamente:

- Naturaleza de la mezcla
- Fases presentes (gas, líquido, sólido)
- Diferencias de volatilidad (coeficiente de reflujo, presión crítica)
- Afinidades químicas y coeficiente de reparto
- Pureza requerida
- Especificaciones del producto final
- Cantidad tolerable de impurezas
- Condiciones de operación
- Temperatura y presión del proceso
- Sensibilidad térmica o química de los componentes
- Rendimiento y recuperación
- Fracción molar o masa recuperada
- Pérdidas aceptables
- Costos de capital y operación (CapEx y OpEx)
- Inversión en equipos (torres, membranas, columnas)
- Energía y utilidades (vapor, refrigerantes, solventes)
- Mantenimiento y reemplazo de medios (tamices, membranas)
- Factores ambientales y de seguridad
- Emisión de contaminantes
- Manejo de solventes o sustancias peligrosas
- Riesgos de alta presión o temperatura
- Escalabilidad y flexibilidad
- Facilidad de ampliación de capacidad

Implica seleccionar reacciones químicas adecuadas, sino también integrar inteligentemente cada etapa del proceso para maximizar el rendimiento, minimizar los costos y reducir el impacto ambiental. La **selección de rutas de reacción** es el primer paso crítico, donde se evalúan múltiples alternativas para transformar materias primas en productos deseados. Esta decisión no se basa únicamente en la viabilidad química, sino también en factores como la

disponibilidad de reactivos, la generación de subproductos, la eficiencia energética y la seguridad del proceso. Elegir la ruta adecuada puede determinar el éxito económico y técnico de una planta industrial. En este sentido, el ingeniero químico actúa como un estratega, balanceando múltiples variables para encontrar el camino óptimo.

Una vez definida la ruta de reacción, el **desarrollo de diagramas de flujo** permite visualizar y estructurar el proceso completo. Estos diagramas son herramientas esenciales para comunicar ideas, identificar oportunidades de mejora y garantizar que todos los elementos del sistema estén correctamente integrados. Desde los diagramas de bloques hasta los P&ID, cada nivel de detalle cumple una función específica en el diseño, operación y control del proceso. Además, estos diagramas facilitan la colaboración interdisciplinaria, permitiendo que ingenieros de distintas áreas trabajen en conjunto para optimizar el sistema.

Finalmente, la **selección de procesos de separación** es clave para obtener productos con la pureza requerida, recuperar materiales valiosos y tratar residuos de forma responsable. Las operaciones de separación suelen representar una gran parte del consumo energético en una planta, por lo que su elección debe ser cuidadosa y estratégica. Métodos como la destilación, la extracción, la adsorción o el uso de membranas deben evaluarse en función de la naturaleza de la mezcla, los requisitos de calidad y los costos operativos. Una separación mal diseñada puede comprometer todo el proceso, mientras que una bien seleccionada puede mejorar significativamente la eficiencia global.

En conjunto, estos tres pilares forman una estructura sólida para el diseño de procesos industriales. La capacidad de sintetizar y analizar procesos no solo requiere conocimientos técnicos, sino también pensamiento crítico, creatividad y visión sistémica. En un mundo que demanda soluciones sostenibles y competitivas, dominar estas herramientas permite a los profesionales enfrentar desafíos complejos con inteligencia y responsabilidad. Así, la síntesis y el análisis de procesos no son simplemente una etapa del diseño: son una filosofía de trabajo que impulsa la innovación y la excelencia en la ingeniería.

Complementos educativos

Ejercicios prácticos (Excel)

[UNIDAD I. SÍNTESIS Y ANÁLISIS DE PROCESOS. EJERCICIO PRÁCTICO.xlsx](#)

Estudio de casos, aprendizaje basado en problemas (AutoCAD)

[UNIDAD I. SÍNTESIS Y ANÁLISIS DE PROCESOS. ESTUDIO DE CASO.zip](#)

Presentación (PowerPoint)

[UNIDAD I. SÍNTESIS Y ANÁLISIS DE PROCESOS.pptx](#)

Unidad II. Integración de energía

En la actualidad, la mayor parte de los procesos industriales involucran la transferencia de calor ya sea de una corriente de procesos o de una corriente de servicio auxiliar a una corriente de proceso. Las crisis energéticas en el mundo han llevado a buscar en cualquier proceso industrial recuperar al máximo el calor dentro de los procesos y a la minimización de la recuperación de calor dentro del mismo proceso y a la minimización de servicios auxiliares.

El aumento del costo de la energía y una conciencia cada vez mayor puesta al cuidado del medio ambiente y a la sustentabilidad, llevan a las industrias a aplicar métodos eficientes para reducir el consumo de energía en las operaciones. Muchos algoritmos han sido desarrollados con el objetivo de disminuir los consumos de servicios auxiliares dentro de una línea de procesos productivos. Los costos energéticos representan una parte elevada en presupuestos globales de producción en diferentes industrias. Estas enfrentan gran competitividad dentro del mercado.

Uno de los métodos que se encuentran dentro de los algoritmos desarrollados, es la denominada integración energética, la cual consiste en primera instancia en diseñar redes de intercambio de energía de tal manera que las corrientes del proceso que se desean enfriar lo hagan mediante las corrientes del mismo proceso que deben ser calentadas y viceversa. La integración energética constituye una poderosa herramienta que encierra un procedimiento termodinámico bien estructurado para una optimización técnico-económica de cada red de intercambio de calor. La integración térmica de una planta industrial busca aprovechar cantidades de energía disponibles en algún punto del proceso para abastecerse; por ejemplo, el calor que se retira de las corrientes calientes, se lo puede utilizar para precalentar la alimentación del horno, y de esta manera requerir menor energía calórica.

Se requiere de una red de intercambio de calor apropiado para lograr el objetivo deseado, ya sea la recuperación máxima de energía o de requerimiento mínimo de energía. El diseño de una red de esta naturaleza no es una tarea fácil si se considera el hecho de que la mayoría de

los procesos involucran un gran número de corrientes y de servicios auxiliares. El diseño tradicional ha tenido como resultado redes con costos altos y de servicios auxiliares.

2.1. Significado del acercamiento mínimo de energía

El acercamiento mínimo de energía (o temperatura) en el diseño de redes de intercambio de calor se refiere a la diferencia de temperatura mínima entre los fluidos caliente y frío en un intercambiador de calor. Esta diferencia, a menudo denotada como $\Delta T_{\min}$, es crítica para la eficiencia de la transferencia de calor y la minimización del consumo energético.

El acercamiento mínimo de energía tiene varias implicaciones:

1. Eficiencia del intercambiador

Un acercamiento pequeño ($\Delta T_{\min}$ pequeño) indica una mejor eficiencia en la transferencia de calor, ya que una mayor diferencia de temperatura entre los fluidos impulsa una transferencia más rápida.

2. Reducción del tamaño y costo del intercambiador

Un acercamiento mínimo de energía permite diseñar intercambiadores de calor más pequeños y menos costosos, ya que se necesita una menor área de transferencia de calor para lograr la misma transferencia de calor.

3. Optimización de la integración energética

El acercamiento mínimo de energía es un parámetro clave en la integración energética, donde se busca aprovechar al máximo el calor disponible entre diferentes procesos.

4. Punto de pellizco (pinch point)

En una red de intercambio de calor, el punto de pellizco es el punto donde se alcanza el acercamiento mínimo de energía. Este punto es crítico para la optimización de la red y la identificación de posibles limitaciones en el diseño.

5. Diseño de la red

El acercamiento mínimo de energía influye en el diseño de la red, determinando la disposición de los intercambiadores y la forma en que se conectan.

En resumen, el acercamiento mínimo de energía es un parámetro esencial en el diseño de redes de intercambio de calor, que impacta en la eficiencia, el tamaño y el costo del intercambiador, así como en la optimización de la integración energética.

Corrientes energéticas:

- Corrientes frías: Las que aumentan su energía (la temperatura de salida es mayor que la temperatura de entrada o existe evaporación).
- Corrientes calientes: Las que disminuyen su energía (la temperatura de salida es menor que la temperatura de entrada o existe condensación).
- Utilidades o servicios: Son todos los fluidos adicionales que se utilizan como medio de enfriamiento (agua fresca) o de calentamiento (vapor saturado). En integración energética, el dato más importante de una corriente es su valor energético (entalpía, calor específico, calor latente, etc.).

Variables involucradas:

- El caudal
- La temperatura de entrada y de salida de cada corriente.
- Las composiciones de las corrientes para estimar los calores específicos de las mezclas.

El valor energético (calor) de cada corriente se determina de la siguiente manera:

- Si se trata de calor sensible:

$$Q = m \cdot C_p \cdot (T_{\text{entrada}} - T_{\text{salida}})$$

- Si se trata de calor latente:

$$Q = m \cdot \lambda$$

En corrientes frías ($Q < 0$), se debe suministrar energía para lograr la temperatura de salida (calor absorbido).

En corrientes calientes ($Q > 0$), debe eliminarse calor para alcanzar la temperatura de salida (calor cedido).

El calor neto del sistema es la suma del calor de todas las corrientes: Representa la cantidad de energía adicional que debe suministrarse o eliminarse del sistema para lograr un balance energético.

2.2. Determinación de redes con el método de diagramas de contenido de calor

El método de diagramas de contenido de calor es una técnica que se utiliza en la síntesis de procesos químicos y la determinación de redes de intercambio de calor en sistemas de procesos industriales. Esta técnica se utiliza para identificar y optimizar las corrientes de calor dentro de un sistema de procesos con el objetivo de minimizar el consumo de energía y maximizar la eficiencia.

Masso y Rudd (1969) y Nishida y Lapidus (1977) propusieron el uso de diagramas de contenido de calor como ayuda en la asignación de los intercambios que generan una red de recuperación de energía. Aunque el enfoque es heurístico y no garantiza una solución óptima, proporciona una manera bastante clara de entender la lógica para una buena solución del problema.

Para la realización del diagrama se debe tener en cuenta lo siguiente:

- En el eje vertical se representan las temperaturas de entrada y salida de las corrientes de proceso calientes y frías.
- El origen de la escala de temperatura se ajusta por separado tal que todas las corrientes calientes estén situadas por encima del eje horizontal y todos los flujos fríos por debajo del eje horizontal.
- El eje horizontal representa la magnitud relativa de las tasas de flujo de capacidad calorífica ($\dot{m}C_p$).
- El área de cada bloque se corresponde con el flujo de calor a ser retirado o añadido a la corriente, a fin de que llegue a la temperatura deseada de salida.
- Cada bloque se dibuja de manera que las corrientes calientes se encuentren en un orden decreciente con respecto a la temperatura de entrada, y las corrientes frías se encuentren en un orden decreciente con respecto a la temperatura de salida.

De acuerdo a los puntos anteriores, debe tomarse en cuenta la siguiente regla heurística: Preservando un valor adecuado de $\Delta T_{\min}$, proponer el primer intercambio entre la corriente más caliente a enfriarse y la parte más caliente de cualquier corriente fría a calentarse. Preservar ese orden en los siguientes intercambios hasta donde sea posible.

2.3. Determinación de redes con el método del punto de pliegue

La integración de procesos es un campo en crecimiento en la ingeniería de procesos. El análisis de punto de pliegue es una metodología para el diseño de sistemas de intercambio de calor más eficientes que llevan a un mejor diseño del proceso a través de consideraciones sistemáticas para el mejor consumo de la energía, en la inversión de capital y en la reducción de emisiones.

El método de pinch o método de punto de pliegue fue creado por Linnhoff y Flower. Se deriva de los principios fundamentales de la termodinámica, la primera y segunda ley. El objetivo es obtener una integración térmica, de combinaciones viables, entre las corrientes que deben calentarse con aquellas que deben enfriarse. La primera ley provee los medios para calcular los flujos de calor en los cambiadores de calor. La segunda ley fija la dirección de los flujos de calor, a saber, de las corrientes calientes a las frías, siempre que exista un gradiente de temperaturas suficiente para permitir la transferencia de calor. El punto en las corrientes de la red de cambiadores de calor en donde ocurre el mínimo acercamiento entre las temperaturas de las corrientes calientes y frías es referido como punto pinch. El método predice

1. El mínimo consumo de servicios de vapor para calentamiento y de agua fría para el enfriamiento, además de,
2. El costo mínimo por concepto de unidades de intercambio de calor y el área de transferencia de calor.

Estas predicciones se consideran como objetivos o metas de diseño. Con estos se puede determinar los costos de operación y los costos fijos. La estimación de estos costos se puede hacer sin haber realizado el diseño detallado de la red de intercambio térmico. Esto constituye la mayor ventaja del método Pinch.

El método Pinch para el diseño de redes de cambiadores de calor se efectúa en tres etapas:

1. Etapa de análisis

Se busca determinar la ubicación del punto Pinch y los requerimientos mínimos de servicios de calentamiento y enfriamiento. Con ello se pueden determinar los costos mínimos, tanto de uso de energía como de capital de acuerdo con el área de los cambiadores de calor. Se determina también el número mínimo de cambiadores de calor requeridos.

2. Etapa de síntesis

Se usan reglas heurísticas para proponer encuentros viables entre las corrientes frías y las calientes.

3. Etapa de mejoramiento de la red

Modificación de redes de intercambio, principalmente aquellas con lazos de calor entre varios cambiadores de calor.

Para mejorar la integración térmica de procesos existentes se procede de la siguiente manera:

1. Identificación de las corrientes frías y calientes.
2. Extracción de datos termodinámicos de corrientes de proceso y servicio
3. Selección del valor adecuado para el Δt_{min}
4. Construcción y análisis de la Tabla Problema
5. Construcción de las curvas compuestas y de la gran curva compuesta
6. Rediseño de la Red de Intercambio de Calor

Por requerimientos de diseño debe fijarse un valor mínimo de diferencia entre las temperaturas de las corrientes de entrada y salida en cada extremo de los intercambiadores de calor. Este valor ΔT_{min} al probar varios valores y encontrar el que minimice los costos de operación de la red de intercambiadores de calor y los costos de inversión de los equipos, con el procedimiento de supertargeting que más adelante se describe. En la literatura “Step by Step through the Pinch” de Smith y Patel, se recomiendan valores de Δt_{min} , por ejemplo, para procesos petroquímicos se recomiendan valores en el intervalo de 10 a 30°C mientras

que para procesos criogénicos se recomiendan valores en el intervalo de 3 a 6°C. En cualquier caso, debe administrarse un valor de ΔT_{min} óptimo de acuerdo con las características de las corrientes a integrar térmicamente.

El método Pinch propone tres reglas conocidas como las reglas de oro del análisis Pinch, para alcanzar la meta de mínimo uso de servicios de calentamiento y enfriamiento. Lo cual es equivalente a lograr la máxima integración térmica entre las corrientes de proceso.

- Regla 1. A través del Pinch no debe transferirse calor.
- Arriba del Pinch no debe usarse servicios de enfriamiento.
- Abajo del Pinch no debe usarse servicios de calentamiento.

La violación a alguna de ellas dará como resultado un requerimiento de energía mayor a la meta mínima.

El algoritmo de la tabla problema

Es un procedimiento para determinar la ubicación del punto Pinch y los valores de las cargas de calentamiento y enfriamiento. Se requieren como datos para cada corriente, caliente y fría, los valores promedio del calor específico (Cp), los flujos másicos (F), las temperaturas requeridas y disponibles y el Δt_{min} . Se supone que los valores de Cp y F son constantes en las temperaturas consideradas. Las etapas del algoritmo se dan a continuación.

1. Ajustar las temperaturas, para convertirlas a temperaturas de intervalos, agregando a todas las temperaturas iniciales y finales, de las corrientes frías y sustrayendo de las calientes el valor $\Delta t_{min}/2$. Ordenar las temperaturas ajustadas desde la mayor hasta la menor, remover de la lista ordenada aquellas temperaturas que se repiten. Cada par de temperaturas de esta lista definen los intervalos de temperaturas del problema. Esto se hace igual que el procedimiento para la construcción de las curvas compuestas.
2. Determinar las corrientes presentes en cada intervalo de temperatura y calcular el balance de calor Q_i^b de cada intervalo. Esto se obtiene sustrayendo la entalpía

requerida para calentar las corrientes frías de la entalpía requerida para enfriar las corrientes calientes, en cada intervalo.

$$Q_i^b = \sum Q_i^{calientes} - \sum Q_i^{frías}$$

$$Q_i^b = \left(\sum_{k=1}^{n_i} FCP_k - \sum_{j=1}^{m_i} FCP_j \right) (T_{sup,i} - T_{inf,i})$$

3. El calor residual o que sale Q_i° que pasa por el efecto de cascada al intervalo siguiente, $i+1$:

$$Q_i^\circ = Q_{i-1}^\circ + Q_i^b$$

En donde los subíndices j y k cuentan sobre las m_i corrientes frías y n_i corrientes calientes en el intervalo i , además $T_{sup,i}$ y $T_{inf,i}$ corresponden a las temperaturas superior e inferior del intervalo.

4. El primer valor de calor residual es $Q_0^\circ = 0$. La forma de registrar los cálculos es en una tabla en la cual la primera columna corresponde al i -ésimo número de intervalo, la segunda corresponde a las temperaturas ajustadas, la tercera a la diferencia de temperaturas de intervalos adyacentes, en la columna siguiente se anotan los calores calculados de calor por intervalos de cada corriente, Q_i^b luego el calor residual de cada intervalo Q_i° .
5. La columna de calor residual Q_i° puede mostrar algunos valores negativos, que representan un déficit de calor. Este déficit puede ser cubierto con el suministro de calor desde servicios externos o aprovechar la cascada de calor y proveer el calor con el excedente de intervalos superiores. No debe haber ningún valor de Q_i° negativo, ya que esto representa una violación a la segunda ley de la termodinámica, al presentarse un flujo de calor de una temperatura menor a otra mayor. Para corregir esto se identifica el intervalo con el valor de Q_i° menor y el absoluto de este valor se asigna al intervalo cero de una nueva columna denominada calor residual ajustado o corregido, que corresponde a una cascada de energía mínima.

$$Q_i^{\circ}(ajustado) = |Q_i^{\circ}(mínimo)|$$

Los valores de los intervalos en las hileras de la primera a la última se calculan de la siguiente manera.

$$Q_i^{\circ}(ajustado) = Q_{i-1}^{\circ}(ajustado) + Q_i^b$$

En algunos procesos no se presentan valores de Q_i° negativos, por lo que no hará necesidad de calcular la columna de calor residual ajustado.

6. El punto o puntos Pinch se ubican en los intervalos que resulten con valores de calor residual ajustado iguales a cero. Estos corresponden con los puntos de máxima aproximación de las curvas compuestas. Las temperaturas en ese punto corresponden a:

$$T_{fría}^{pinch} = T_i^{pinch} - \Delta T_{min}/2$$

$$T_{caliente}^{pinch} = T_i^{pinch} + \Delta T_{min}/2$$

Ha de notarse que, en los problemas de umbral, es decir, aquellos en los que no se requiere uno de los servicios de calentamiento o de enfriamiento, no hay valores negativos en la columna de valores de calor de cascada, por lo que no se requiere determinar los valores de cascada ajustados.

