

DISEÑO EN INGENIERÍA QUÍMICA

Traducción de la quinta edición original

Ray Sinnott / Gavin Towler



EDITORIAL
REVERTÉ



Barcelona · Bogotá · Buenos Aires · Caracas · México

Registro bibliográfico (ISBD)

SINNOTT, Ray

[Chemical engineering design. Español]

Diseño en ingeniería química ; versión española traducida por José Costa López, Jordi Bonet Ruiz, Antonio Pinto Llona y Francisco José España Maraver. – Barcelona : Reverté, 2012.

XXII, 1255 p. : il. ; 25 cm.

Traducción de: Chemical engineering design. – Índice.

B. 17034-2012. - ISBN 978-84-291-7199-0

1. Industria química. Tecnología química, 2. Química. I. Costa López, José, trad. II. Bonet Ruiz, Jordi, trad. III. Pinto Llona, Antonio, trad. IV. España Maraver, Francisco José, trad. V. Título.

66

54

Título de la obra original:

Chemical Engineering Design. Fifth Edition.

Edición original en lengua inglesa publicada por:

Elsevier Limited of The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford, OZ5 1GB, UK

Copyright © 2009 Elsevier Ltd. All Rights Reserved

Edición en español:

© Editorial Reverté, S. A., 2012

ISBN: 978-84-291-7199-0

Versión española traducida por:

José Costa López

Catedrático y Profesor Emérito de Ingeniería Química

Presidente PROCITEC. Facultad de Química. Universidad de Barcelona

Jordi Bonet Ruiz

Profesor Lector de Ingeniería Química. Universidad de Barcelona

Antonio Pinto Llona

Catedrático de Tecnología ES

Francisco José España Maraver

Profesor Asociado de Proyectos de Ingeniería Química. Universidad de Barcelona

MAQUETACIÓN: Reverté-Aguilar, S.L.

DISEÑO DE LA CUBIERTA: David Kimura + Gabriela Varela

Propiedad de:

EDITORIAL REVERTÉ, S. A.

Loreto, 13-15. Local B

08029 Barcelona. ESPAÑA

Tel: (34) 93 419 33 36

Fax: (34) 93 419 51 89

reverte@reverte.com

www.reverte.com

REIMPRESIÓN DIGITAL 2014

Este libro ha sido coeditado con:

Col·legi Oficial de Químics de Catalunya Técnicas Reunidas, S. A.

Reservados todos los derechos. La reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos, quedan rigurosamente prohibidas sin la autorización escrita de los titulares del copyright, bajo las sanciones establecidas por las leyes.



Impreso en España - Printed in Spain

Depósito legal: B. 17034-2012

Impreso por Ulzama

1385

Ray Sinnott comenzó su carrera en diseño y desarrollo trabajando en varias empresas importantes, entre ellas DuPont y John Brown. Más tarde se unió al Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Gales, Swansea, Reino Unido, y publicó la primera edición de Diseño en Ingeniería Química en 1983. Es Ingeniero Colegiado, Ing. Eur. y Miembro del Instituto de Ingenieros Químicos.

Gavin Towler es Director de Desarrollo de UOP LLC. Gavin es el responsable de la gestión de desarrollo de tecnología y entrega para las empresas de UOP en el refino de petróleo, petroquímica, procesamiento de gas, adsorbentes, catalizadores y productos químicos y combustibles renovables. Como profesor adjunto en la Universidad Northwestern, da clases de diseño de ingeniería química a alumnos del último curso. Es Ingeniero Colegiado y miembro del Instituto de Ingenieros Químicos.

CONTENIDO

PRÓLOGO xv

CÓMO UTILIZAR ESTE LIBRO xix

AGRADECIMIENTOS xxi

1 INTRODUCCIÓN AL DISEÑO 1

- 1.1. Introducción 2
- 1.2. Naturaleza del diseño 2
- 1.3. La anatomía de un proceso de producción química 8
- 1.4. La organización de un proyecto de ingeniería química 11
- 1.5. Documentación del proyecto 13
- 1.6. Códigos y estándares 16
- 1.7. Factores de diseño (márgenes de diseño) 18
- 1.8. Sistemas de unidades 18
- 1.9. Optimización 20
- 1.10. Referencias 44
- 1.11. Nomenclatura 44
- 1.12. problemas 46