7. El algoritmo concluye definiendo las cargas térmicas de calentamiento requerido que corresponde al valor de $Q_i^{\circ}(ajustado)$ de la primera fila de la columna de cascada de energía mínima y el enfriamiento requerido que corresponde al calor residual ajustado de la última fila, $Q_n^{\circ}(ajustado)$. Como se había mencionado, en las curvas compuestas, el servicio de calentamiento, si se requiere, debe ubicarse en la región de más alta temperatura (primer intervalo de la tabla problema) mientras que el enfriamiento debe ubicarse en las temperaturas más bajas (último intervalo de la tabla problema).

El efecto de la cascada de calor que se propaga de las temperaturas altas a las temperaturas bajas se ilustra mejor con un dibujo de cajas conectadas en serie por flechas en dirección de

arriba hacia abajo. En el interior de las cajas se indica el resultado del balance de calor en cada intervalo de temperaturas, a la izquierda de las flechas se indican las temperaturas de los intervalos y a la derecha se muestran los calores residuales normal y ajustado, $Q_i^{\circ}(ajustado)$.

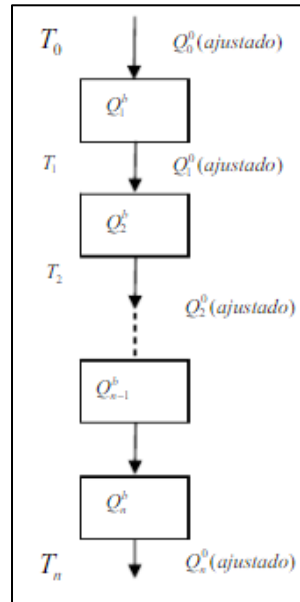


Figura. 1 Cascada de calor en los intervalos de temperaturas.

El valor $Q_i^{\circ}(ajustado)$ de salida de cualquier caja (intervalo de temperatura), es la suma del calor que entra a la caja más el calor en la caja. Cuando se identifican valores negativos de Q_i° se ajustan los valores como se indican en la imagen anterior. Así, calentamiento mínimo requerido = $Q_{cal}(min) = Q^{\circ}(ajustado)$ y el enfriamiento mínimo requerido = $Q_{enf}(min) = Q_n^{\circ}(ajustado)$.

La diferencia de las entalpías de los servicios siempre debe ser igual a la diferencia total de las entalpías de las corrientes calientes y frías. Este valor debe corroborarse como el valor de Q° del +ultimo intervalo, de la cascada no ajustada.

El procedimiento de Supertargeting

La integración de procesos es un campo en crecimiento en la ingeniería de procesos. El análisis de punto de pliegue es una metodología para el diseño de sistemas de intercambio de calor más eficientes que llevan a un mejor diseño del proceso a través de consideraciones sistemáticas para el mejor consumo de la energía, en la inversión de capital y en la reducción de emisiones. La tecnología ha evolucionado para obtener los costos de capital previos al diseño, la cual recibe el nombre de Supertargeting. El objetivo del trabajo es diseñar una red de intercambio de calor de un proceso utilizando la metodología Supertargeting. Para poder seleccionar una red de intercambio de calor se requieren diferentes criterios, los cuales son especificados por las necesidades del diseño y por la flexibilidad de cada diseño. Se analizan diferentes criterios de selección y se propone uno. El uso de la metodología de punto de pliegue da un acercamiento al desarrollo de redes de intercambio de calor óptimas. La metodología es muy efectiva dado que permite utilizar en su valor mínimo los servicios auxiliares manteniendo un área mínima de intercambio de calor. Conjuntamente, proporciona una gran variedad de redes de intercambio de calor y una gran flexibilidad en el diseño de las redes, con lo que da la posibilidad de poder escoger de los diferentes diseños cuál es el óptimo para la planta que se está armando.

En los procedimientos del análisis Pinch con las curvas compuestas y la Tabla Problema, en ambos métodos se determina la ubicación del punto Pinch, es decir las temperaturas del Pinch y los valores de energía, mínimas requeridas, para el calentamiento y el enfriamiento. Estos son conocidos como metas del método Pinch o Targeting en inglés. Parte del análisis Pinch trata con la determinación del número mínimo de cambiadores de calor y el área mínima requerida en los cambiadores de calor, sin haber hecho el diseño de la red de cambiadores de calor. También se mencionó que el valor de ΔT_{min} es una especificación de diseño que se toma como una restricción para el aparcamiento de los cambiadores de calor en la red. Pues bien, se puede determinar un valor óptimo del ΔT_{min} usando las curvas compuestas, el procedimiento para obtenerlo se conoce como Supertargeting y se describe a continuación. La idea es probar diferentes valores de ΔT_{min} y calcular los costos anualizados de la red, se grafican los costos contra el ΔT_{min} y el valor en el que se tengan los costos mínimos se determina el valor óptimo de ΔT_{min} como en la gráfica siguiente

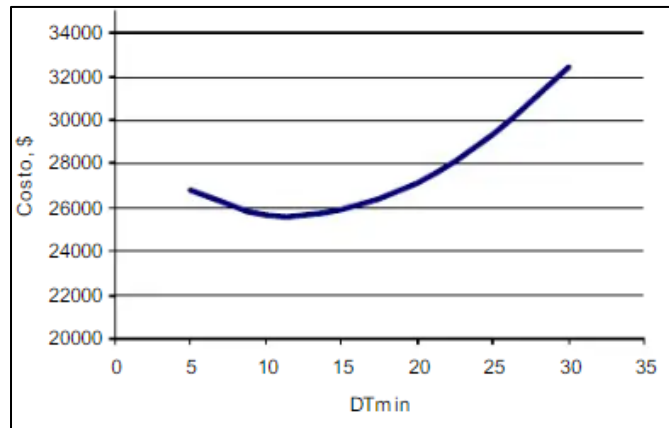


Figura. 2 Determinación del ΔT_{min} óptimo.

Un valor aproximado del área de los cambiadores de calor se puede determinar con las curvas compuestas cuando se divide en varias regiones el área de traslape de las curvas calientes y frías, como las regiones de la figura que se presenta a continuación.

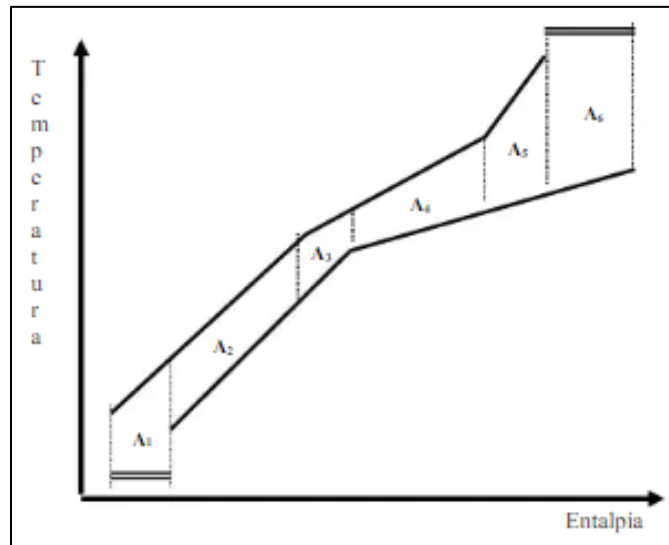


Figura. 3 Segmentos de área entre las curvas compuestas.

Nótese que las regiones de las áreas quedan definidas por intervalos de entalpías. Cada intervalo de entalpía comienza y finaliza en los puntos en los que cambia la pendiente de la curva caliente o fría, lo que en general se deberá a que en ese punto comienza o finaliza una corriente.

El área de las regiones se determina con la ecuación:

$$A_i = \frac{1}{\Delta T_{in}(i)} \left[\sum_{j=1}^{No\ de\ corrientes} \frac{Q_j}{h_j} \right]$$

El área A_i de cada región está limitada por las temperaturas extremas, calientes y frías, del intervalo de entalpía j . En cada región participan un cierto número de corrientes calientes y frías, incluyendo los servicios. Cada una intercambia una cantidad de calor Q_j que se incluye en la ecuación anterior, en donde h_j corresponde a los valores de los coeficientes de película de las corrientes, y el valor de ΔT_{in} se determina con la ecuación:

$$\Delta T_{in}(i) = \frac{(T_2 - t_2) - (T_1 - t_1)}{\ln[(T_2 - t_2)/(T_1 - t_1)]}$$

Las temperaturas T_1 y T_2 corresponden a las temperaturas de la corriente caliente y las temperaturas t_1 y t_2 son de la corriente fría. Los valores 1 y 2 se toman en los extremos de las corrientes del segmento considerado en las curvas compuestas, supuestamente deben corresponder a los extremos de un cambiador de calor como se aprecia a continuación

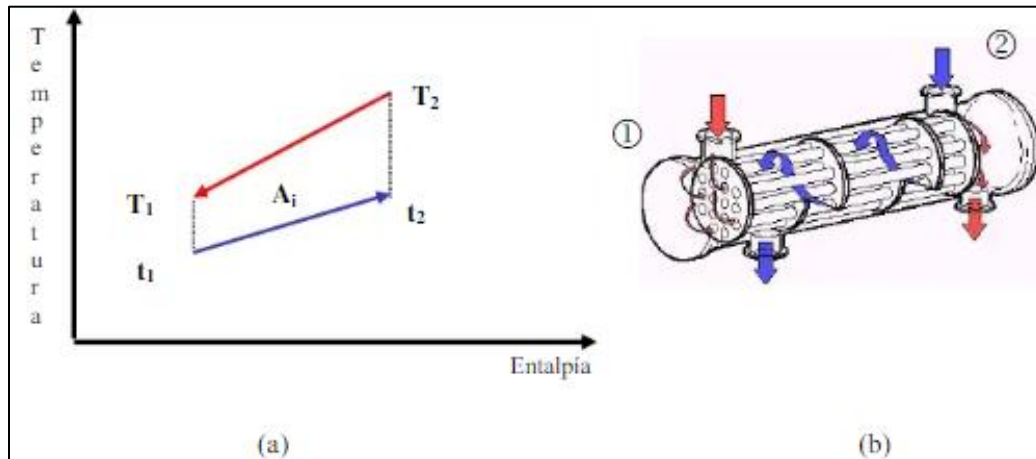


Figura. 4 Temperaturas en los extremos de (a) las curvas compuestas y (b) un cambiador de calor.

El costo de los cambiadores de calor suele determinarse mediante una correlación en función del área de intercambio de calor, A , de la forma siguiente: $Costo = a + b * A^c$. Donde las constantes a , b y c son parámetros de la correlación.

2.4. Predicción de requerimiento de áreas en redes de intercambiadores de calor

Un complemento importante a los requerimientos de energía lo constituye la predicción del área de transferencia de calor que tendrá el diseño de una red. Los principios del método punto de pliegue tienen la virtud de lograr, mediante la cascada de calor, una predicción confiable del consumo mínimo de energía.

El consumo mínimo de servicios puede predecir con precisión mediante el concepto de cascada de calor, representado numéricamente o a través de algún diagrama de curvas compuestas. El área total de transferencia de calor también puede estimarse antes del diseño de la red haciendo uso de las curvas compuestas. Esta característica reviste especial valor, porque al estimar las áreas y consumo de energía antes del diseño puede tenerse el pronóstico del costo de la red antes de conocer su estructura.

La base de estimación del área total de transferencia de calor requerida consiste en suponer que una corriente ficticia caliente (dada por la supercurva caliente) intercambia calor con una corriente ficticia fría (dada por la supercurva fría) en un intercambiador a contracorriente. La ecuación de diseño de intercambiadores de calor se aplica de manera directa.

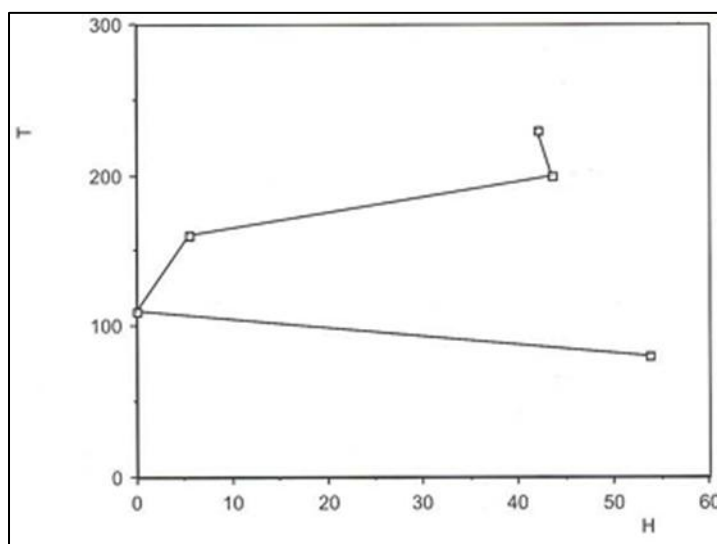


Figura. 5 Gran curva compuesta.

$$Q = UA\Delta Tm_L$$

Si se suponen intercambios verticales, lo cual implica que una sección caliente intercambia calor directamente con su contraparte fría localizada verticalmente debajo de ella, se espera un uso eficiente de temperaturas, tal que el área del equipo tienda a un valor mínimo.

El único artificio necesario es aplicar esta ecuación de diseño en cada sección k dada por el cambio de pendiente de cualquiera de las curvas compuestas, de tal forma que el área predicha para la red estaría dada por:

$$A = \frac{1}{U} \sum_k \frac{Q_k}{\Delta T_{MLk}}$$

Formula conocida como Bath, se aplica solo para el caso en el que el coeficiente global de transferencia de calor sea el mismo para todos los intercambios. El valor del coeficiente global depende de los coeficientes de película de los fluidos involucrados en el proceso de intercambio de calor:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_{cal}} + \frac{1}{h_{frio}}$$

Si se incluye esta dependencia, entonces la ecuación que predice el área necesaria de intercambio de calor para cada intervalo k en función de los coeficientes individuales de película puede expresarse como:

$$A_k = \frac{1}{\Delta T_{MLk}} \left(\sum_i^{Corr.cal.} \frac{Q_i}{C_i} + \sum_j^{Corr.frias} \frac{Q_j}{n_j} \right)$$

De tal manera que la estimación del área total se obtiene al sumar las áreas de cada intervalo k. De la suma de las áreas definidas por la sección de intercambio comprendida entre ambas curvas compuestas se obtiene la predicción del área de intercambio necesaria entre las corrientes del proceso. Para completar la estimación y obtener el área total debe agregarse la predicción de las áreas necesarias para calentadores y enfriadores, para lo cual es necesario usar las curvas compuestas balanceadas y estimar las áreas para calentadores y enfriadores de la misma manera.

2.5. Revisión de redes de intercambiadores de calor existentes

Existen procesos instalados que operan con alguna red de intercambiadores de calor diseñados bajo escenarios económicos diferentes a los actuales. Esto provoca que ahorren solo una fracción del máximo ahorro bajo un diseño nuevo, bajo el método del punto de pliegue se puede modificar una red existente

1. Diagnóstico de la red.

El primer paso es revisar una red existente es cuantificar su eficiencia. Una forma es comparando el consumo de servicios externos de la red antes de ser intervenido con el mínimo consumo de servicios después de ser intervenido, la diferencia se intentará integrar total o parcialmente con cambios estratégicos en la red existente. El consumo mínimo de energía depende del valor de la menor diferencia de temperatura en alguno de los intercambiadores de calor (ΔT_{min})

2. Principio básico de revisión.

Ante una red existente ineficiente, la mejor estrategia de optimización consiste en buscar utilizar el equipo existente en su mayor parte y corregir solamente puntos críticos de la red, de otra forma, cambiarla totalmente no aprovecha la inversión ya hecha y representa una inversión fija adicional mayor.

3. Establecimiento de objetivos.

Antes de hacer modificaciones a una red existente, puede establecerse objetivos que deben esperarse mediante el uso de la relación entre áreas y energía. Para fines de diseño, esta relación viene dada por la siguiente figura cuando (ΔT_{min}) es pequeño, los requerimientos mínimos de energía (servicios) son bajos a costa de áreas en intercambiadores de calor grandes. Caso inverso para (ΔT_{min}) grandes. Un parámetro económico utilizable como medida de respaldo para establecer el valor de área buscando el (ΔT_{min}) es el tiempo de recuperación de capital, mayores ahorros de energía requieren mayor inversión inicial y plazo más largo. Si se deseara una alternativa que tuviera un año de recuperación de capital como restricción, el punto de la curva que refleje esta proporción de (ΔT_{min}) entre el área necesaria y la energía usada es el que debería usarse para este ajuste de red.

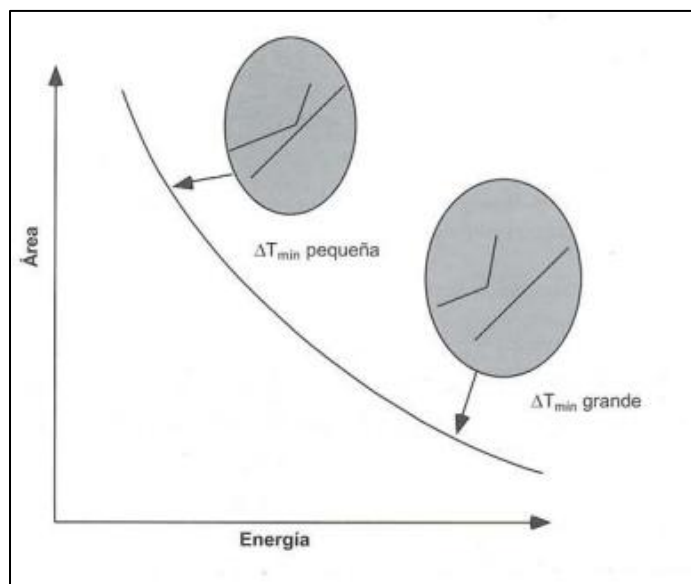


Figura. 6 Requerimientos mínimos de área respecto a energía para diseño de redes de intercambiadores.

Conclusiones

El acercamiento mínimo de energía es de gran importancia en síntesis de procesos químicos, ya que determinando el punto mínimo de energía que necesita una reacción química, esto nos ayuda a reducir los costos de equipo y servicios. Mientras menor sea su punto mínimo de energía, mayor será el área de transferencia necesaria en los intercambiadores (aumentando los costos de equipo) pero menores serán los requerimientos de utilidades (disminuyendo los costos de servicios).

Para obtener ese acercamiento mínimo se pueden emplear diversos métodos como el de diagramas de contenido de calor o el de punto de pliegue. El método de diagramas de contenido de calor es una técnica importante en la síntesis de procesos químicos que se utiliza para identificar y optimizar las redes de intercambio de calor en sistemas industriales. Esto ayuda a reducir el consumo de energía y mejorar la eficiencia en los procesos industriales.