2 FUNDAMENTOS DE LOS BALANCES DE MATERIA 51

- 2.1. Introducción 52
- 2.2. La equivalencia entre masa y energía 52
- 2.3. Conservación de la masa 53
- 2.4. Unidades utilizadas para expresar las composiciones 53
- 2.5. Estequiometría 54
- 2.6. Elección de los límites del sistema 55
- 2.7. Elección de la base para los cálculos 58
- 2.8. Número de componentes independientes 59
- 2.9. Restricciones en los caudales y las composiciones 60
- 2.10. Método algebraico general 61
- 2.11. Componentes clave 63
- 2.12. Reactante en exceso 64

- 2.13. Conversión, selectividad y rendimiento 65
- 2.14. Procesos de reciclado 70
- 2.15. Purga 73
- 2.16. Derivación (by pass) 74
- 2.17. Cálculos de estado no estacionario 74
- 2.18. Procedimiento general para los problemas de balances de materia 76
- 2.19. Referencias (lecturas adicionales) 77
- 2.20. Nomenclatura 77
- 2.21. Problemas 78

3 FUNDAMENTOS DE LOS BALANCES DE ENERGÍA Y UTILIZACIÓN DE LA ENERGÍA 83

- 3.1. Introducción 84
- 3.2. Conservación de la energía 84
- 3.3. Formas de energía (por unidad de masa de material) 84
- 3.4. El balance de energía 86
- 3.5. Cálculo de la entalpía específica 90
- 3.6. Capacidades caloríficas medias 92
- 3.7. Efecto de la presión en la capacidad calorífica 93
- 3.8. Entalpía de mezclas 95
- 3.9. Diagramas de entalpía–concentración 96
- 3.10. Calores de reacción 98
- 3.11. Calores estándar de formación 102
- 3.12. Calores de combustión 103
- 3.13. Compresión y expansión de los gases 104
- 3.14. Cálculos del balance de energía 112
- 3.15. Balances de energía en estado no estacionario 113
- 3.16. Recuperación de energía 115
- 3.17. Redes de intercambiadores de calor 124
- 3.18. Referencias 144
- 3.19. Nomenclatura 145
- 3.20. Problemas 148

4 DIAGRAMAS DE FLUJO 153

- 4.1. Introducción 154
- 4.2. Presentación de los diagramas de flujo 155
- 4.3. Programas de simulación de procesos 162
- 4.4. Especificación de componentes y de modelos de las propiedades físicas 165
- 4.5. Simulación de operaciones unitarias 169
- 4.6. Modelos de usuario 201
- 4.7. Hojas de cálculo con recirculación 205
- 4.8. Optimización de diagramas de flujo 216
- 4.9. Simulación dinámica 219

- 4.10. Referencias 219
- 4.11. Nomenclatura 220
- 4.12. Problemas 221

5 TUBERÍAS E INSTRUMENTACIÓN 229

- 5.1. Introducción 230
- 5.2. Diagramas T e I 230
- 5.3. Selección de válvulas 235
- 5.4. Bombas y compresores 237
- 5.5. Diseño mecánico de sistemas de tuberías 255
- 5.6. Selección del tamaño de la tubería 258
- 5.7. Control e instrumentación 268
- 5.8. Sistemas de control típicos 271
- 5.9. Alarmas, disparadores de seguridad y enclavamientos 279
- 5.10. Ordenadores en el control de procesos 281
- 5.11. Referencias 283
- 5.12. Nomenclatura 286
- 5.13. Problemas 287

6 EVALUACIÓN DE COSTES Y DE PROYECTOS 291

- 6.1. Introducción 292
- 6.2. Costes, ingresos y beneficios 292
- 6.3. Estimación de los costes de capital 300
- 6.4. Estimación de los costes de producción y los ingresos 327
- 6.5. Impuestos y depreciación 345
- 6.6. Financiación del proyecto 350
- 6.7. Evaluación económica de los proyectos 355
- 6.8. Análisis de sensibilidad 373
- 6.9. Selección del portafolio de proyectos 377
- 6.10. Referencias 380
- 6.11. Nomenclatura 382
- 6.12. Problemas 384

7 MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN 389

- 7.1. Introducción 390
- 7.2. Propiedades de los materiales 390
- 7.3. Propiedades mecánicas 391
- 7.4. Resistencia a la corrosión 394
- 7.5. Selección para la resistencia a la corrosión 399

- 7.6. Costes de material 400
- 7.7. Contaminación 401
- 7.8. Materiales comúnmente utilizados en la construcción 402
- 7.9. Plásticos como materiales de construcción para plantas químicas 409
- 7.10. Materiales cerámicos (materiales de silicatos) 411
- 7.11. Carbono 413
- 7.12. Recubrimientos protectores 413
- 7.13. Diseño para la resistencia a la corrosión 413
- 7.14. Referencias 414
- 7.15. Nomenclatura 416
- 7.16. Problemas 416

8 INFORMACIÓN DE DISEÑO Y DE DATOS 419

- 8.1. Introducción 420
- 8.2. Fuentes de información de procesos de fabricación 420
- 8.3. Fuentes generales de propiedades físicas 422
- 8.4. Precisión exigida a los datos de ingeniería 424
- 8.5. Predicción de las propiedades físicas 425
- 8.6. Densidad 425
- 8.7. Viscosidad 428
- 8.8. Conductividad térmica 432
- 8.9. Capacidad calorífica específica 434
- 8.10. Entalpía de vaporización (calor latente) 441
- 8.11. Presión de vapor 443
- 8.12. Coeficientes de difusión (difusividades) 444
- 8.13. Tensión superficial 447
- 8.14. Constantes críticas 449
- 8.15. Entalpía de reacción y entalpía de formación 452
- 8.16. Datos de equilibrios de fase 452
- 8.17. Referencias 464
- 8.18. Nomenclatura 469
- 8.19. Problemas 470

9 SEGURIDAD Y PREVENCIÓN DE PÉRDIDAS 473

- 9.1. Introducción 474
- 9.2. Materiales peligrosos 480
- 9.3. Peligros del proceso 487
- 9.4. Análisis de la seguridad del producto y del proceso 495
- 9.5. Análisis modal de fallos y efectos 498
- 9.6. Índices de seguridad 501
- 9.7. Estudios de peligrosidad y operabilidad 511
- 9.8. Análisis cuantitativos de los peligros 520

- 9.9. Válvula de alivio de presión 527
- 9.10. Referencias 541
- 9.11. Nomenclatura 547
- 9.12. Problemas 548

10 ELECCIÓN, ESPECIFICACIÓN Y DISEÑO DEL EQUIPO 551

- 10.1. Introducción 552
- 10.2. Separaciones gas – gas 554
- 10.3. Separaciones sólido – sólido 567
- 10.4. Separadores (líquido – sólido) sólido – líquido 573
- 10.5. Separación de sólidos disueltos 599
- 10.6. Separación líquido – líquido 612
- 10.7. Separación de líquidos disueltos 619
- 10.8. Separaciones gas – sólido (limpieza de gas) 625
- 10.9. Separadores líquido – gas 637
- 10.10. Reducción de tamaño y aumento de tamaño 642
- 10.11. Equipos para el mezclado 647
- 10.12. Transporte y almacenamiento de materia 655
- 10.13. Reactores 662
- 10.14. Referencias 668
- 10.15. Nomenclatura 674
- 10.16. Problemas 677

11 COLUMNAS DE SEPARACIÓN (DESTILACIÓN, ABSORCIÓN Y EXTRACCIÓN) 681

- 11.1. Introducción 682
- 11.2. Destilación en continuo: descripción del proceso 683
- 11.3. Destilación en continuo: principios básicos 686
- 11.4. Variables de diseño en la destilación 690
- 11.5. Métodos de diseño para sistemas binarios 692
- 11.6. Destilación multicomponentes: consideraciones generales 699
- 11.7. Destilación multicomponente: métodos rápidos para determinar los requerimientos de etapas y reflujo 709
- 11.8. Sistemas multicomponentes: procedimientos de resolución rigurosos (métodos por ordenador) 715
- 11.9. Otros procesos de destilación 717
- 11.10. Eficacia de los platos 720
- 11.11. Dimensionado aproximado de la columna 730
- 11.12. Tipos de platos para favorecer el contacto líquido vapor 731
- 11.13. Diseño hidráulico de los platos 740
- 11.14. Columnas de relleno 763
- 11.15. Auxiliares de la columna 794
- 11.16. Extracción con disolventes (extracción líquido – líquido) 794