Por otro lado, el análisis de pliegue es un método para diseñar sistemas de intercambio de calor más eficientes considerando sistemáticamente un mejor consumo de energía, inversión de capital y reducción de emisiones, lo que conduce a un mejor diseño de procesos. En resumen, es importante destacar las ventajas de calcular los objetivos correspondientes a las necesidades de calefacción y refrigeración, los niveles de temperatura servidos, el número de intercambios y su área mínima, así como determinar el valor óptimo de $\Delta T_{\min}$ mediante un

método sencillo. Con el fin de obtener un valor más bajo del costo total anualizado sin un diseño detallado de la disposición del intercambiador de calor.

Además de los métodos, la predicción del área en redes de intercambiadores de calor es un proceso esencial. Al estimar el área total necesaria, se pueden tomar decisiones informadas sobre el diseño y dimensionamiento de la red, lo que a su vez permite optimizar la eficiencia energética y reducir los costos operativos en los procesos industriales. La precisión en esta predicción es fundamental para garantizar un funcionamiento óptimo de los sistemas de intercambio de calor y, por ende, mejorar la rentabilidad y sostenibilidad de las operaciones industriales.

Y, por último, la revisión de redes de intercambiadores de calor existentes permite hacer dos cosas: diagnosticar redes que ya se hayan construido tiempo atrás para saber si cambiarlas o mantenerlas, y permite conocer un segundo criterio para ver de qué tamaño se puede instalar un intercambiador de calor. Con esto se puede ajustar el tamaño del intercambiador o la ΔT_{min} a conveniencia para mejorar la eficiencia y rentabilidad del proceso.

Complementos educativos

Ejercicios prácticos (Excel)

[UNIDAD II. INTEGRACIÓN DE ENERGÍA.xlsx](#)

Infografía (Canva)

[UNIDAD II.INTEGRACIÓN DE ENERGÍA .pdf](#)



Presentación (PowerPoint)

[UNIDAD II. INTEGRACIÓN DE ENERGÍA.pptx](#)

Unidad III. Evaluación económica de procesos

Introducción: En el contexto de la asignatura Síntesis y optimización de procesos, la evaluación económica de procesos constituye un componente fundamental para la toma de decisiones técnicas e industriales informadas. No basta con diseñar un proceso químico o de transformación eficiente desde el punto de vista técnico; también es indispensable garantizar su viabilidad económica y su rentabilidad a largo plazo. La evaluación económica permite analizar, comparar y seleccionar alternativas de diseño con base en criterios financieros sólidos que consideren no solo los aspectos operativos, sino también los impactos de inversión y recuperación de capital.

Dentro de este tema, se abordan dos ejes principales. El primero se refiere a las técnicas de análisis económico de procesos, donde se aplican herramientas como el análisis de flujo de caja, cálculo del valor presente neto (VPN), tasa interna de retorno (TIR) y periodo de recuperación, entre otros. Estas técnicas facilitan la evaluación comparativa de diferentes configuraciones de proceso, considerando su rentabilidad y riesgos asociados. El segundo eje abarca la estimación de costos de inversión y operación, que incluye la proyección de los gastos de capital inicial (equipos, instalaciones, ingeniería) y los costos recurrentes (materias primas, energía, mantenimiento, personal, entre otros).

En conjunto, estos subtemas brindan al ingeniero químico las competencias necesarias para integrar criterios técnicos y económicos en el diseño de procesos industriales óptimos, sustentables y competitivos.

3.1 Selección de materiales

Un proceso industrial (o un nuevo proceso) sólo tiene estabilidad en el mercado (o perspectivas de comercialización) si su aspecto económico es favorable.

Para el diseño de un proceso se puede identificar tres tipos de niveles:

1. Diseño preliminar.
2. Estudio de pre inversión.
3. Diseño final o ingeniería de detalle.

En el primer nivel se toma información básica del proyecto, con diseños aproximados y escenarios económicos simples, para llegar a un diagnóstico preliminar sobre el potencial económico del proceso. Esta etapa debe hacerse en forma tan rápida como sea posible, para tomar la decisión de continuar con el proyecto, si existe un potencial favorable, o terminarlo y no invertir tiempo adicional en él si es claro que el proceso no tiene perspectivas económicas razonables.

En el segundo nivel, el panorama promisorio del proceso amerita un diseño más elaborado y un análisis económico más riguroso, con estimaciones de inversiones más confiables y costos de operación más desglosados. Se aplica el mismo tipo de lógica; el proceso debe volver a analizarse para examinar su potencial económico y dictaminar si se debe continuar con su proyecto de comercialización.

El tercer nivel típicamente se lleva a cabo por una firma especializada, con el fin de elaborar diseño finales y planos para la construcción del equipo. Dada la información que se genera en forma de un diseño final, las estimaciones económicas de este nivel son las más exactas que se pueden tener para la etapa de diseño del proceso, y constituyen los mejores pronósticos de lo que se espera durante la operación comercial del proceso.

¿Qué es el análisis económico?

El análisis económico se centra, fundamentalmente, en la valoración de la situación económica y financiera existente y en los riesgos implícitos de corto a medio plazo para la estabilidad de precios desde la perspectiva de la interacción de la oferta y la demanda en los mercados de bienes, servicios y factores en los citados horizontes temporales. Se presta la

debida atención a la necesidad de identificar la naturaleza de las perturbaciones que afectan a la economía, sus efectos sobre el comportamiento de los costos, precios y las perspectivas de corto a medio plazo referidas a su propagación en la economía.

El análisis económico en ingeniería química es una herramienta importante para evaluar la rentabilidad de los proyectos. Los ingenieros químicos utilizan el análisis económico para evaluar la viabilidad financiera de los proyectos, teniendo en cuenta los costos de inversión, los costos operativos, los ingresos y los flujos de efectivo. También se utiliza para evaluar la rentabilidad de las alternativas de procesamiento y para tomar decisiones de inversión.

Estrategia general de análisis económico

La manera de efectuar el análisis económico en una planta de proceso es tan diversa y está en dependencia de tantos factores a considerar, que no se puede plantear una metodología específica a seguir en todos los casos, sin embargo, sí se puede plantear una estrategia general que posibilite llegar a resultados concretos con el menor esfuerzo y gasto de recursos disponibles. En general al ingeniero químico se le presenta el problema de mejorar la efectividad económica de la planta, el cual puede resolver por tres vías fundamentales:

Cambiando las condiciones de operación con los recursos presentes en la planta.

Efectuando inversiones que posibiliten el incremento deseado de la efectividad económica en la planta.

Llevando a cabo una distribución óptima de los recursos existentes, o lo que es lo mismo, planificando la producción según corresponda hacerlo.

En todos los casos, deberá obtener la información necesaria para poder determinar el flujo de efectivo en el sistema, definido este último de forma preliminar, como todos los ingresos y desembolsos de capital en la planta y en base al mismo, seleccionar un criterio económico

adecuado que posibilite tras la aplicación de éste, tomar las mejores decisiones al respecto.

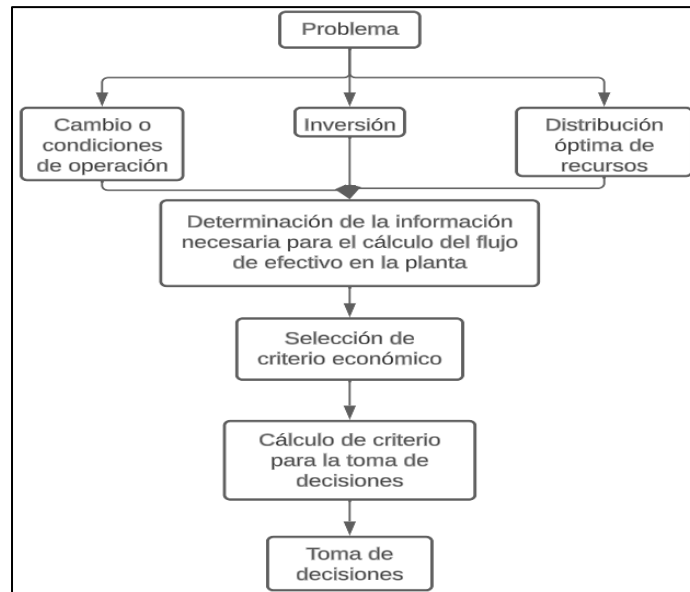


Figura. 7. Esquema resumen.

Componentes de la economía del proceso

Para establecer una actividad económica se requiere de una inversión. A cambio de esta inversión se obtienen ingresos en forma de ventas, las cuales deben ofrecer un excedente adecuado sobre los costos que implica la operación del proceso para que este tenga un potencial favorable de comercialización. La inversión requerida puede descomponerse en una inversión fija I_F , y un capital de trabajo o circulante, I_w :

$$I = I_F + I_w$$

Donde I es la inversión total, I_F incluye la inversión o capital inmovilizado en componentes del proceso, y el capital de trabajo o circulante representa la cantidad que se estipula para mantener la operación del proceso bajo variaciones en la disponibilidad de insumos.

A su vez, la inversión fija se puede dividir en dos partidas:

$$I_F = I_E + I_A$$

Donde I_E se refiere a los componentes principales del proceso, mientras que I_A incluye la inversión en equipo auxiliar.

Esta división de la inversión de un proceso en sus componentes de inversión de equipo principal, equipo auxiliar y capital de trabajo está relacionada con el riesgo inherente en este

tipo de actividades económicas. Desde un punto de vista de riesgo, la inversión en equipo principal sería la más difícil de recuperar si el proyecto fracasara, mientras que el capital de trabajo es el que ofrece menor grado de riesgo.

El costo de operación de un proceso puede evaluarse por unidad de tiempo (\$/año), o por unidad de producción (\$/kg). Este concepto incluye los costos asociados con la inversión, los costos variables y los costos de mano de obra:

$$C = a \cdot I_F + b \cdot MP + c \cdot E + dMO - p \cdot SP$$

Donde C es el costo de operación del proceso; a es un factor que considera gastos anuales; b es el costo unitario de cada materia prima MP ; c es el costo de cada servicio E ; dMO es el costo de mano de obra y p es el precio de cada subproducto SP que se pudiera producir en el proceso además del producto principal. Dependiendo de las unidades de los rubros principales (I , MP , etc.), las cuales pueden estar en base anual o por unidad de producto, C será un costo de operación anual o unitario.

Si S son las ventas anuales, la utilidad bruta o beneficio bruto R se define como la diferencia entre las ventas y el costo de operación anual:

$$R = S - C$$

La utilidad neta P se calcula restando de la utilidad bruta la depreciación del equipo y el pago de impuesto:

$$P = R - e \cdot I - t(R - d \cdot I)$$

Donde e es el factor de depreciación para fines contables, d es el factor de depreciación para fines de impuestos y t es la tasa de impuestos.

Criterios para la evaluación económica de procesos

Los ingenieros generalmente utilizan un pequeño conjunto de herramientas financieras para evaluar opciones de instalaciones y justificar sus decisiones con la alta gerencia. En estos casos, el objetivo del ingeniero es demostrar cómo el producto sugerido aumentará la rentabilidad de la empresa. Esta clase de análisis es principalmente voluntaria. Las decisiones como agregar una nueva línea de ensamblaje o cambiar de tipo de material para los empaques pueden posponerse o simplemente no tomarse.

El valor del dinero con el tiempo

Los costos y beneficios de una inversión ocurrirán durante un cierto periodo de tiempo en lugar de que ocurran solamente en el momento de la compra. Por consiguiente, los análisis financieros y estudios de costo-beneficio deben incluir los efectos a futuro de las decisiones actuales. Si las personas dieran el mismo valor a un dólar a futuro que el que dan a un dólar en el presente, el análisis financiero podría reducirse a la suma de todos los costos e ingresos a futuro derivados de la inversión. Sin embargo, como dice el viejo refrán: “Más vale pájaro en mano que un ciento volando”. No solo podría no cumplirse la promesa de un dólar a futuro, sino que su valor adquisitivo podría declinar. Además, gastar el dólar en el presente ofrece beneficios inmediatos que tendrían que posponerse si ese dólar se guardara para una fecha futura. Por consiguiente, los individuos exigen alguna retribución para compensar estas preocupaciones, aumentando por eso el valor de un pago a futuro, a más de un dólar. Recíprocamente, al aceptar hoy un pago por un dólar ofrecido en alguna fecha a futuro, la persona está dispuesta a recibir menos que un dólar, puesto que puede disfrutarlo inmediatamente sin los riesgos de la inflación o de que no le paguen.

Este proceso de ajuste se llama el principio del valor del dinero con el tiempo. El ampliar un plazo para diferir un pago, tiene un efecto acumulativo. Sea I la cantidad de dinero en un tiempo t ; el valor presente o actual se estima mediante:

$$VP = I \cdot e^{-it}$$

Para modelos de contabilidad continua, o bien para modelos de contabilidad discreta:

$$VP = \frac{I}{(1 + I)^t}$$

En ambos casos, los factores de descuento toman en cuenta el interés i que el dinero ganaría a través del tiempo.

Este método tiene la desventaja de que requiere predicciones futuras sobre la economía de un país o un sistema. En países con altos grados de inflación, por ejemplo, este criterio debe usarse con cuidado debido a la inestabilidad de sus índices económicos.

Efectos del tiempo en la inversión

Las inversiones para un proceso determinado se encuentran publicadas o se evalúan típicamente en función de una capacidad base y de un tiempo base.

El efecto de la inflación en los costos de inversión de planta químicas puede cuantificarse mediante el uso de índices especializados. Para pasar la información de la inversión de un proceso de un año base a un año deseado simplemente se toma el cociente de los índices de los años en cuestión.

$$I_{t_2} = I_{t_1} \left(\frac{\text{Índice del año 2}}{\text{Índice del año 1}} \right)$$

Los índices más utilizados son:

El índice de costos de plantas de *Chemical Engineering*. El cálculo de este índice se base en cuatro rubros:

- Equipo y maquinaria. 61%
- Mano de obra para construcción. 22%
- Edificios. 7%
- Ingeniería y supervisión. 10%

El índice de costo de equipo instalado Marshall y Stevens. También publicado por la revista *Chemical Engineering* a partir de 1926, se aplica a industrias de proceso y está basado en ocho tipos de industrias:

- Cemento. 2%
- Química. 48%
- Productos de arcilla. 2%
- Vidrio. 3%
- Pintura. 5%
- Papel. 10%
- Petróleo. 22%
- Hule. 8%

El índice de costos de construcción de Refinerías Nelson. Se publica en la revista *Oil and Gas Journal* y refleja la variación en el tiempo del costo de construcción de refinerías. Su estimación se basa en los siguientes porcentajes:

- Mano de obra especializada. 39%
- Mano de obra común. 21%
- Fierro y acero. 20%
- Materiales de construcción. 8%
- Equipo misceláneo. 12%

Tasas de interese, precios e inflación

Los analistas utilizan la tasa de interés para estimar el valor del dinero con el tiempo. Esta puede visualizarse como el retorno de la inversión o como el costo del crédito. Las tasas de descuento son tasas de interés que se utilizan para estimar el valor de los pagos actuales que se anticipan a cuenta de pagos a futuro. Hay tres tipos de interés que son importantes para este Manual: real, nominal, y social. La tasa de interés establecida por las instituciones de crédito es la tasa de interés nominal. Es el costo del préstamo y en él se ha incluido un factor para tomar en cuenta los cambios anticipados en el nivel general de precios (inflación). Retirando de la tasa de interés nominal el ajuste por inflación, se obtiene la tasa de interés real -el costo real del préstamo. En forma de ecuación, la tasa de interés nominal (i) es igual a la tasa de interés real (i_r) más la tasa esperada de inflación (p^e)

$$i = i_r + p^e$$

Flujo de efectivo

Durante toda la vida de una inversión se presentan gastos e ingresos, cuya cantidad y momento en el que se presenten constituyen el flujo de efectivo del proyecto. El coste de sistemas de control de la contaminación siempre incluye gastos, pero puede no necesariamente tener ingresos. Para que un control genere ingresos, debe reducir el costo de producción (a través de menos consumos o reformulación del producto), o debe capturar y recuperar un contaminante con características reciclables. Mientras que el flujo de efectivo ocurre durante todo el año, los analistas por lo general suponen que los egresos e ingresos ocurren al final del año en el que se presentan. En la Figura 2 se muestra un diagrama de un

flujo de efectivo hipotético que ilustra los ingresos y egresos contabilizados al final del año para un dispositivo de control que no tiene valor de recuperación. Los egresos son las barras sólidas que se extienden por debajo de la línea y los ingresos son las barras sólidas por encima de ella. Típico de muchos flujos de efectivo relacionados con equipo, los costos más altos ocurren a tiempo cero, cuando se adquiere y se instala el control. En el primer año de operación, los costos tienden a ser relativamente altos por la operación y mantenimiento de un equipo nuevo, debido a las condiciones de balanceo y ajuste. Después de eso, los costos tienden a bajar y a permanecer más o menos constantes hasta que el equipo se aproxima al final de su vida útil, cuando los costos de operación y mantenimiento tienden a ser altos de nuevo. En el ejemplo hipotético, el control genera algún ingreso, pero no el suficiente como para compensar los costos de operación y mantenimiento durante la vida del equipo. Es posible, sin embargo, que el ingreso genere flujos de efectivo positivos.

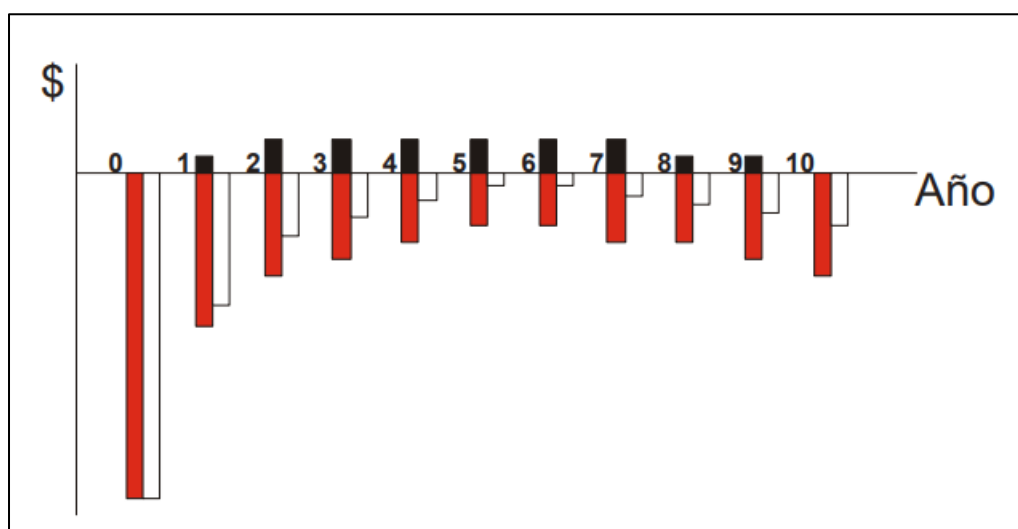


Figura. 8 Diagrama de flujo de efectivo hipotético.