- 1.17. Referencias 802
- 1.18. Nomenclatura 806
- 1.19. Problemas 810

12 Equipamiento de transferencia de calor 815

- 12.1. Introducción 816
- 12.2. Teoría y procedimiento de diseño básicos 817
- 12.3. Coeficiente global de transferencia de calor 818
- 12.4. Factores de ensuciamiento (factores de suciedad) 822
- 12.5. Intercambiadores de tubos y carcasa: detalles de construcción 823
- 12.6. Diferencia de temperatura promedio (fuerza motriz de la temperatura) 837
- 12.7. Intercambiadores de tubo y carcasa: consideraciones de diseño generales 843
- 12.8. Coeficiente de transferencia de calor de lado de los tubos y caída de presión (una fase) 846
- 12.9. Caída de presión y transferencia de calor para el lado de la carcasa (una fase) 852
- 12.10. Condensadores 878
- 12.11. Calderas y evaporadores 900
- 12.12. Intercambiadores de calor de placas 926
- 12.13. Intercambiadores de calor de contacto directo 935
- 12.14. Tubos con aletas 936
- 12.15. Intercambiadores de calor de doble tubería 938
- 12.16. Intercambiadores refrigerados con aire 939
- 12.17. Calentadores de fuego directo (hornos y calderas) 948
- 12.18. Transferencia de calor a recipientes 955
- 12.19. Referencias 961
- 12.20. Nomenclatura 968
- 12.21. Problemas 974

13 DISEÑO MECÁNICO DEL EQUIPO DE PROCESO 979

- 13.1. Introducción 980
- 13.2. Códigos y estándares de recipientes a presión 981
- 13.3. Principios fundamentales y ecuaciones 984
- 13.4. Consideraciones generales de diseño: recipientes a presión 998
- 13.5. Diseño de recipientes de pared fina bajo presión interna 1004
- 13.6. Compensación para aberturas y ramificaciones 1011
- 13.7. Diseño de recipientes sujetos a presión externa 1013
- 13.8. Diseño de recipientes sujetos a cargas combinadas 1017
- 13.9. Soportes del recipiente 1030
- 13.10. Juntas de bridas atornilladas 1038
- 13.11. Placas para tubos en intercambiadores de calor 1047
- 13.12. Diseño de uniones soldadas 1048
- 13.13. Cálculo de la fatiga de los recipientes 1051
- 13.14. Ensayos de presión 1051

- 13.15. Recipientes de presión elevada 1052
- 13.16. Tanques de almacenamiento de líquidos 1055
- 13.17. Referencias 1055
- 13.18. Nomenclatura 1059
- 13.19. Problemas 1063

14 CONSIDERACIONES GENERALES DEL LUGAR 1067

- 14.1. Introducción 1068
- 14.2. Localización de la planta y selección del lugar 1068
- 14.3. Distribución del lugar 1070
- 14.4. Distribución de la planta 1071
- 14.5. Servicios auxiliares 1076
- 14.6. Consideraciones ambientales 1078
- 14.7. Referencias 1088

APÉNDICES

- A Símbolos gráficos para sistemas de tuberías y plantas 1091
- B Tablas de corrosión 1101
- C Banco de datos de las propiedades físicas 1121
- D Factores de conversión para algunas unidades SI comunes 1149
- E Diseño de proyectos I 1153
- F Proyectos II 1173
- G Hojas de especificaciones (datos) del equipo 1203
- H Distribución de los tubos en intercambiadores de calor de carcasa y tubos típicos 1217
- I Hojas de datos de seguridad de materiales 1223

Índice 1231

Prólogo

Cuando escribí el prólogo de la cuarta edición dije que esa sería probablemente la última edición de *Diseño en Ingeniería Química*, a menos que se encontrase un coautor adecuado.

Cuando Gavin Towler se puso en contacto con los editores para pedirles que continuaran con el volumen y que prepararan también una versión nueva dirigida al mercado norteamericano, me sorprendí y me alegré. No pensé que encontraría un coautor que tuviera la combinación necesaria de conocimientos de ingeniería, contactos académicos y, sobre todo, tiempo. Afortunadamente, Gavin reúne todas esas condiciones e hizo una quinta edición excelente. En particular, puso al día el tratamiento de diagramas de flujo, la seguridad y los costes, reflejando la práctica actual del diseño. Además, realizó este trabajo manteniendo el estilo básico de las versiones anteriores y respetando mi objetivo de hacer un libro que se utilice en la práctica diaria. Gracias Gavin.

EUR. ING. R.K. SINNOTT

Cuando era estudiante, el libro más útil que tenía era “*Ingeniería química de Coulson y Richardson, Volumen 6: Diseño de Ingeniería Química*” por Ray Sinnott. Este libro no sólo me servía como un manual que me guiaba en la realización de mi proyecto de diseño, sino que también era el primer lugar donde buscaba explicaciones sencillas, métodos de diseño rápidos y detalles prácticos del equipamiento de cada una de las facetas de la ingeniería química. A lo largo de mi carrera en síntesis, diseño y desarrollo de procesos, el libro de Ray era una fuente útil de información. He adquirido otros libros de diseño pero, aunque cada uno de ellos tiene su mérito, ninguno era tan amplio o práctico. Como profesional industrial de diseño, llegué a apreciar el énfasis que Ray ponía en temas tales como la instrumentación, la seguridad, la selección de materiales y el diseño mecánico, temas que a menudo no se trataban en la mayoría de los libros teóricos escritos por académicos.

Poco después de comenzar a enseñar *Diseño* en la Universidad de Northwestern, me puse en contacto con Elsevier para preguntarle si Ray podría escribir una versión modificada de su libro dirigido específicamente a un público de América del Norte. Las modificaciones que propuse eran cambiar las referencias de los códigos y estándares británicos por los códigos apropiados del diseño norteamericano, añadir una discusión sobre la seguridad y la legislación medioambiental en los Estados Unidos y Canadá, e incluir más información sobre el diseño asistido por ordenador. Todo ello haciendo el menor número de cambios en la terminología. Ray había decidido recientemente retirarse y no quería hacer una nueva edición; sin embargo, acordamos que yo me ocuparía del proyecto y el resultado fue un libro que se publicó en 2008 como “*Diseño en Ingeniería Química: Principios, Práctica y Economía de la planta y Diseño de procesos*”. En el desarrollo de la edición americana mantuve el formato y el estilo original de Ray, a la vez que actualicé material y los diagramas basándome en mi propia experiencia para proporcionar ejemplos adicionales.

Esta quinta edición del Volumen 6 en la serie Coulson y Richardson incluye algunos de los materiales actualizados que se introdujeron en la edición americana, así como otros materiales que creí que mejoraban el libro. Los cambios principales se discuten abajo, y espero que educadores, estudiantes y profesionales encuentren el contenido valioso.

La mayoría de los diseños de procesos industriales se llevan a cabo utilizando software de diseños comerciales. En todo este libro se hacen muchas referencias a procesos comerciales y a software de diseño de equipos y también se han añadido ejemplos nuevos con “pantallazos” de varios programas. Muchas empresas de software comercial ofrecen licencias con fines educativos de sus programas a precios simbólicos. Recomiendo firmemente a los estudiantes que se introduzcan en el mundo del software comercial lo más rápidamente posible. El uso de software académico de diseño y de costes debe ser desaconsejado. Generalmente los programas académicos carecen del control de calidad y del soporte técnico que se necesita en la industria, y es poco probable que el estudiante utilice dicho software después de su graduación. En los Capítulos 4, 6 y 12 se han añadido ejemplos detallados de la utilización de herramientas informáticas en la simulación de procesos, el cálculo de costes y el diseño detallado de columnas de destilación e intercambiadores de calor. Todas las herramientas de diseño asistidas por ordenador se deben usar con cierta discreción y juicio técnico por parte del diseñador. Este juicio principalmente proviene de la experiencia pero, siguiendo la filosofía de Ray, he intentado proporcionar sugerencias útiles sobre la mejor manera de utilizar las herramientas informáticas.

Los ingenieros químicos trabajan en un conjunto muy diverso de industrias, y muchas de ellas tienen sus propias convenciones de diseño y equipo especializado. He tratado de ampliar la gama de industrias de procesos representadas en los ejemplos y problemas, pero allí donde el espacio o mi falta de experiencia han limitado la cobertura de un tema particular, se proporciona referencias a la literatura general sobre los métodos de diseño disponibles. El tratamiento de las operaciones unitarias en el Capítulo 10 se ha ampliado para incluir más procesos de separación prácticos en el procesamiento de gases, la fabricación de química fina y farmacéutica, con secciones nuevas sobre adsorción, separación por membranas, cromatografía e intercambiadores iónicos. En el Apéndice E se han añadido nuevos ejemplos de proyectos de diseño para una variada gama de industrias de procesos.