Técnicas de análisis económicas

Cuando existen alternativas de oportunidades de inversión -cuando puede utilizarse más de una estrategia de control de la contaminación- la selección de la alternativa más apropiada depende del efecto de esa alternativa en la rentabilidad de la empresa. Consecuentemente, los análisis financieros han creado un conjunto de herramientas de evaluación que nos ilustran acerca de las consecuencias financieras potenciales asociadas a alguna inversión. Aunque ninguna herramienta sola sirve para todas las instancias, la aplicación de varias de

ellas puede proporcionar al gerente de finanzas, suficiente información de cada alternativa de inversión, de manera que pueda tomarse una decisión adecuada.

Valor Presente Neto (VPN)

También conocido como Valor Actual Neto (VAN). Este método incorpora el valor del dinero en el tiempo en la determinación de los flujos de efectivo netos del negocio o proyecto, con el fin de poder hacer comparaciones correctas entre flujos de efectivo en diferentes periodos a lo largo del tiempo. Está incorporado en la tasa de interés con la cual se convierten o ajustan en el tiempo, es decir en la tasa con la cual se determina el valor presente de los flujos de efectivo del negocio o proyecto.

El desarrollo de un valor actual neto de un flujo de efectivo implica los siguientes pasos:

Identificación de alternativas- para nuestros propósitos, una alternativa apropiada sería cualquier dispositivo de control de la contaminación que redujera las emisiones en la fuente a niveles aceptables.

Determinación de los costos y flujos de efectivo en toda la vida de cada alternativa.

Determinación de una tasa apropiada de interés (descuento) - para las agencias estatales, locales, Tribales y otras organizaciones de gestión ambiental, la tasa de descuento social de siete por ciento de la EPA, probablemente sería la más apropiada.

Para cada alternativa: Calcular un factor de descuento para cada año durante la vida útil del equipo - por ejemplo, la tasa de descuento de la EPA de 7% produce factores de descuento de: 0.9346, 0.8734, 0.8163, 0.7629, and 0.7130 para el 1ro, 2do, 3ro, 4to y 5to año de la vida de un equipo, respectivamente.

Para el flujo de efectivo de cada año, se suman todos los ingresos y gastos para determinar el flujo neto de efectivo para ese año en términos nominales.

Multiplique el flujo neto de efectivo de cada año por el factor de descuento apropiado.

Sume los flujos netos de efectivo descontados para derivar el valor actual neto.

Compare los valores actuales netos de cada alternativa. Los analistas deben valorar cada una de las inversiones que se están analizando, de acuerdo con su valor actual neto. Los valores

actuales netos más altos significan mejores oportunidades de inversión con relación a las otras alternativas de inversión del conjunto entre el que se decide.

En la Figura 8 se incluye una barra blanca en cada año para representar el valor actual neto del flujo de efectivo (ingresos menos egresos), de la inversión (dispositivo de control), durante ese año. En otras palabras, las barras blancas muestran el valor que el inversionista estaría dispuesto a gastar en tiempo cero para cubrir el flujo neto de efectivo de cada año, en lugar de esperar a cubrirlo al final del período. A tiempo cero, los cálculos del valor actual reflejan el valor total de todos los costos e ingresos, por lo que la barra blanca es de la misma longitud que la barra sólida.

El valor actual neto nos proporciona un valor esperado para el control si todos los egresos e ingresos fueran realizados en forma inmediata, en lugar de distribuirse en el tiempo. Claramente, en el ejemplo de la Figura 8, puesto que en ningún año se produce un flujo de efectivo positivo, el valor actual neto del control también debe ser negativo. Si, por otro lado, ocurrieran flujos de efectivo positivos y el valor actual neto del control fuera positivo, el analista podría suponer que el beneficio financiero del control es mayor que su costo y que el control es un buen candidato para ejecutarse.

Debido a que cada control tiene una vida diferente y un patrón de flujo de efectivo diferente, los análisis del valor actual neto proporcionan una medida por medio de la cual pueden compararse las alternativas de control. Sin embargo, los análisis del valor actual neto tienen sus limitaciones. Considérese una empresa hipotética investigando la instalación de dos alternativas de controles de la contaminación del aire. Una alternativa sería la de reconvertir el equipo actual, la cual tendría una vida útil de cinco años sin valor de recuperación. La otra alternativa sería rescatar el equipo actual y reemplazarlo por componentes nuevos de tecnología de punta que contaminen menos. Esta estrategia tendría una vida útil de veinte años. Si el proceso de reconvertir el equipo tiene un valor actual neto más alto, ¿significa que es la mejor opción? No necesariamente, porque dentro de cinco años tendría que comprarse equipo nuevo de cualquier modo. Si la estrategia del equipo nuevo tuviera un valor actual neto más alto, ¿sería ésta una mejor opción? No necesariamente, puesto que la inversión de la empresa estaría corriendo riesgos por un período de tiempo cuatro veces mayor.

Una solución al problema del efecto del tiempo asociado con los análisis del valor actual neto sería la de extender la alternativa de la reconversión del equipo, agregando quince años de reposición de equipo al final del período de la modificación. Esto permitiría una comparación de más sentido, ya que sería para períodos de tiempo similares y se incluirían los dos gastos del equipo necesario para realizar la opción de la reconversión. Otra solución sería la de aumentar la información recibida del análisis del valor actual neto, empleando otras herramientas de análisis financiero.

Las principales ventajas del método del Valor Presente Neto son:

- Utiliza el concepto del valor del dinero en el tiempo.
- Siempre da la decisión correcta de aceptación o rechazo de un negocio o proyecto.

La principal desventaja del método del Valor Presente Neto es:

Su sensibilidad al valor de la tasa de interés utilizado. Por lo tanto, requiere de una buena estimación de la tasa de interés esperada con la cual se van a "descontar" los flujos de efectivo futuros.

Para calcularlo se utiliza la siguiente ecuación:

$$VPN = \sum_{t=0}^n FNE \left(\frac{i}{1 - (1 + i)^{-t}} \right)$$

Donde FNE es el flujo neto de efectivo para el año t , e i es la tasa de interés.

Tasa de retorno

En palabras simples, la tasa de retorno es el porcentaje de beneficio o pérdida que conlleva cualquier inversión, es decir, equivale a la tasa de interés que dicho negocio o proyecto le va a dar a la persona que invirtió ahí su dinero. Se define como el beneficio neto (P) dividido por la inversión total del proceso (I).

Su ventaja es que es fácil de entenderla y su desventaja es que puede dar una decisión errónea cuando se tienen proyectos mutuamente excluyentes.

Para calcularla se aplica la siguiente formula:

$$ROI = \frac{P}{I}$$

Para que una alternativa tenga atractivo, ROI debe ser mayor que un valor mínimo establecido por la compañía.

$$ROI > i_{min}$$

Beneficio extra

El beneficio adicional con respecto al beneficio mínimo establecido por la compañía es otro criterio que puede utilizarse para evaluar alternativas:

$$V = P - i_{min} \cdot I$$

Si $ROI > i_{min}$ se cumple, entonces V será positiva, lo cual establece la factibilidad económica usando este criterio.

Tiempo de recuperación de capital

Es el tiempo que tardaría el inversionista en recuperar todo su capital en el caso hipotético de que todas las utilidades se usaran exclusivamente para ese fin:

$$TR = \frac{I}{P + e \cdot I}$$

Donde TR es el tiempo de recuperación.

Análisis del punto de equilibrio

El análisis del punto de equilibrio es un proceso que permite determinar en qué momento una empresa, o un nuevo producto o servicio, será rentable. Es un cálculo financiero utilizado para determinar el número de productos o servicios que debes vender para cubrir al menos los gastos de producción.

Se basa en la relación entre los ingresos totales de la empresa y su costo total, según cambia la producción (suponiendo que se vende la totalidad de esta).

Este análisis sirve para:

- Determinar el nivel de operaciones necesario para cubrir todos los costos relativos a estas.
- Evaluar la rentabilidad de los diversos niveles de producción y ventas.
- Planear la producción.
- Planear las ventas.
- Planear resultados antes y después de ISR y PTU.
- Controlar.
- Tomar decisiones.

Análisis incremental

El análisis incremental es una técnica de toma de decisiones utilizada para determinar la verdadera diferencia de costos entre las alternativas. También llamado enfoque de costo relevante, análisis marginal o análisis diferencial, el análisis incremental no tiene en cuenta los costos indebidos o pasados. El análisis incremental es útil para la estrategia comercial, incluida la decisión de autoproducir o subcontratar una función.

El análisis incremental es aplicable a problemas de corto y largo plazo, pero es especialmente adecuada para las decisiones de ejecución a corto plazo.

3.2. Técnicas de análisis económico de procesos

Tipos de estimaciones de costos

De acuerdo con el Perry's Chemical Engineer's Handbook, una estimación de estudio se utiliza para estimar la factibilidad económica de un proyecto, antes de invertir suficientes fondos para pruebas piloto, estudios de mercado, levantamiento de planos topográficos y adquisiciones, puede ser preparado con un mínimo de datos y costos relativamente bajos. Específicamente, para realizar una estimación de estudio, debe conocerse lo siguiente:

- Localización de la fuente dentro de la planta;
- Un bosquejo del diagrama de flujo del proceso.
- Especificaciones preliminares de materiales para, y tamaño de, los componentes del equipo del sistema.
- Tamaño aproximado y tipos de construcción de cualquier edificio requerido para albergar el sistema de control.

- Estimación burda de las necesidades de servicios.
- Diagrama de flujo y especificaciones preliminares de los conductos y tuberías.

Tamaño aproximado de los motores requeridos.

Adicionalmente, se necesita una estimación de las horas de trabajo de ingeniería y bosquejo, ya que la exactitud de una estimación depende grandemente de la cantidad de trabajo de ingeniería que se invierta en el proyecto.

Perry, incluye otros cuatro tipos de estimaciones, tres de los cuales son más exactos que la estimación de estudio. Son los siguientes:

1. Orden de magnitud

Esta estimación proporciona un procedimiento de regla de dedo aplicado solamente a tipos repetitivos de instalaciones de planta para los cuales se cuenta con buen historial de costos. Sus márgenes de error son mayores que $\pm 30\%$. (Sin embargo, de acuerdo con Perry, no se le pueden aplicar con confianza límites de exactitud.) El único dato que se requiere para realizar este nivel de estimación es la capacidad del sistema de control (medida en ocasiones por la máxima velocidad de flujo volumétrico de los gases que pasan por el sistema). Las llamadas estimaciones de “factores de seis décimas” (no confundir con estimaciones en base a factores), son ejemplos de este tipo.

2. Plan o autorización de presupuesto o preliminar

Esta estimación, normalmente con exactitud de $\pm 20\%$, requiere un conocimiento más detallado que las estimaciones de estudio con relación al sitio, al diagrama de flujo, al equipo, a los edificios, etc. Adicionalmente, se necesitan estimaciones aproximadas de la instrumentación y de los aislantes.

3. Control del proyecto o definitiva

Exacta dentro de $\pm 10\%$, esta estimación requiere más información que las estimaciones preliminares, especialmente en lo concerniente al sitio, al equipo y a las especificaciones eléctricas.

4. En firme o de contratista o detallada

Este es el más exacto ($\pm 5\%$) de los tipos de estimaciones, requiriendo planos, especificaciones y prospecciones de sitios completos. Más aún los plazos rara vez permiten la preparación de tal tipo de estimaciones antes de probar continuar el proyecto.

Para propósitos de desarrollo de regulaciones, se ha encontrado que las estimaciones de estudio son aceptables, ya que representan un término medio entre las estimaciones de órdenes de magnitud, menos exactas, y los otros tipos más exactos de estimaciones. Los primeros son muy imprecisos por lo que no son de mucho valor, mientras que los últimos no solo son muy caros de hacerse, sino que requieren un conocimiento detallado y tan específico del proceso.

Estimación de costos de inversión

Cuando un proceso está en desarrollo a escala laboratorio, puede tenerse acceso a su costo de inversión a través de fuentes especializadas o del licenciador de la tecnología, sin embargo, esta estimación generalmente no está disponible. En estos casos es necesario tener alguna estimación razonable del potencial económico del proceso en desarrollo, aun cuando la estimación no sea completamente precisa.

En general cualquier método de estimación requiere primero de un diagrama de flujo que muestre los principales componentes de equipos y sus dimensiones. El proceso de estimación tiene dos pasos generales:

- La estimación del costo base de las unidades de equipo.
- El uso de factores de experiencia para incluir los accesorios adicionales para la operación de esos equipos de proceso.

Método Lang

Este método clásico implica el sumar primero el costo base de los principales componentes del proceso

$$I_e = \sum I_i$$

En seguida se multiplica I_e por una serie de factores de experiencia

$$I_f = (I_e + (\sum f_i I_e))_{f_1}$$

Donde I_f es la estimación de la inversión completa del proceso, I_e es el costo de los principales equipos. f_i es un factor para la estimación del costo de tuberías, instrumentación, edificios, y f_1 toma en cuenta los gastos indirectos tales como honorarios de ingenieros y contratistas, contingencias, etc.

Arreglando la ecuación anterior

$$I_f = ((1 + \sum f_i)f_1)I_e$$

O bien

$$I_f = f_1 I_e$$

Donde f_1 es el factor de Lang

$$f_1 = (1 + \sum f_i)f_1$$

Para estimar la inversión total de un proceso a partir del costo de sus equipos principales, se puede usar un factor global de experiencia. Típicamente, puede esperarse que el factor de Lang tenga valores de entre 3 y 4, lo cual desprende del análisis de varios procesos existentes. Esto refleja que los costos de equipos, contrario a lo que tal vez pudiera esperarse, pueden representar en muchas ocasiones una fracción no muy considerable de la inversión total de una planta. A continuación, se dan factores de Lang que se han reportado para cierto tipo de plantas

- Productos sólidos: 3.10
- Mezclas de sólidos y fluidos: 3.63
- Productos de fluidos: 4.74

Método de Guthrie

Esta técnica se usa para para estimar el costo de una unidad instalada o una planta instalada. Varios trabajos en el área de síntesis de procesos han usado este método para sus evaluaciones económicas. Incluye la posibilidad de estimar módulos como edificios, oficinas administrativas, oficinas, terrenos y desarrollo del lugar. Los módulos de equipo consisten en una combinación de varios elementos de costo:

- Costo de equipo
- Material directo

- Mano de obra directa en campo
- Costo directo de material y mano de obra
- Costos indirectos
- Costo del módulo desnudo
- Costo del módulo total

La estimación del costo de un módulo de equipo de proceso representa el costo de la construcción del equipo (intercambiador de calor, bomba, columna, etc.) y el costo de material, mano de obra e indirectos necesarios para instalar el equipo en un circuito de proceso químico. El método comienza con la estimación de un costo base en función de alguna dimensión del equipo. Ese costo base implica acero al carbón como material de construcción, una geometría base del equipo, una presión de operación moderada y un baño año para la estimación del equipo deseado.

3.3. Estimación de costos de inversión y operación

Elementos de inversión de capital total

La inversión de capital total incluye todos los costos que se requieren para la compra del equipo necesario para el equipo de control (denominado costos de equipo comprado), los costos de mano de obra (no incluye impuestos sobre la renta), y los materiales para la instalación de ese equipo (denominado costos directos de instalación), costos para la preparación del sitio y edificios y otros ciertos costos que se denominan costos indirectos de instalación. La ICT también incluye los costos del terreno, capital de trabajo e instalaciones fuera del sitio.

Los costos directos de instalación incluyen los costos de la cimentación, estructuras, levantamiento y manejo del equipo, trabajo eléctrico, tuberías, aislantes y pintura. Los costos indirectos de instalación incluyen costos tales como los de ingeniería; construcción y gastos de campo; honorarios de los contratistas (de las firmas de ingeniería y de construcción involucradas en el proyecto); costos de las pruebas de funcionamiento y arranque (para el arranque del sistema de control y verificar que cumpla con la garantía de funcionamiento); e imprevistos. La de imprevistos es una categoría en la que caen todos los costos no previstos que pudieran surgir, incluyendo (pero no limitado a) posibles rediseño y modificaciones de

equipo, aumentos en los costos del equipo por escalamiento, incrementos en los costos de mano de obra de campo y retrasos que pueda haber durante el arranque.

Estos elementos de inversión de capital total se muestran en la Figura 9. Obsérvese que la suma de los costos del equipo comprado, los costos directos e indirectos de instalación, los de preparación del sitio y los costos de los edificios, comprenden los límites de la batería de la estimación. Por definición, esta es la estimación total para un trabajo específico, sin considerar las instalaciones de apoyo que se requieran y que se suponen que ya se tienen en la planta.

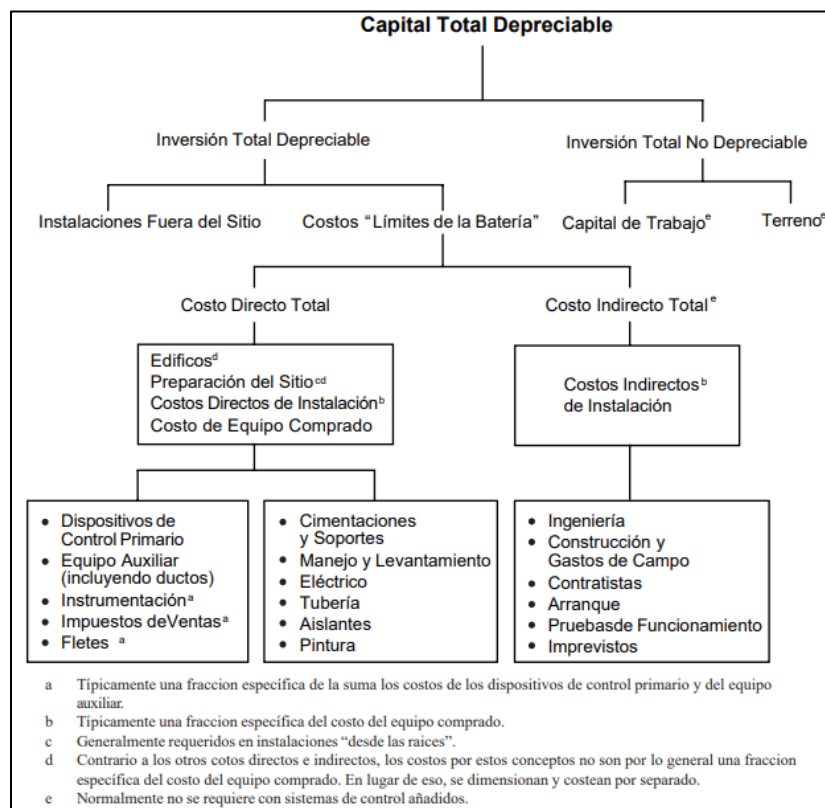


Figura. 9 Diagrama de elementos de Inversión de Capital Total.