Los estándares y los códigos de práctica son una parte esencial de la ingeniería. Ha habido cambios sustanciales en los códigos y estándares británicos desde la cuarta edición, como el reemplazo de los estándares británicos más antiguos por estándares europeos comunes. Se han actualizado las referencias de los códigos de diseño para reflejar estos cambios. Aunque esta edición se ha escrito principalmente para un público británico y europeo, este libro se utiliza ampliamente en todos los países, y en algunos casos incluye también referencias a estándares americanos donde éstos son los más utilizados en todo el mundo. En los Capítulos 9 y 14 se ha añadido una discusión sobre la seguridad británica y europea y la legislación medioambiental; en la edición americana se ofrece una información similar para Estados Unidos. En el Capítulo 9 la sección sobre la seguridad se ha ampliado significativamente. La mayoría de los ingenieros químicos trabajan ahora en un contexto internacional y muchos trabajarán en diferentes países durante su carrera. El ingeniero de diseño debe seguir la política de la empresa u obtener un asesoramiento legal en el que los códigos, estándares y leyes se aplican localmente, y siempre debe consultar las referencias de la fuente original de las leyes, estándares y códigos de la práctica, ya que se actualizan con frecuencia.

El tratamiento de los costes y la economía del proceso se han actualizado en el Capítulo 6 y las correlaciones de los costes reflejan los datos de los precios recientes en lugar de las actualizaciones del índice de los datos más antiguos. La mayoría de los costes se dan en dólares americanos en una base de U.S. Gulf Coast, ya que ésta era la base de la fuente de datos y la mayoría de las compañías de ingeniería internacionales desarrollan los costes en dólares americanos. Los ejemplos y los problemas también se dan en euros y en libras esterlinas británicas y se ha ampliado la sección sobre la conversión de los precios de una base a la otra. Donde es posible, se utiliza la terminología internacional de la ingeniería y la industria de la construcción. Todos los ejemplos se dan en unidades métricas, pero algunos también utilizan las unidades convencionales americanas para propuestas ilustrativas, ya que es importante para los estudiantes aprender a convertir datos de fuentes americanas.

He seguido el modelo de Ray de describir las herramientas y métodos que se utilizan con mayor frecuencia en los diseños de procesos industriales y de evitar deliberadamente los métodos conceptuales idealizados desarrollados por investigadores que aún no han ganado la aceptación suficiente en la industria. El lector puede encontrar buenas descripciones de estos métodos en la literatura de investigación y en muchos libros de texto académicos. En el Capítulo 1 se ha añadido una pequeña sección sobre la optimización, y se han modificado algunos de los ejemplos y problemas para ilustrar cómo los diseñadores industriales experimentados optimizan sus diseños.

En el prefacio de la primera edición Ray escribió: El arte y la práctica del diseño no se puede estudiar en los libros. La intuición y el juicio necesarios para aplicar la teoría a la práctica sólo vendrán de la experiencia práctica. Confío en que este libro dará a sus lectores un comienzo modesto en ese camino". Ciertamente mi comienzo en el diseño fue utilizando el libro de Ray y espero que esta nueva edición sea tan útil para los futuros lectores.

Gavin Towler

Cómo utilizar este libro

Este libro se ha escrito principalmente para los estudiantes de cursos universitarios de ingeniería química y tiene especial importancia para sus proyectos de diseño. También es de interés para los nuevos licenciados que trabajan en la industria y necesitan ampliar sus conocimientos de operaciones unitarias y diseño. Algunos de los primeros capítulos del libro también se pueden usar en las clases de introducción a la ingeniería química y otras disciplinas en las industrias químicas y de procesos.