Esto se aplicaría principalmente a sistemas de control instalados en plantas ya existentes, aunque también se puede aplicar a los sistemas que se instalen en plantas nuevas, cuando no se requiera de instalaciones especiales, para soportar al sistema de control.

Según se requiera, las instalaciones fuera del sitio incluyen a las unidades para producir vapor, electricidad y agua tratada; edificios de laboratorios; espuelas de ferrocarril y caminos. Sin embargo, es inusual que un sistema de control de la contaminación requiera una de estas

unidades dedicada a dicho sistema, puesto que rara vez las necesidades del sistema son de ese tamaño. Sin embargo, pudiera ser necesario -especialmente en el caso de sistemas de control instalados en plantas nuevas- incluir una capacidad extra en la planta generadora del sitio, para propósitos de control. (Una torre lavadora Venturi, la cual requiere de grandes cantidades de energía eléctrica, es un buen ejemplo de esto). Es costumbre, que el costo de este servicio sea cargado a los costos de operación del proyecto con una tarifa tal que cubra tanto la inversión como los costos de operación y mantenimiento (O y M) del servicio.

Otros dos costos pueden incluirse en la inversión de capital total para un sistema de control: capital de trabajo y terreno. El capital de trabajo es un fondo que se reserva para cubrir los costos iniciales de combustibles, sustancias químicas y otros materiales, así como salarios y mantenimiento. Usualmente no se aplica a los sistemas de control, ya que las cantidades de servicios, materiales y mano de obra que requieren son generalmente bajas. (Una excepción podría serlo un incinerador térmico que consuma combustible, para el cual habría que tener disponible un pequeño suministro (30 días), de combustible, durante el período inicial de operación).

También podría ser necesario un terreno. Pero como la mayoría de los sistemas de control añadidos ocupan poco espacio (un octavo de hectárea o menos), este costo sería relativamente bajo. (Ciertos sistemas de control, tales como los utilizados para la desulfuración de gas natural, requieren de terrenos más grandes para el equipo de proceso, almacén de sustancias químicas y disposición de residuos).

El capital de trabajo y el de terreno son gastos no despreciables. En otras palabras, estos costos son “recuperados” cuando el sistema de control llega al final de su vida útil (generalmente en 10 o 20 años). Por el contrario, otros costos de capital son despreciables, puesto que no pueden ser recuperados y están incluidos en los cálculos del impuesto sobre la renta (cuando aplique) y de depreciación, siempre que el impuesto sobre la renta se considere en el análisis de costos.

Cuando el 100% de los costos del sistema son despreciables, al término de la vida útil del equipo de control, éste no tiene ningún valor recuperable. Esta es una suposición razonable para sistemas de control añadidos, al igual que para la mayoría del equipo, los cuales se diseñan para una fuente específica y no pueden utilizarse en otra parte sin modificarse. Aún

si fuera reutilizable, el costo de desarmar el sistema sería tan alto (o mayor), que su valor de recuperación.

Elementos del costo total anual

El Total Annual Cost - TAC (costo total anual) de los sistemas de control, se compone de tres elementos: direct costs - DC (costos directos), indirect costs - IC (costos indirectos), y recovery credits - RC (créditos de recuperación), los cuales se relacionan por la siguiente ecuación:

$$TAC = DC + IC - RC$$

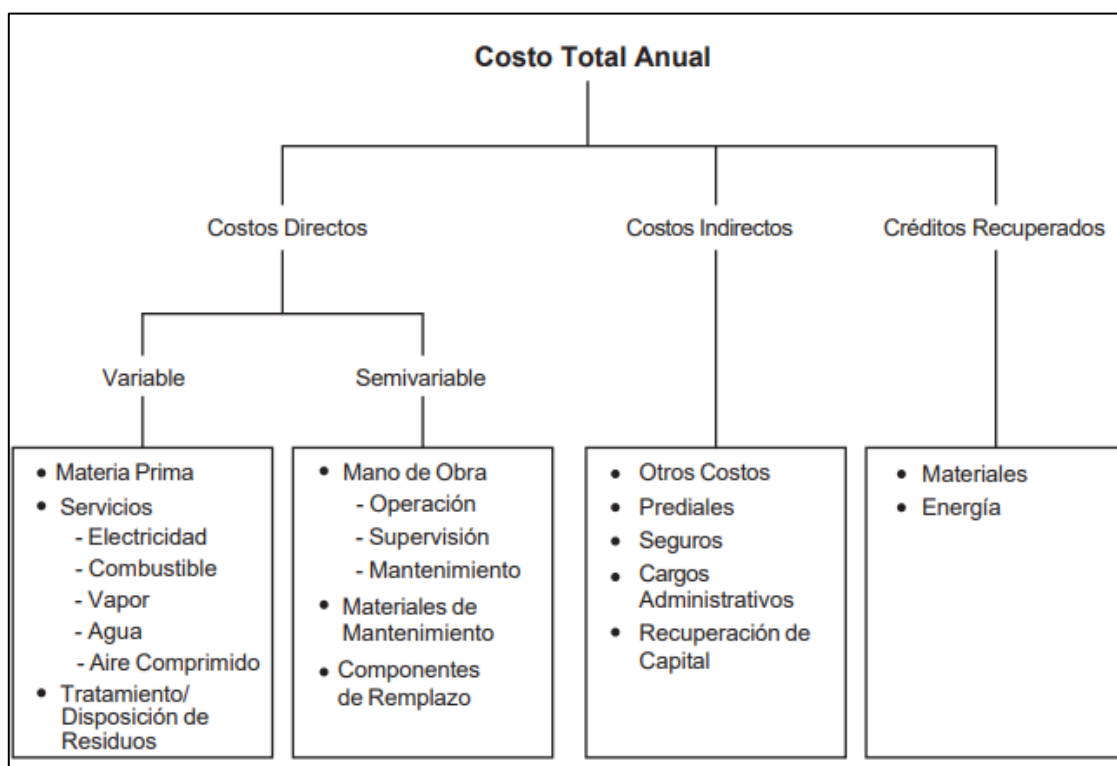


Figura. 10 Diagrama de elementos de Inversión de Capital Total.

Claramente, estos costos son en base anual, ya que este período considera las variaciones estacionales en la producción (y en la generación de emisiones) y es directamente utilizable en el análisis de rentabilidad.

Los costos directos son aquellos que tienden a ser proporcionales o parcialmente proporcionales a la cantidad de gas que es procesado por el sistema de control por unidad de tiempo. Estos incluyen los costos de la materia prima; servicios (vapor, electricidad, agua de

proceso y de enfriamiento, etc.); tratamiento y disposición de residuos; materiales de mantenimiento; partes de repuesto; y mano de obra de operación, mantenimiento y supervisión. De estos costos directos, los de la materia prima, los servicios y los de tratamiento y disposición de residuos son variables, puesto que tienden a estar en función directa de la proporción de flujo del efluente. Esto es, cuando la proporción de flujo es la máxima, los costos son los más altos. Por el contrario, cuando la proporción de flujo es cero, también lo son estos costos.

Los costos directos semivariables son solo parcialmente dependientes de la proporción de flujo del gas. Estos incluyen todo tipo de mano de obra, otros costos directos, materiales de mantenimiento y partes de repuesto. Aun cuando estos costos son función de la proporción de flujo del gas, no son funciones lineales. Aún si los sistemas de control no se encontraran operando, se continuaría incurriendo en algunos de estos costos semivariables.

Los costos indirectos, o costos anuales “fijos”, son aquellos cuyos valores son totalmente independientes de la proporción de flujo del gas y, de hecho, se tendrían aún si el sistema de control dejara de operar. Incluyen categorías tales como los gastos de administración, los impuestos prediales, las primas de seguros y la recuperación de capital.

Finalmente, los costos directos e indirectos anuales se compensan parcialmente por la recuperación de créditos, abonados por los materiales o energía recuperados por el sistema de control y que pueden venderse, reciclarse al proceso, o reutilizarse en algún otro lado en el sitio. Estos créditos, a su vez, deben compensar en parte los costos necesarios para su procesamiento, almacenamiento, transporte y cualquier otra acción requerida para hacer reusable o vendible al material o energía recuperada. Debe ejercerse mucho cuidado y juicio al asignarle valores a los créditos recuperados, ya que los materiales recuperados pueden serlo solo en pequeñas cantidades o de pureza dudosa, resultando de menor valor que el material virgen. Al igual que los costos directos anuales, los créditos recuperados son variables ya que su magnitud es directamente proporcional a la proporción del flujo del gas. En la Figura 10 se muestran los diferentes costos anuales y sus relaciones mutuas.

Procedimiento de estimación

El procedimiento de estimación empleado comunmente tiene cinco pasos:

Obtener los parámetros del establecimiento y las opciones de las regulaciones para un establecimiento dado.

- Bosquejar el diseño del sistema de control.
- Dimensionar los componentes del sistema de control.
- Estimar los costos de estos componentes individuales.
- Estimar los costos (de capital y anual) para todo el sistema.

Tabla 1. Ejemplos de parámetros típicos de dispositivos de control.

General

Material de construcción: acero al carbón

¿Con aislamiento? Sí

Vida económica: 20 años

Redundancia: Ninguna

Específicos del dispositivo

Relación gas-tela: 3.0 a 1

Caída de presión: 6.0 en pulgadas de columna de agua

Construcción: estándar

Tipo de operación: continua

Tipo de filtro: sacudido

Material de la bolsa: poliéster, 16 oz

Parámetros del establecimiento y opciones de las regulaciones

La obtención de los parámetros del establecimiento y de las opciones de las regulaciones, implica no solo enlistar los parámetros de la fuente de contaminación del aire, sino también compilar los datos para la operación del establecimiento.

Al igual que los parámetros del establecimiento, las opciones de las regulaciones son por lo general especificadas por otros. Estas opciones son maneras de lograr un límite y un rango predeterminados de emisión, partiendo desde no control hasta el control máximo técnicamente alcanzable. La opción que resulte dependerá de si la fuente de emisión es una chimenea (fuente fija), una fuga del proceso (emisión fugitiva) o un área no confinada o parcialmente confinada, tal como una pila de almacenamiento (fuente de área, fugitiva). Las chimeneas se controlan normalmente por dispositivos “añadidos”.

Diseño del sistema de control

Bosquejar el diseño del sistema de control implica primero decidir qué clase de sistema se va a costear (una decisión que depende del contaminante a controlar, de las condiciones de la corriente del gas de salida y de otros factores) y que equipo auxiliar será necesario. Al especificar el equipo auxiliar, debe darse respuesta a varias preguntas:

¿Qué tipo de campana (si acaso) será necesario para capturar las emisiones de la fuente?

¿Se necesitará un ventilador para transportar el gas a través del sistema?

¿Se necesita un ciclón o algún otro pre limpiador para acondicionar el gas antes de que entre al dispositivo de control?

¿Se reciclará, o se dispondrá del contaminante capturado? ¿Como se realizará esto?

¿Tendrá la unidad local de servicios, la capacidad para soportar la carga adicional que requiera el sistema de control?

Los tipos de equipo auxiliar que se seleccionen dependerán de las respuestas a estas y a otras preguntas que son específicas del sitio. Sin embargo, sin importar la fuente a controlar, cada

sistema podrá contener, además del dispositivo de control mismo, los siguientes equipos auxiliares:

- Campana, u otro medio para capturar la emisión.
- Conductos, para transportar el gas desde la fuente hasta, a través, y desde el sistema de control.
- Sistema del ventilador, (ventilador, motor, arrancador, compuertas de entrada/salida, etc.), para mover el gas a través del sistema.
- Chimenea, para dispersar el gas limpio en la atmósfera.

Dimensionamiento del sistema de control

Una vez que los componentes del sistema han sido seleccionados, deben ser dimensionados. El dimensionamiento es quizás el paso más crítico, debido a que la suposición hecha en este paso influirá de una mayor manera que cualquier otra en la inversión de capital. Antes de discutir como dimensionar el equipo, necesitamos definir el término parámetro. (En la Tabla 1 se enlistan ejemplos de estos parámetros).

También enlistados en la Tabla 1 están los parámetros generales que también deben especificarse antes de que el costo de compra del equipo del sistema pueda ser estimado. Obsérvese que, al contrario de los parámetros del dispositivo de control, éstos pueden aplicarse a cualquier clase de sistema de control. Estos parámetros incluyen los materiales de construcción (los cuales pueden ir desde acero al carbón y varios tipos de aceros inoxidables, hasta plásticos reforzados con fibra de vidrio), presencia o ausencia de aislantes y la vida útil o económica del sistema. Se requiere de este último parámetro para estimar los costos anuales de recuperación de capital. La vida útil no solo varía según el tipo de sistema de control, sino también con la severidad del ambiente en el que será instalado.

Estimación de la inversión de capital total

El cuarto paso es la estimación del costo del equipo comprado del equipo del sistema de control. Estos costos están disponibles en los manuales para los dispositivos añadidos y equipo auxiliar más comúnmente utilizados. Cada tipo de equipo ha sido cubierto en un capítulo por separado. A su vez, la mayoría de estos costos deberán obtenerse de datos obtenidos de los proveedores de equipo de control. Estas empresas son numerosas, muchas

de las cuales fabrican y erigen una variedad de sistemas de control. Tienen listas actualizadas de los precios de sus equipos, generalmente indexadas por nombre del modelo. Si los artículos para los cuales se solicita precio son equipos estándares ya fabricados, el proveedor puede dar una cotización por escrito, enlistando sus costos, nombre de los modelos, fecha de la cotización, fecha estimada de embarque y otra información. Más aún, las cotizaciones son por lo general “F.O.B.” (free-on-board o libre a bordo) proveedor, lo que significa que no se han incluido impuestos, fletes ni otros cargos. Sin embargo, si los artículos no son estándares ya fabricados, deben fabricarse a las especificaciones del cliente o, en caso de que sean de gran tamaño, deben construirse en el sitio. En tales casos, el proveedor puede aún dar cotizaciones -pero seguramente le tomará más tiempo hacerlo y puede inclusive hacer cargos por este servicio, para cubrir la mano de obra y otros gastos de su departamento de cotizaciones.

La inversión de capital total se calcula utilizando factores a partir del costo del equipo comprado, el cual a su vez es la suma del costo del equipo base (dispositivo de control más auxiliares), fletes, instrumentación e impuestos sobre venta. Los valores de estos factores de instalación dependen del tipo de sistema de control instalado.

Conclusión

Uno de los primeros aspectos a considerar es la selección de materiales, que influye directamente en los costos de producción, la calidad del producto final y la seguridad del proceso. Elegir materiales adecuados no solo implica considerar su precio, sino también su disponibilidad, propiedades físicas y químicas, compatibilidad con el proceso y su impacto ambiental. Un material más barato puede resultar costoso si genera problemas operativos o requiere tratamientos adicionales. Por ello, esta selección debe hacerse con una visión integral que contemple tanto el aspecto técnico como el económico.

Una vez definidos los materiales y el diseño preliminar del proceso, se aplican técnicas de análisis económico para evaluar su rentabilidad. Estas técnicas incluyen el análisis de flujo de caja, el cálculo del valor presente neto (VPN), la tasa interna de retorno (TIR), el periodo de recuperación de la inversión y el análisis de sensibilidad. Estas herramientas permiten simular distintos escenarios, anticipar riesgos financieros y comparar alternativas de diseño.

Además, ayudan a justificar inversiones ante socios, inversionistas o instituciones financieras, mostrando con claridad el potencial económico del proyecto.

Finalmente, la estimación de costos de inversión y operación proporciona una visión concreta de los recursos necesarios para poner en marcha y mantener el proceso. Los costos de inversión incluyen equipos, infraestructura, ingeniería, permisos y puesta en marcha, mientras que los costos operativos abarcan materias primas, energía, mantenimiento, personal y gestión de residuos. Una estimación precisa permite establecer presupuestos realistas, identificar oportunidades de ahorro y evitar desviaciones económicas que comprometan la viabilidad del proyecto. Además, facilita la comparación entre distintas tecnologías o escalas de producción.

En conjunto, estos tres elementos forman una base sólida para tomar decisiones estratégicas en el ámbito industrial. La evaluación económica no es un trámite administrativo, sino una herramienta poderosa que transforma ideas en proyectos concretos y sostenibles. En un entorno global cada vez más competitivo, donde la eficiencia y la rentabilidad son esenciales, dominar estas técnicas permite a los profesionales diseñar procesos que no solo funcionen bien, sino que generen valor. Así, la evaluación económica de procesos se convierte en un puente entre la ingeniería y la gestión, entre la innovación técnica y el éxito empresarial.

Complementos educativos

Ejercicios prácticos (Excel)

[UNIDAD III. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE PROCESOS. EJERCICIO PRÁCTICO.xlsx](#)

Presentación (PowerPoint)

[UNIDAD III. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE PROCESOS.pptx](#)

Cuestionario de evaluación (Socrative)

[UNIDAD III. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE PROCESOS. CUESTIONARIO.docx](#)

Unidad IV. Optimización de procesos

La optimización de procesos se trata de un conjunto de actividades destinadas a aumentar la productividad del sistema, así como mejorar las distintas fases y técnicas. El objetivo es producir grandes resultados, con la mayor calidad posible, utilizando la menor cantidad de recursos, incluidos el tiempo. En este aspecto, la optimización de procesos suele incluir la eliminación de pasos innecesarios y la introducción de innovaciones.

Aumentar la presión para reducir costes, mejorar la calidad del producto, minimizar riesgos medio ambientales, son algunas de las motivaciones para desarrollar herramientas de optimización para los complejos problemas de operación y diseño de una planta química. Varios factores han contribuido a este desarrollo. En primer lugar, la disponibilidad de ordenadores y su creciente capacidad de cálculo ha facilitado la aplicación de complejos modelos matemáticos. En segundo lugar, el desarrollo y mejoría de los modelos económicos que permiten decidir entre diferentes procesos competitivos. Y en tercer lugar el reciente desarrollo del software para optimización que ha proporcionado la herramienta adecuada para el uso de los modelos matemáticos tanto de operaciones físicas como económicas, para la identificación de las mejores soluciones. De hecho, muchas de las decisiones en la industria química relacionadas con diseño de procesos y operaciones están basadas en técnicas de optimización que combinan los nuevos desarrollos en algoritmos de optimización, modelado de sistemas, y arquitectura y software de ordenadores.

Aunque muchas de las técnicas matemáticas fueron desarrolladas por investigadores relacionados con investigación de operaciones, análisis numérico y ciencia de los ordenadores, los ingenieros químicos han jugado un importante papel en alguno de estos desarrollos (de hecho, un importante porcentaje de las personas implicadas en investigación de operaciones son ingenieros químicos).

La optimización de procesos suele implicar la introducción de mejoras en una serie de áreas, como la maquinaria, los bucles de control, la supervisión de la calidad, la programación del mantenimiento, etc., resultando en la obtención de procesos que, en general, son más eficaces.

4.1. Modelación de procesos

Es sabido que el procedimiento metodológico fundamental para resolver un problema en ingeniería consiste en representarlo de una manera adecuada, de tal forma de lograr una sustitución del sistema real (equipo, proceso, etc.) por uno más adecuado para el tratamiento formal. Por lo general, las herramientas lógico-matemáticas nos brindan un marco útil para representar mediante un sistema de símbolos y reglas, el comportamiento de los sistemas reales.

Bajo el método científico, por ejemplo, se consolidan leyes y teorías en diversas ramas del conocimiento, las cuales son expresables por medio de sistemas de ecuaciones diferenciales. En otras palabras, se logra construir un nuevo sistema del cual conocemos sus reglas de juego y símbolos, como un resultado de un proceso de abstracción de la realidad. Obviamente, dado la infinita complejidad de los fenómenos fisicoquímicos, estas construcciones abstractas, conocidas genéricamente como modelos, son sólo meras aproximaciones de la realidad. En efecto, no es otra cosa lo que se realiza cuando en física utilizamos ecuaciones para describir el movimiento de una partícula, o resolvemos los balances correspondientes aplicando las leyes de conservación de la materia, energía o cantidad de movimiento; o bien cuando nos enfrentamos al diseño de un equipo según los procedimientos que conocemos a partir del campo de las operaciones unitarias.

De aquí se desprende que, si bien el sistema real a estudiar es único, puede existir un número muy grande de modelos asociados al mismo. En efecto, para obtener un modelo que pueda resolverse (es decir que sea útil), resulta necesario adoptar un conjunto de hipótesis. Por ejemplo, si consideramos la fricción, si es importante o no contemplar el intercambio de energía por radiación, si existen y se consideran los efectos electromagnéticos, etc. Las necesidades de exactitud que el problema a resolver nos impone, determinan el conjunto de hipótesis a utilizar. Por ejemplo, el error de una milésima de grado en el cálculo de un ángulo puede no tener implicancias en el punto de impacto de un proyectil que recorre una distancia pequeña, pero no puede afirmarse lo mismo para una trayectoria intergaláctica. En síntesis, dado el sistema real y los objetivos tecnológicos perseguidos, existirá un conjunto de hipótesis adecuadas que determinarán las características del modelo, o sistema de ecuaciones a resolver. Lo expresado recientemente implica una relación entre modelo (conjunto de hipótesis asumidas) y objetivos del ingeniero.

Resulta evidente que no todo sistema de ecuaciones puede resolverse fácilmente, al menos desde el punto de vista analítico. Esto impuso a lo largo de la historia limitaciones importantes al tipo de modelos que podían resolverse, o de otra forma, la necesidad de recurrir a hipótesis inadecuadas o restrictivas (super simplificaciones) para al menos poder tratar el problema. Es por ello también que en los orígenes de las ciencias tecnológicas los modelos podían ser considerados en gran medida como empíricos, esto es, con parámetros incorporados que surgían de experiencias, y no a partir de los primeros principios o leyes fundamentales. No debe extrañar que aún hoy, pese a todos nuestros avances, exista la necesidad de utilizar permanentemente parámetros en nuestros modelos, que no son otra cosa que la medida de nuestra ignorancia, y, por lo tanto, implican la necesidad de reemplazar las leyes básicas por aproximaciones causales obtenidas de datos experimentales. Este es el caso por ejemplo de la estimación de las propiedades de equilibrio de mezclas de comportamiento altamente no ideal.

A medida que evolucionaron las diversas ramas de las matemáticas y con el advenimiento de la ciencia de la computación, poderosa herramienta complementaria al análisis numérico y simbólico, se abrieron caminos revolucionarios. Contar con herramientas más potentes para resolver sistemas de ecuaciones, o lo que es lo mismo, relativizar la necesidad de adoptar hipótesis inadecuadas al plantear modelos para resolver problemas complejos, resultó un gran paso adelante. Más aún, la velocidad de cálculo provocó que la dimensión abordable se incrementara rápidamente. En efecto, si bien el grado de complejidad conceptual para resolver la inversa de una matriz de dimensión tres es equivalente al de una de cinco mil, resulta obvio que la complejidad operativa o fáctica no resulta comparable. La computación ha barrido literalmente con dicha limitación, haciendo ahora tratables problemas cuya dimensión es tal, que décadas atrás ni siquiera era pensable plantearlos.

En síntesis, al tratar el problema del modelado desde un punto de vista integral, debemos discutir conceptualmente los diversos enfoques que se utilizan, así como las herramientas matemáticas necesarias para su tratamiento.

¿Qué es la modelación de procesos?

La modelación de procesos implica la construcción de un modelo matemático mediante la descripción de sus relaciones físicas y química fundamentales. No es requisito especificar cómo han de ser resueltos.

Schlesinger propone la metodología de constatación de modelos como se observa en la siguiente figura:

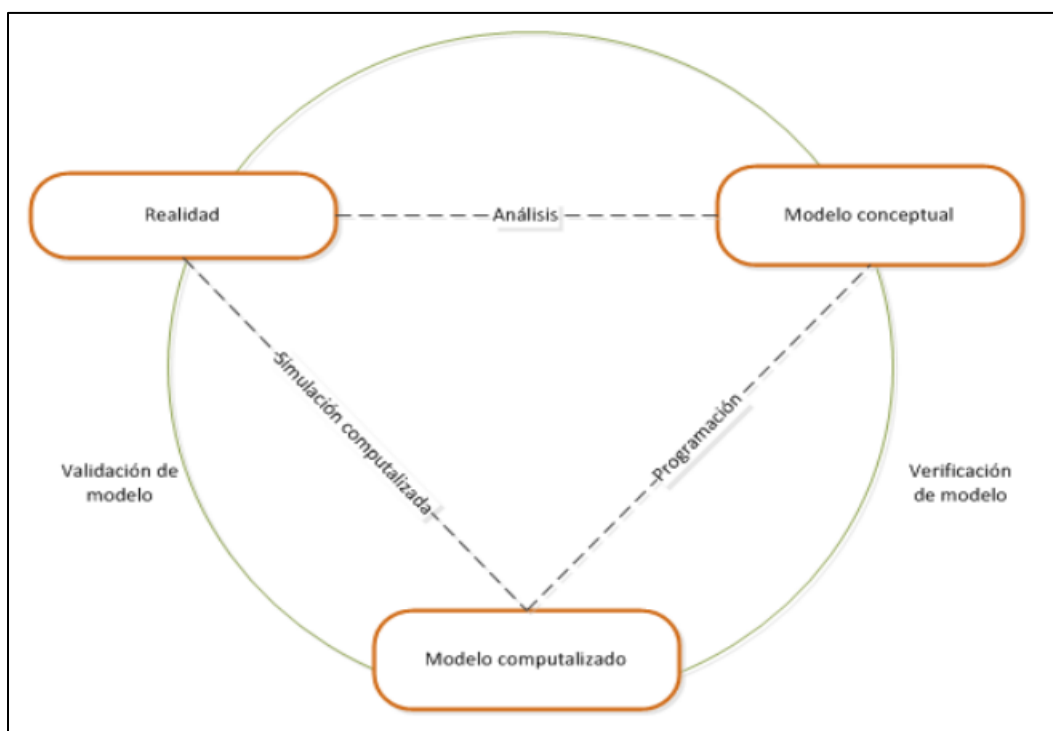


Figura. 11 Metodología de modelado.

La credibilidad del modelo es una característica fundamental. La verificación y validación del mismo son imprescindibles.

Los modelos ayudan en la toma de decisiones para conseguir que sean mejores, más rápidas y más seguras reduciendo con ello la incertidumbre.

Se ha realizado una gran cantidad de esfuerzos para desarrollar modelos nuevos y mejorados para el cálculo de propiedades. Esto incluye, por ejemplo:

- Propiedades termo-físicas como presiones de vapor, viscosidades, datos calóricos, etc. de los componentes puros y mezclas.
- Propiedades de los diferentes aparatos como reactores, columnas de destilación, bombas, etc.

- Reacciones químicas y cinéticas.
- Datos ambientales y de seguridad.

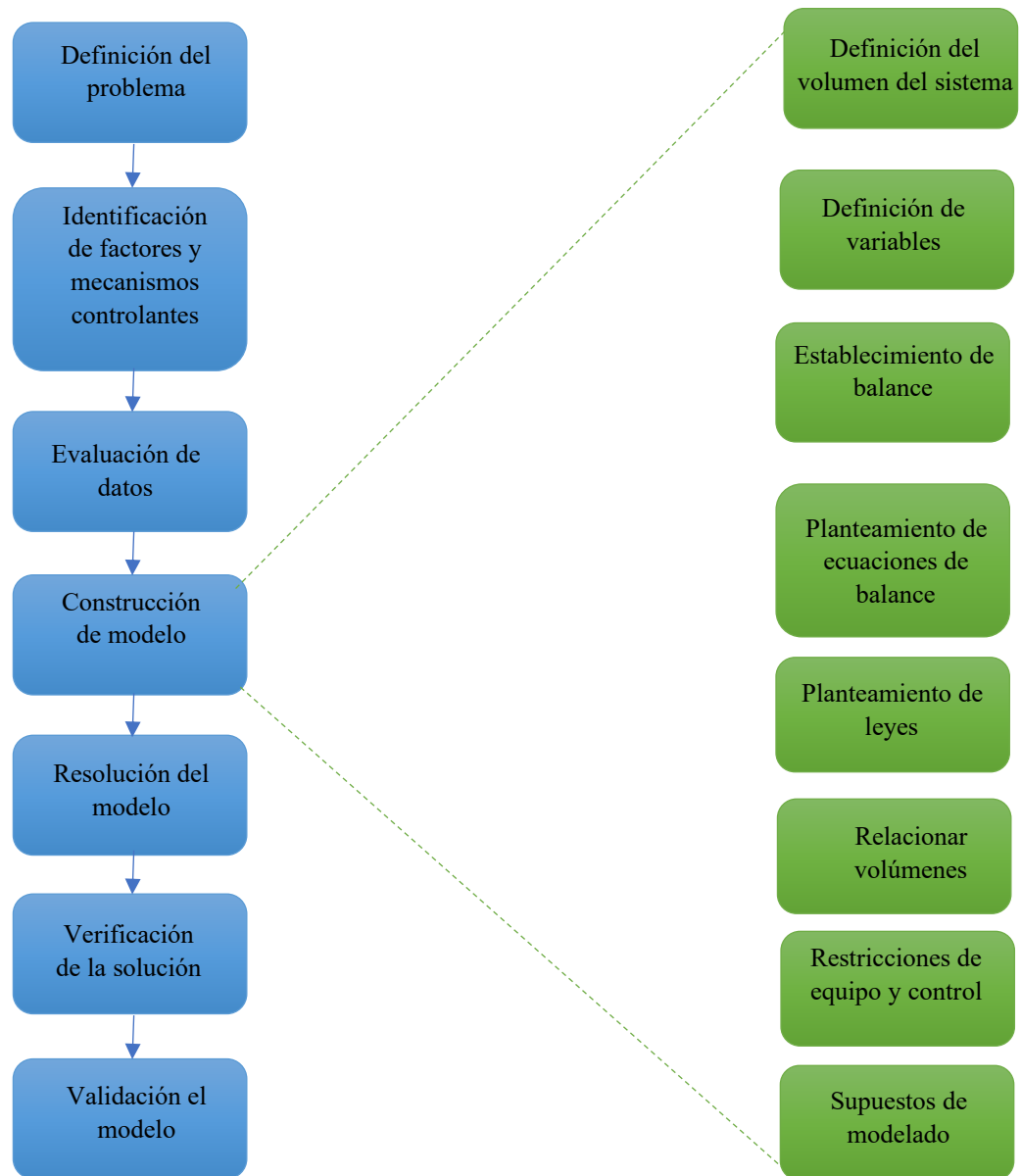


Figura. 12 Metodología de modelado vertical.

Los pasos a seguir para la realización del modelado del proceso se muestran en la Figura 12. A continuación se muestra de que trata cada uno de ellos,

5. Definición del problema.
6. Describir el proceso a modelar y el objetivo.
7. Especificar entradas y salidas
8. Especificar el grado de exactitud requerido y el ámbito de aplicación
9. Especificar las características temporales Especificar la distribución espacial.

Identificación de factores y mecanismos controlantes. ¿Qué procesos fisicoquímicos y qué fenómenos suceden? Estos pueden ser reacciones químicas, difusión de masa, conducción de calor, transferencia de calor por convección, evaporación, etc.

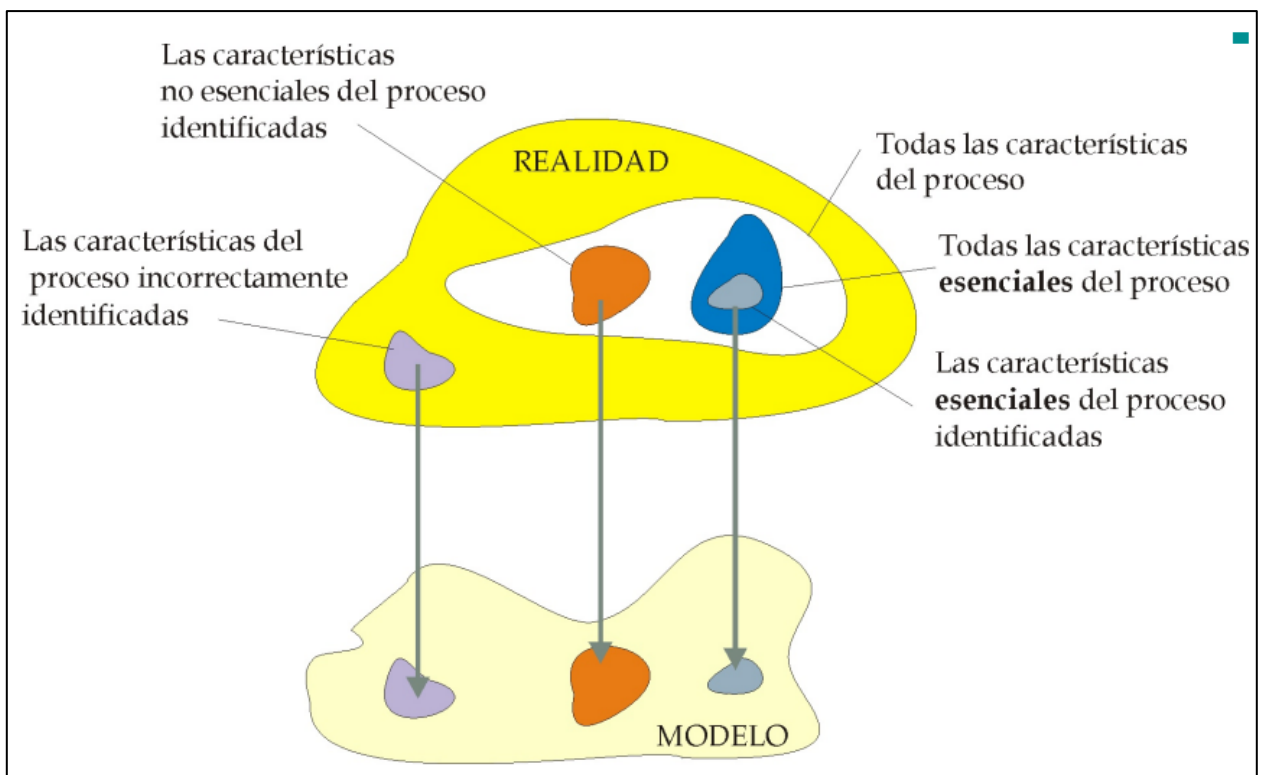


Figura. 13 Diagrama de la identificación de factores y mecanismos controlantes.

1. Evaluar datos.
2. Evaluar los datos empíricos de que disponemos y su exactitud.
3. Evaluar los parámetros de que disponemos y su exactitud.

4. Si faltan datos o parámetros puede ser que el problema haya que redefinirlo.
5. Construir el modelo.
6. Desarrollar las ecuaciones del modelo.
7. Procedentes de principios de conservación (serán ecuaciones algebraicas/diferenciales)
8. Procedentes de ecuaciones constitutivas (serán en general ecuaciones algebraicas).
9. Verificar que el modelo está correctamente especificado: *análisis de los grados de libertad*.
10. Verificar la consistencia del modelo: chequeo de unidades y dimensiones.

La construcción del modelo cuenta con un subprocedimiento:

- Establecer los volúmenes donde se van a realizar los balances de materia, energía y momento.
- Determinar qué variables (total, componentes, molar o másica,) van a caracterizar el sistema: entradas, salidas y estados internos.
- Plantear los balances de conservación: materia, energía y momento.
- Plantear las ecuaciones de transporte de calor, masa y momento entre los diferentes volúmenes.
- Establecer las leyes termodinámicas, como ecuaciones de estado.
- Relación entre diferentes volúmenes donde se aplican las ecuaciones, por ejemplo, entre diferentes fases.
- Definir las restricciones del proceso, bien sean por operación o por control.
- Definir y aplicar las suposiciones del modelo.

Resolver el modelo.

- Identificar la forma matemática del modelo (generalmente AEs/ODEs/ DAEs)
- Escoger un procedimiento (método numérico) de resolución.
- Intentar evitar problemas matemáticos (como “alto índice”) que dificultan el uso de métodos estándar de resolución.
- Verificar la solución del modelo.
- Verificar si el modelo se comporta correctamente.
- Verificar la correcta implementación (código del programa) del modelo.

- Validar el modelo.
- Se chequea el modelo (los resultados de su simulación) con la realidad modelada.
- Posibilidades de validar el modelo:
- Verificar las suposiciones de forma experimental.
- Comparar el comportamiento del modelo y del proceso real.

Comparar el modelo con datos del proceso.

Realizar validaciones estadísticas: contraste de hipótesis, cálculo de medias, distribuciones, varianzas. Corregir el modelo, si los resultados de la validación no son de la exactitud especificada al formular la definición del modelo.

Tipos de modelos

Existen dos tipos principales de modelos:

1. Basados en ecuaciones bastante simples y correlaciones donde los parámetros se ajustan a los datos experimentales.
2. Basados en métodos predictivos donde las propiedades son estimadas.

Para obtener parámetros fiables, es necesario disponer de datos experimentales que generalmente se obtienen a partir de bancos de datos o, si no hay datos disponibles, a partir de las mediciones.

El uso de métodos de predicción es mucho más económico que el trabajo experimental o el uso de las bases de datos. A pesar de esta ventaja, estos métodos introducen errores mayores que las correlaciones obtenidas a partir de datos experimentales. Es por ello que las propiedades predichas normalmente sólo se utilizan en las etapas tempranas del proceso de desarrollo para así poder encontrar soluciones aproximadas primero y excluir las vías equivocadas.

En función de los procesos que se desea modelar, existen modelos estáticos y modelos dinámicos. Los modelos estáticos suelen ser más sencillos que los procesos dinámicos. Mientras que los modelos dinámicos contienen términos diferenciales para definir el dinamismo del proceso.

Principios de conservación

Se basan en los principios físicos que indican que la masa, la energía y el momento no pueden ser ni creados ni destruidos sino solo transformados.

Se establecen sobre una región de interés (con un volumen y una superficie asociada). Esta región se suele denominar volumen de control. Los volúmenes de control muchas veces se establecen de acuerdo a:

Los volúmenes físicos de los equipos.

Las diferentes fases presentes en un equipo.

El balance dinámico sobre el sistema viene dado por:

$$\begin{aligned} & \textbf{Cambio en el tiempo} \\ & = E_{frontera} - S_{frontera} + \textbf{Generación} - \textbf{Consumo} \end{aligned}$$

Donde $E_{frontera}$ = *Entrada en la frontera*; $S_{frontera}$ = *Salida en la frontera*

Este balance se aplica a masa, energía y momento.

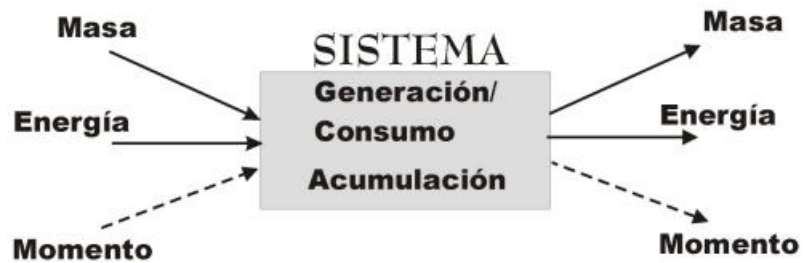


Figura. 14 Diagrama de balance.

Sistemas agrupados dinámicos

Balance de masa global

$$\frac{dm}{dt} = \rho_{in} v_{in} A_{in} - \rho_{out} v_{out} A_{out} = F_{in} - F_{out}$$

Balance de masa expresado en moles

$$\frac{dn_i}{dt} = n_{i,in} - n_{i,out} + r_i V$$

Consideraciones

Los balances de materia se pueden establecer en masa o en moles.

El principio de conservación sólo se aplica a la masa global, por tanto, si se expresa el balance de materia global en moles hay que tener en cuenta el término de generación/consumo por reacción.

En los balances a componentes, sean en masa o en moles siempre hay que tener en cuenta el término generación/consumo por reacción.

Balance de energía

La transmisión de energía puede ser por flujos masicos, conducción, radiación de calor o por trabajo.

$$\frac{dH}{dt} = F_{in}H_{in} - F_{out}H_{out} + Q_c + Q_r + W_s + W_F + rV(-\Delta H_R)$$

Balance de momento

Las fuerzas que generan momento son las fuerzas gravitatorias, fuerzas de fricción, fuerzas de cizalla y fuerzas de presión.

$$\frac{d(Mv)}{dt} = M - M_0 + f_g + f_p + f_f + f_c$$

Las ecuaciones generadas por estos balances en sistemas agrupados dinámicos son ecuaciones diferenciales ordinarias

Sistemas agrupados estacionarios

No hay evolución temporal, por lo que el tiempo deja de ser una variable. No hay acumulación de energía, masa o momento en el sistema, dado que estamos en el estado final del equilibrio.

Todos los términos de las variables de estado (en términos de acumulación) que son las derivadas temporales se igualan a cero.

Balance de masa

$$0 = F_{in} - F_{out}$$

Balance de masa expresado en moles

$$0 = n_{i,in} - n_{i,out} + r_i V$$

Balance de energía

$$0 = F_{in}H_{in} - F_{out}H_{out} + Q_c + Q_r + W_s + W_F + rV(-\Delta H_R)$$

Balance de momento

$$0 = M - M_0 + f_g + f_p + f_f + f_c$$

Las ecuaciones generadas por estos balances en sistemas agrupados estacionarios son ecuaciones diferenciales algebraicas

Ecuaciones constitutivas

Son ecuaciones algebraicas que junto con las ecuaciones procedentes del balance conforman el modelo. Estas ecuaciones relacionan las cantidades conservadas (variables extensivas) con variables intensivas:

- Definen cantidades físico-químicas como densidades, entalpías, etc.
- Definen las tasas de transferencia (masa, energía, etc.)
- Definen otras relaciones que permiten constituir el modelo.
- Se pueden establecer 5 grupos que establecen ecuaciones constitutivas:
- Fenómenos de transferencia: masa, calor/energía y momento.
- Expresiones de cinéticas de reacción.
- Equilibrio químico.
- Relaciones termodinámicas.
- Relaciones entre volúmenes de control.
- Restricciones de equipos, control, etc.
- *Fenómenos de transferencia*

Tabla 2. Tabla de transporte molecular (fenómenos microscópicos).

Cantidad	Calor	Masa	Momento
<i>Flujo</i>	q	N_A	τ_z

Fuerza	$\partial T / \partial z$	$\partial C_A / \partial z$	$\partial v_z / \partial z$
Propiedad	Conductividad k_T	Difusividad D_A	Viscosidad μ
Ley	Fourier	Fick	Newton
Relación	$q = k_T \cdot \partial T / \partial z$	$N_A = D_A \cdot \partial C_A / \partial z$	$\tau_z = \partial v_z / \partial z$

Tabla 3. Tabla de transporte global (fenómenos macroscópicos).

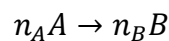
Cantidad	Calor	Masa	Momento
Flujo	q	N_A	τ_z
Fuerza	ΔT	ΔC_A	ΔP
Propiedad	Transferencia de calor h_T	Transferencia de masa k_L	Fricción
Relación	$q = h_T \Delta T$	$N_A = N_A \Delta C_A$	Factor fricción

Descripción cinética

Las expresiones cinéticas dependen mucho del tipo de aplicación y del sistema multifase de que se trate.

La geometría, reacciones laterales, inhibiciones hacen que en la práctica se tengan expresiones complicadas.

Para una reacción simple:



$$r = kC_A^n; k = k_0 e^{-\frac{E_A}{RT}}$$

Equilibrio químico

Queda descrito como:

$$\sum_{j=1}^{NC} v_j \mu_j = 0$$

Donde v_j son los coeficientes estequiométricos y μ_j son los potenciales químicos.

Relaciones termodinámicas

Importancia de las propiedades físicas

Cualquier programa de simulación de procesos suele contener un servicio de propiedades físicas. La calidad del diseño, simulación o estudio de un proceso depende de la forma en que las leyes físicas y químicas son aplicadas al problema.

Las tareas principales que debe proporcionar un servicio de propiedades físicas son:

- Suministrar de forma reiterada estimaciones de un número de diferentes propiedades físicas durante la ejecución de la simulación
- Proveer al usuario de valores de las propiedades de interés durante el cálculo o bien al final de la simulación.
- Permitir al usuario introducir sus propios datos para nuevos componentes y emplearlos en el paquete de simulación
- Proporcionar al usuario una forma de estimar de forma media las propiedades de compuestos de los que se sabe poco más que su estructura.
- El cálculo de las propiedades físicas se lleva gran parte del tiempo del cálculo total de las simulaciones.
- Dependiendo del problema y del programa empleado el tiempo dedicado a las propiedades físicas puede ser del orden del 80%.
- Cualquier preprocesamiento que se pueda hacer es por tanto muy necesario.
- Relaciones entre propiedades.

Son relaciones no-lineales entre variables termodinámicas.

Densidad

$$\rho = f(P, T, x)$$

Entalpía

$$h = g(P, T, x)$$

Donde T es temperatura, P es presión y x es fracción molar.

Ecuaciones de estado

Relacionan presión, volumen y temperatura para sistemas de un componente y para mezclas multicomponente.

Ecuación de gases ideales

$$PV = nRT$$

Propiedades involucradas

Las propiedades involucradas en los diferentes modelos de unidades de operación se pueden resumir:

Propiedades termodinámicas:

- Coeficiente de fugacidad (o equivalente: potencial químico, K-value,)
- Entalpía
- Entropía
- Energía de Gibbs
- Volumen (y magnitudes relacionadas)
- Propiedades de transporte:
- Viscosidad
- Conductividad térmica
- Coeficiente de difusión
- Tensión superficial

Es fundamental elegir una opción correcta para que los resultados de la simulación puedan ser válidos. Existen muchos métodos desarrollados para diferentes aplicaciones, se elige en función:

De los componentes que participan.

De la interacción entre estos componentes (qué tipo de mezclas forman: polar, no polar, ideal, con asociación, etc.),

De las condiciones en que se desarrolla el proceso (rangos de temperatura, presión, etc.).

De la presencia de electrolitos.

De la presencia de sólidos.

De la disponibilidad de parámetros.

Relaciones entre volúmenes de control y restricciones

Las relaciones entre volúmenes de control se dan cuando existen varias fases que están confinadas en un recipiente. Los sistemas de proceso siempre están sometidos a un control para garantizar que cumplen las especificaciones, esto implica que muchas veces es necesario modelar los elementos que componen el sistema de control: sensores, transmisores, controladores, actuadores. Ciertas restricciones debidas a los equipos o modos de operación pueden tener que ser incluidas igualmente en los modelos.

4.2. Optimización de una variable

Un problema de optimización en una variable se puede plantear como un problema de maximización o minimización como sigue:

$$\max_{x \in D} f(x) \text{ ó } \min_{x \in D} f(x)$$

Donde “max” nos indica lo que se desea realizar en el problema y $f(x)$ nos dice qué es lo que se desea optimizar.

Para un problema general se debe identificar: primero, qué se quiere hacer (maximizar o minimizar), si se desconoce se puede colocar “opt” en su lugar que querrá decir “optimizar”. Segundo, ¿qué se quiere optimizar? Generalmente suele ser una función o funciones de una variable. Y tercero, se buscan los valores de x que optimizan la función con el dominio de esta.

Modelo lineal

Consiste en una función lineal sujeta a restricciones lineales; estructurada mediante un algoritmo matemático, que brinda una amplia gama de soluciones factibles hasta obtener una óptima.

En la investigación de operaciones determinística se tiene una serie de métodos lineales, los cuales contienen una estructura matemática bastante útil, para obtener una solución óptima según el tipo problema que se tenga a resolver, entre otros podemos mencionar: el método gráfico, simplex, gran M, análisis post óptimo, dual, dual simplex, transporte y asignaciones agrupados en la rama de la programación lineal.

Existe una gran cantidad de problemas dentro de los procesos productivos, administrativos y financieros, que requieren de la aplicación de una técnica determinada para su solución; esta técnica nos la facilita los modelos lineales, a través de los diferentes métodos con que cuenta.

Generalmente, los problemas que se plantean solucionar por medio de los diferentes modelos ya expuestos (método gráfico, simplex, gran M, análisis post óptimo, dual, dual simplex, transporte y asignaciones), deben ser planteados de la siguiente forma:

Identificar las variables de decisión necesarias para la solución del problema.

Formular la función objetivo, (F,O) que se va a optimizar, ya sea maximizando o minimizando.

Formular las restricciones con el fin de demarcar la disponibilidad de los recursos limitados para formular el problema.

Cumplir la propiedad de proporcionalidad. Significa que la función objetivo y las restricciones deben guardar una proporcionalidad en el ámbito de contribución de cada variable, de acuerdo con una disponibilidad de recursos.

Cumplir la propiedad de divisibilidad. Es decir, que sea posible asignarles valores fraccionarios a las variables. Esta es una consideración importante en los casos en que se trabaje con sistemas de producción o asignación de artículos discretos. En tanto que no es posible garantizar que las soluciones encontradas, los valores de sus variables sean enteras.

Cumplir la propiedad de actividad. Significa que la función objetivo sea la suma de las contribuciones de las variables. Esto es que el total sea igual a la suma de las partes y que no hay efecto de interacción entre los niveles de cada variable.

Cumplir la condición de no negatividad. Que todas las variables que se vayan a utilizar dentro del problema a resolver deben ser de la condición fundamental y necesaria, mayores e iguales a cero ($x_j \geq 0$); ya que no es posible producir u obtener valores negativos de las variables como resultado.

En el planteamiento del problema se hace necesario realizar un análisis conceptual básico de las variables a considerar, ya sea realizando suposiciones y simplificaciones de tal forma que se logre una estructura ideal del modelo.

Así mismo, en la formulación del problema se requiere que el diseñador seleccione y aísle del entorno total, todos aquellos aspectos de la realidad que no son pertinentes para su fundamentación. Ello nos permite analizar en las empresas, organizaciones y tipos de negocios, solamente lo que nos ocupa de las decisiones y objetivos necesarios para la formulación del problema, los cuales deben ser identificados y definidos de un modo explícito.

Cuando se va a construir un modelo de optimización, el problema más significativo es plantear las variables de decisión, que lo formarían; para ello se presenta el siguiente

diagrama estructural de las variables a considerar, el cual representa la problemática tanto interna como externa a analizar, estas pueden ser de dos formas: endógenas y exógenas.

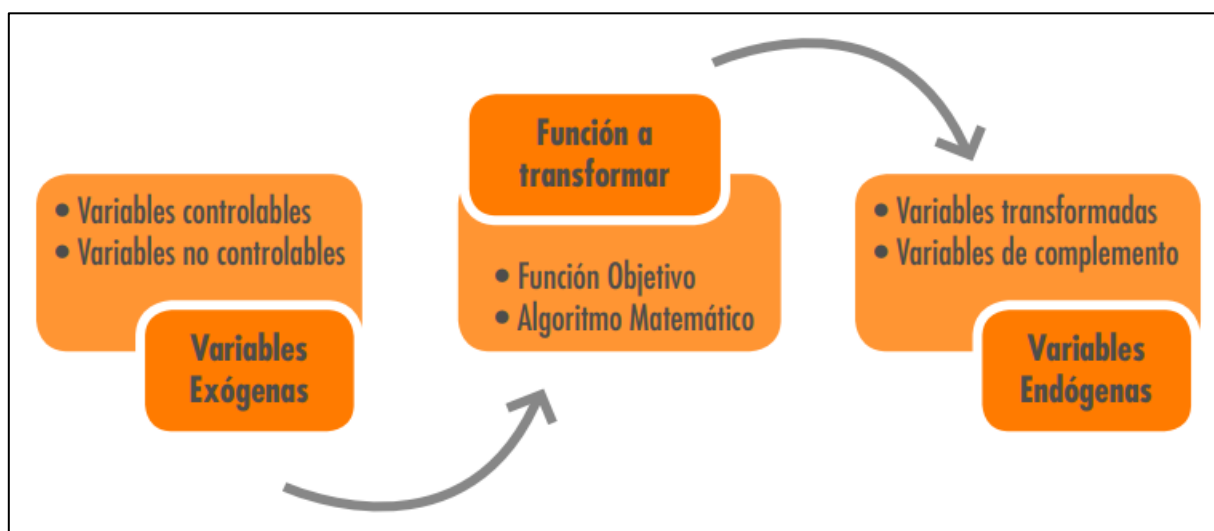


Figura. 15 Diagrama de variables exógenas y endógenas.

Al identificar las variables de entrada; las definimos como variables exógenas, las cuales a su vez están divididas en variables controlables que son las que maneja los directivos (gerente), y variables no controlables que están bajo control de otras personas o del entorno.

Por su parte, las variables endógenas se pueden considerar como variables transformadas, y permiten establecer qué tanto se ha cumplido con los objetivos y metas; llamadas también variables de complemento, son variables que indican otras posibles alternativas que se pueden considerar en la solución del modelo. Las variables transformadas tienen gran relevancia porque conllevan aquellas consideraciones utilizadas que indican qué tanto se ha logrado respecto a lo planeado. Por esta razón, a las variables transformadas se les llama variables optimizadas.

En cuanto a la función a transformar; esta también se divide en dos; función objetivo y algoritmo matemático, aquí es donde mediante el modelo matemático encontrado, se transforman las variables y salen transformadas según condiciones planteadas en el problema principal.

Pasos para formular el modelo

Al formular el modelo, se requiere de una estructura matemática, conformada por una serie de parámetros, los cuales se deben plantear de la siguiente manera.

Definir las variables de decisión (x). El número de variables a considerar depende del problema a resolver. Estas variables deben argumentarse cuando se esté elaborando el modelo, en su dimensión y unidad de medida.

Definir la función objetivo. Es la función elaborada para lograr la optimización de las variables del problema, las cuales deben estar interrelacionadas para poder generar un “resultado total”, es decir, puede dejarse de fabricar un producto (variable) para fabricar o utilizar una mayor cantidad de otro producto (variables).

Definir las restricciones. (C, S, R) que significa “con las siguientes restricciones”; las cuales deben estar relacionadas con la disponibilidad y uso de los recursos, esto quiere decir que existen limitaciones en la disponibilidad de recursos para el cubrimiento de la demanda; los cuales deben ser de forma lineal.

Definir la condición de no negatividad. Significa que los valores de las variables deben ser mayores o iguales a cero.

Definir el modelo matemático. Una vez se han definido los anteriores pasos, se procede a elaborar el modelo matemático.

Formulación del modelo

Una vez elaborados los anteriores pasos, procedemos a formular el modelo de acuerdo con el algoritmo matemático requerido según el problema, así:

Variable de decisión: existen dos tipos de variables de decisión; una sin referencia y otra con referencia; entendiéndose con referencia, por ejemplo, una empresa que posee varios centros de distribución, la referencia sería los centros de distribución.

Variable de decisión sin referencia; como por ejemplo una empresa que produce varios productos.

$$x_j \text{ para toda } j=1 \dots n$$

Donde la variable x, es la que vamos a optimizar según tipo de problema, y el subíndice “j” nos indica cuántas son las variedades de productos a considerar en el problema.

Variable decisión con referencia; aquella que tiene un centro de origen y varios lugares a donde llegar, la forma de esta variable es como sigue:

x_{ij} para todo $i=1\dots m; j=1\dots n$

Donde la variable x , que es la que vamos a optimizar según tipo de problema, tiene dos subíndices, el subíndice “ i ” que nos indica los lugares relacionados con las variables, y el subíndice “ j ” nos indica cuántas son las variedades de esas variables a considerar en el problema.

La función objetivo (F, O); corresponde a la función que vamos a optimizar; esta función puede tomar dos formas para su optimización, una buscando maximización y otra buscando minimización, su forma matemática es como sigue:

Sin referencia:

$$\text{Max o Min } f(x) = \sum_{j=1}^n C_j X_j$$

Con referencia:

$$\text{Max o Min}(Z) = C_{11}X_{11} + C_{21}X_{21} + \dots + C_{mn}X_{mn}$$

En una forma general será:

$$\text{Max o Min } f(Z) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij}$$

Las restricciones serán las limitaciones de los recursos disponibles con que se cuenta para la solución del problema. Estas presentan la siguiente estructura matemática:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{2n} \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & x_{2n} \\ x_{m1} & x_{m2} & x_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_m \end{bmatrix}$$

Formada a partir de dos matrices, la matriz de los coeficientes técnicos y la matriz de las variables, igualado al vector de los recursos disponibles.

La condición de no negatividad; que corresponde a que todas las variables contempladas en el modelo deben ser positivas es decir mayores e iguales a cero.

$$X_j \text{ o } X_{ij} \geq 0$$

Donde $i=1 \dots m$ y $j=1 \dots n$.

La formulación del modelo matemático; que es la representación de todas las anteriores expresiones, se resume así:

Sin referencia

$$\text{Max o Min}(Z) = C_1X_1 + C_2X_2 + C_3X_3 \dots + C_nX_n$$

c.s.r

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 \dots + a_{1n}x_n \leq \geq b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 \dots + a_{2n}x_n \leq \geq b_2 \dots$$

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + a_{m3}x_3 \dots + a_{mn}x_n \leq \geq b_m$$

$$X_j \geq 0 \text{ Para } i = 1 \dots m; j = 1 \dots n$$

Con referencia

$$\text{Max o Min}(Z) = C_{11}X_{11} + C_{12}X_{12} + C_{13}X_{13} \dots + C_{mn}X_{mn}$$

c.s.r

$$a_{11}x_{11} + a_{12}x_{12} + a_{13}x_{13} \dots + a_{1n}x_{1n} \leq \geq b_1$$

$$a_{21}x_{21} + a_{22}x_{22} + a_{23}x_{23} \dots + a_{2n}x_{2n} \leq \geq b_2 \dots$$

$$a_{m1}x_{m1} + a_{m2}x_{m2} + a_{m3}x_{m3} \dots + a_{mn}x_{mn} \leq \geq b_m$$

$$X_{ij} \geq 0 \text{ Para } i = 1 \dots m; j = 1 \dots n$$

Conceptualización y equivalencias

El término C_{ij} es el coeficiente de contribución, es decir mide el aporte de las variables a la optimización de la función.

Por su parte, el término a_{ij} coeficiente técnico, es un valor estandarizado de acuerdo con un estudio de tiempo y movimientos, que indica lo requerido por la variable según la disponibilidad de recursos. Ello se puede expresar como la cantidad de recurso j que se necesita por cada unidad de la actividad i .

El b_1 significa la cantidad de recursos con que se cuenta para resolver el problema.

Mientras que la X_{ij} es la cantidad de unidades de la actividad i obtenida del recurso j .

Solución factible. Es aquella solución que satisface las condiciones limitantes de los recursos.

Solución factible básica. Es la que se posee con no más de m componentes positivos.

Solución básica factible degenerada. Es el caso cuando hay menos de m componentes positivos de las variables X ; ello quiere decir que en el área de solución existe un valor cero.

Región de factibilidad. Es el conjunto de todas las posibles soluciones factibles.

Convexidad. Cuando existe una solución factible, hay una región convexa. Una región es convexa, si un plano es convexo; un subconjunto del plano es convexo; si para cada par de puntos A, B los puntos contienen todo el segmento rectilíneo que los conecta.

Ejemplo de un área convexa

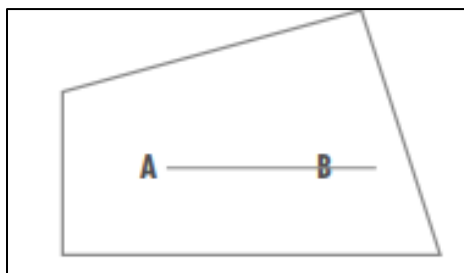


Figura. 16 Plano convexo.

$$\text{Max o Min } f(Z) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij}$$

Ejemplo de un área no convexa

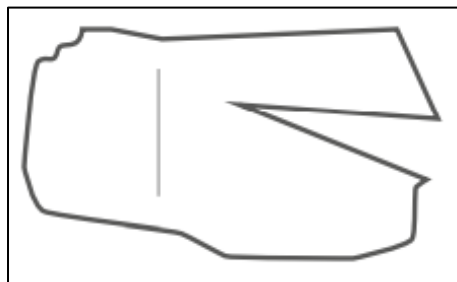


Figura. 17 Plano no convexo.

Características del modelo lineal

En la formulación de un modelo lineal, se debe tener en cuenta lo siguiente:

La condición de linealidad; es decir no se deben considerar las siguientes expresiones:

X_1X_2 ; a^2X_1 ; $X_1^2a_1$; $\text{Log } X_1$.

No se aceptan expresiones en restricciones $x_j < 0$; es decir, tener valores de variables negativas.

No contar con limitaciones de recursos negativos ($-b_i$)

La función objetivo (F.O) que tenga la expresión $\text{Max } z = -X_1 - 2X_2$ se puede multiplicar por (-1), dando como resultado $\text{Min } z = X_1 + 2X_2$.

El modelo asume algunas propiedades de aditivas y multiplicativas:

- Si el producto A necesita 1 hora de la actividad 1 y el producto B 1.5 horas de la actividad 1, ambas necesitan 2.5 unidades.
- Si una unidad del producto 1 necesita 3 horas; 6 necesitan 18 horas.
- Cuando se hable de m restricciones no se incluye la condición de no negatividad.
- La variable X_j puede ser no entera, por ejemplo 5.3 unidades
- Un conjunto de variables X_j que cumpla las m restricciones es una posible solución al problema.
- Si todas las variables son $X_j \geq 0$ es una solución factible.
- Si todas las variables de la solución factible optimizan la F.O es una solución factible óptima.

4.3. Programación dinámica

La utilización de la programación dinámica brinda una manera práctica de optimizar sistemas extensos que serían demasiado complejos para analizar mediante métodos de optimización directa. Más que ser simplemente una técnica de optimización, la programación dinámica implica organizar la estructura de información de un sistema de manera que pueda descomponerse en subsistemas más pequeños, facilitando así su análisis y optimización. Cada subsistema puede requerir un método de optimización específico en un momento dado. La ventaja de este enfoque radica en descomponer un problema de optimización de múltiples variables en una serie de problemas de optimización de una sola variable (o con un número de variables menor al problema original). En consecuencia, este método resulta atractivo al abordar funciones no lineales o no analíticas de manera efectiva.

La programación dinámica proporciona una secuencia óptima de decisiones. Para procesos químicos, esta técnica puede ofrecer el conjunto óptimo de variables de diseño que optimiza el rendimiento de un sistema completo según una función objetivo específica.

Principio de optimalidad de Bellman.

La programación dinámica se fundamenta en el principio de optimalidad de Bellman y se utiliza en sistemas sin ciclos en su flujo de información, lo que significa que los cálculos fluyen de la primera a la última variable sin reciclo. Según este principio, un sistema acíclico se optimiza cuando cada componente se optimiza individualmente para todas las posibles combinaciones de valores de las variables provenientes de las etapas anteriores. La aplicación de la programación dinámica sigue un orden inverso al flujo de materiales en el proceso.

La técnica implica analizar primero la última etapa del sistema para todas las combinaciones posibles de valores de entrada. Luego, se agrupan las entradas del final del diagrama y se consideran las posibles entradas para este nuevo grupo de unidades. Las soluciones tomadas en la última etapa se utilizan directamente en función de la salida de la penúltima etapa. Este proceso se repite hasta llegar a la primera etapa del diagrama, que es la última en analizarse. Al concluir este análisis numérico, la solución óptima se obtiene recuperando cada subóptimo de acuerdo con el flujo de información del problema original. Por lo tanto, el orden de aplicación de programación dinámica es el opuesto al del flujo de materiales en el proceso, como se muestra en la figura.

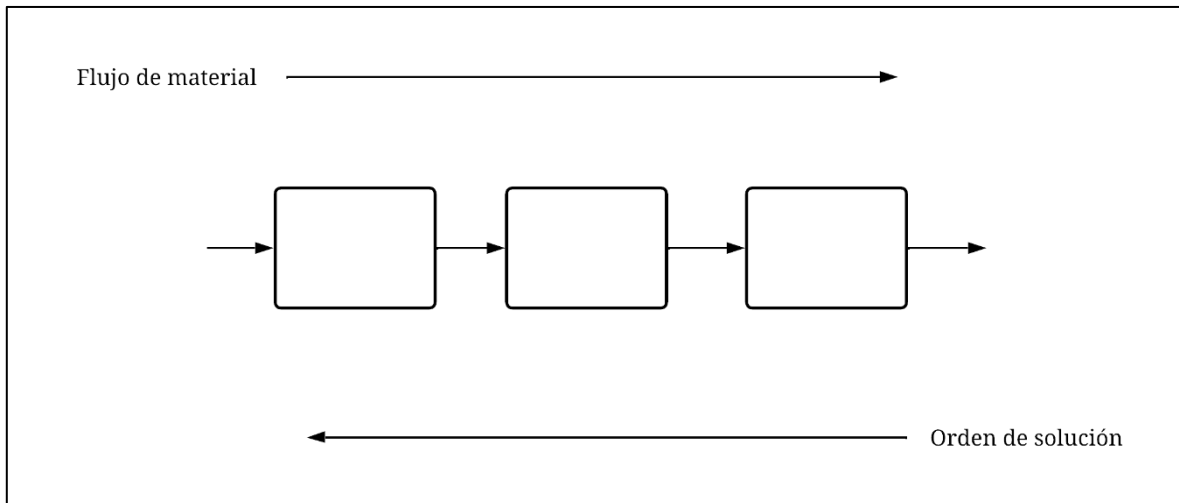


Figura. 18 Flujo de materiales en el proceso.

Tipos de aplicaciones

Consideremos el caso general de un problema de optimización de diversas variables, cuya solución requiere de un algoritmo de optimización multivariable.

La figura muestra el esquema de un sistema de este tipo para la aplicación de programación dinámica. Como ventaja, se asignan números a las etapas en sentido contrario al flujo de información, de modo que la primera etapa para el análisis corresponde a la última en el diagrama de flujo. En cada etapa, se identifican dos conjuntos de variables: uno de variables de estado, S , obtenidas al resolver el sistema de ecuaciones de esa unidad, y otro de variables de diseño, d . Debido a la forma en que se resuelve el problema, el análisis individual de cada etapa en términos de sus grados de libertad equivale a las variables de estado que provienen de la etapa anterior más las variables de diseño. Los grados de libertad relacionados con el primer conjunto de variables se satisfacen al suponer sus valores (anticipando todo el rango posible) según el principio de optimalidad de Bellman. Al asumir estos valores, los grados de libertad efectivos para cada etapa están asociados con las variables de diseño d , y para cada valor supuesto de las variables de entrada, se lleva a cabo una búsqueda de optimización.

Conclusión

La optimización de procesos representa una herramienta esencial en la ingeniería moderna, ya que permite mejorar el desempeño de sistemas industriales, reducir costos, aumentar la eficiencia energética y garantizar la sostenibilidad operativa. Este enfoque no se limita a

encontrar soluciones “buenas”, sino a identificar las mejores alternativas posibles dentro de un conjunto de restricciones técnicas, económicas y ambientales. A través de la modelación, la optimización de variables y la programación dinámica, se construye una metodología robusta para tomar decisiones informadas y estratégicas.

La **modelación de procesos** es el punto de partida fundamental. Mediante la formulación matemática de fenómenos físicos, químicos y económicos, se logra representar el comportamiento de sistemas reales en forma de ecuaciones, algoritmos y simulaciones. Esta modelación permite predecir el impacto de cambios en las condiciones operativas, evaluar escenarios hipotéticos y establecer relaciones entre variables clave. Un modelo bien construido no solo facilita el análisis técnico, sino que también sirve como base para aplicar técnicas de optimización con rigor y precisión.

Una vez modelado el sistema, se puede aplicar la optimización de una variable, que consiste en encontrar el valor óptimo de una variable específica —como temperatura, presión, concentración o velocidad— que maximice o minimice una función objetivo. Este tipo de optimización es especialmente útil en procesos donde una sola variable tiene un impacto dominante en el rendimiento. A través de métodos como derivadas, algoritmos iterativos o simulaciones paramétricas, se puede identificar el punto de operación ideal que equilibre eficiencia, seguridad y rentabilidad.

Por otro lado, la programación dinámica ofrece una solución poderosa para problemas más complejos, donde las decisiones deben tomarse en etapas sucesivas y cada elección afecta las siguientes. Esta técnica divide el problema en subproblemas más pequeños, resolviéndolos de manera secuencial y almacenando los resultados para evitar cálculos redundantes. Es especialmente útil en procesos de planificación, control de inventarios, diseño de redes de intercambio de calor y rutas de producción. Su capacidad para manejar múltiples variables interdependientes la convierte en una herramienta estratégica para optimizar sistemas completos.

En conjunto, estos tres enfoques permiten abordar la optimización de procesos desde distintos niveles de complejidad y profundidad. La combinación de modelación precisa, optimización puntual y programación dinámica proporciona una base sólida para mejorar continuamente los sistemas industriales. En un entorno global que exige eficiencia, sostenibilidad y

adaptabilidad, dominar estas herramientas no solo es una ventaja técnica, sino una necesidad estratégica. Así, la optimización de procesos se convierte en un motor de innovación, competitividad y excelencia operativa en la ingeniería del siglo XXI.

Complementos educativos

Estudio de caso (Excel)

[UNIDAD IV. OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS. ESTUDIO DE CASOS.xlsx](#)

Ejercicio práctico (Word)

[UNIDAD IV. OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS. EJERCICIO PRÁCTICO.docx](#)

Infografía (Canva)

[UNIDAD IV. OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS. INFOGRAFÍA.pdf](#)

REFERENCIAS

- Acevedo Peña, A. M. (2015). La importancia de la optimización en la industria. *VirtualPro*, 159(2). <https://www.virtualpro.co/editoriales/20150401-ed.pdf>
- Andraos, J. (2008). Global process metrics for green chemistry and sustainability: Database analysis of the efficiency of synthesis plans in organic chemistry. *Green Chemistry*, 10(1), 18–22.
- Babi, D., et al. (2015). Novel approach for process synthesis—Design of reaction paths using superstructures and optimization. *Chemical Engineering and Processing*, 97, 158–176.
- Bacha, X., Fortes, M., & Aguilar, R. (2007). Diseño de una red de intercambio de calor utilizando la metodología supertargeting del punto de pliegue. *Revista del Centro de Investigación. Universidad La Salle*, 7.
- Clayden, J., Greeves, N., & Warren, S. (2012). *Organic chemistry* (2nd ed.). Oxford University Press.
- Couper, J. R. (2005). *Diseño de equipos y procesos de ingeniería química*. Gulf Professional Publishing / Elsevier.
- Douglas, J. M. (1988). *Conceptual design of chemical processes*. McGraw-Hill.
- Fernández Santana, E., & González Jiménez, G. (2002). *Ingeniería económica para ingenieros químicos*. https://www.researchgate.net/publication/321038156_Ingenieria_Economica_para_Ingenieros_Quimicos
- Fogler, H. S., & Levenspiel, O. (2008). *Principios de ingeniería de reacciones químicas*. McGraw-Hill.
- Gani, R., & Jaksland, C. (2002). *Chemical product and process design*. Centre for Process Engineering and Technology.
- Gil, C. I. D., Guevara, L. J. R., García, Z. J. L., & Leguizamón, R. A. (2011). *Análisis y simulación de procesos en ingeniería química*. Universidad Nacional de Colombia.
- González Brambila, M. (2012). *Introducción a la ingeniería de procesos*. Editorial LIMUSA.
- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (1997). *Introducción a la investigación de operaciones* (6ª ed.). McGraw-Hill.
- Infinitia Industrial Consulting. (2022). *Optimización de procesos industriales*. <https://www.infinitiaresearch.com/noticias/optimizacion-de-procesos-industriales/>
- Jiménez Gutiérrez, A. (2003). *Diseño de procesos en ingeniería química*. Editorial Reverté.
- Laborde, M. F. (2020). *Optimización energética de redes de intercambio de calor: Aplicación a la síntesis del proceso de producción de biodiesel a partir de aceites vegetales usados* [Tesis doctoral, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires]. Repositorio Institucional.
- Linnhoff, B., & Hindmarsh, E. (1983). The pinch design method of heat exchanger networks. *Chemical Engineering Science*.
- Linnhoff, B., & Vredeveld, D. R. (1984). Pinch technology has come of age. *Chemical Engineering Progress*.

- Martínez, J., Domínguez, O., & Finetti, J. (2015). Diseño de redes de intercambio de energía, su enseñanza en diseño de procesos en ingeniería química. https://www.aaaiq.org.ar/SCongresos/docs/06_029/papers/09a/09a_1640_383.pdf
- Mussatti, D., & Vatauvuk, W. (2000). *Estimación de costos: Conceptos y metodología*. United States Environmental Protection Agency. <https://www3.epa.gov/ttnecatc>
- Nacional Financiera. (2004). *Fundamentos de negocio*. https://www.nafin.com/portalfn/files/secciones/capacitacion_asistencia/pdf/Fundamentos%20de%20negocio/Finanzas/finanzas3_6.pdf
- Pérez, R. (2019). *Introducción a los modelos de optimización*. Universidad Piloto de Colombia. <https://www.unipiloto.edu.co/descargas/Introduccion-a-Modelos-de-Optimizacion.pdf>
- Perry, R. H., & Chilton, C. H. (1973). *Perry's chemical engineers' handbook*. McGraw-Hill.
- Peters, M. S., & Timmerhaus, K. D. (2002). *Diseño en ingeniería química*. McGraw-Hill.
- Peters, M. S., & Timmerhaus, K. D. (1978). *Diseño de plantas y su evaluación económica para ingenieros químicos*. Editorial Géminis S.R.L.
- Porlles Loarte, J. (2004). Economía aplicada a la ingeniería de procesos. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, 14–23.
- Seider, W. D., Seader, J. D., & Lewin, D. R. (2004). *Product & process design principles*. John Wiley & Sons.
- Sih, C. J., & Hartenbaum, R. E. (1996). *Strategies and tactics in organic synthesis*. Academic Press.
- Siirola, J. J. (1996). Retrosynthetic analysis and process synthesis. *Computers & Chemical Engineering*, 20(6–7), 819–832.
- Smith, G., & Patel, A. (1987). Step by step through the pinch. *The Chemical Engineer*.
- Smith, J. M., Van Ness, H. C., & Abbott, M. M. (2005). *Introduction to chemical engineering thermodynamics* (7th ed.). McGraw-Hill.
- Smith, R. (1995). *Chemical process design*. McGraw-Hill.
- Turton, R., Bailie, R. C., Whiting, W. B., & Shaeiwitz, J. A. (2008). *Análisis, simulación y diseño de procesos químicos*. Pearson Education.
- Ulrich, G. D., & Vasudevan, P. T. (1996). *Plantas de proceso: Diseño, operación y economía*. McGraw-Hill.
- Valiente, A., & Primo Stivalet, R. (1981). *Problemas de balance de materia*. Editorial Alhambra Universidad.