Como libro de texto del curso de diseño

Los Capítulos 1 a 9 y el 14 cubren el material básico para un curso de diseño de procesos e incluye una explicación del método de diseño, incluyendo consideraciones de seguridad, costes y selección de materiales. Los Capítulos 2, 3 y 8 contienen una gran cantidad de material de fondo que se deberían haber cubierto en cursos anteriores y que se pueden repasar rápidamente como recordatorio. Si se tiene poco tiempo, se debe poner un mayor énfasis en los Capítulos 4, 6 y 9. Los Capítulos 9 y 10 cubren la selección y el diseño del equipo, incluyendo aspectos mecánicos de su diseño. Estos temas importantes generalmente se olvidan en los currículos de ingeniería química. Los capítulos de equipamiento se utilizan como base para un segundo curso en el diseño o como material suplementario en las clases de diseño de proceso.

Como libro de texto introductorio en la ingeniería química

El material de los Capítulos 1, 2, 3 y 6 no requiere ningún conocimiento previo de la ingeniería química y se puede utilizar como un curso de introducción a la ingeniería química. Gran parte del material de los Capítulos 7, 9, 10 y 14 también se podría utilizar en una clase introductoria. En la introducción al diseño en una fase temprana en el currículo de ingeniería química hay mucho que decir, ya que ayuda a los estudiantes a apreciar mejor el propósito de las otras clases requeridas, y establece el contexto para el resto del plan de estudios. Los estudiantes que se inician en la ingeniería química suelen encontrar las aplicaciones prácticas de la asignatura mucho más fascinantes que las áridas matemáticas que normalmente utilizan. Una apreciación de la economía, la optimización y el diseño del equipo puede mejorar notablemente el rendimiento de un alumno en otras clases de ingeniería química. Si el libro se utiliza en una clase introductoria, entonces se puede hacer referencia a todo el currículo como una guía para los métodos de diseño.

Material complementario

Muchos de los cálculos descritos en el libro se pueden realizar utilizando hojas de cálculo. En la dirección de internet <http://Elsevierdirect.com/companions> se pueden encontrar plantillas de hojas de cálculo y hojas de especificaciones de equipos en formato Microsoft Excel. Este material se puede ver *on line* y también se puede descargar.

En <http://www.reverte.com/microsites/coulson6> se puede encontrar el *Solutions Manual* y los *Powerpoint Lecture Slides* que apoyan la explicación de la mayoría de los capítulos. Este material sólo está disponible para los profesores.

Agradecimientos

Como en mis prólogos de las ediciones anteriores de este libro, querría agradecer a aquellos colegas y profesores que me ayudaron a lo largo de mi variada como ingeniero profesional. En particular, quisiera agradecer la ayuda y el aliento que me brindó el profesor J. F. Richardson en las ediciones anteriores de este libro. También, a mi mujer, Muriel, por su ayuda con el mecanografiado de los textos de las ediciones anteriores.

EUR. ING. R.K. SINNOTT
Coed-y-bryn, Wales

Me gustaría agradecer a los muchos colegas de la UOP y de otros lugares que trabajaron conmigo, compartieron sus experiencias y me enseñaron todo lo que sé sobre diseño. Un agradecimiento especial al Dr. Rajeev Gautam, que me permitió seguir con este proyecto, y a Dick Conser, Peg Stine y Dr. ANdy Zarchy por el tiempo que invirtieron revisando mis aportaciones al libro de Ray y la aprobación para usar ejemplos y figuras de la UOP. Ray me proporcionó muchos comentarios y sugerencias amables en las revisiones que hizo y, desde luego, estoy muy agradecido de que al hacer esta edición me diera total libertad para hacer los cambios que me parecieran necesarios. Mi trabajo regular en la UOP me mantiene muy ocupado y he trabajado en este libro por las tardes y los fines de semana, por ello no habría sido posible sin el amor, apoyo y entendimiento de mi mujer, Carolina, y mis hijos Miranda, Jimmy y Johnathan.

GAVIN P. TOWLER
Inverness, Illinois

El material para las calderas ASME y el Código de Reactores a Presión se reproduce con el permiso de Internacional ASME, Three Park Avenue, New York NY 10016. El material para las Prácticas Recomendadas API se reproduce con el permiso del Instituto Americano del Petróleo, 1220 I. Street, NW Washington, DC 20005. El material para los Estándares británicos se reproduce con el permiso de la Institución Británica de los Estándares, 389 Chiswick High Road, London, W4 4AL, United Kingdom. Las copias completas de los códigos y estándares se pueden obtener de estas organizaciones.

Estamos agradecidos a Aspen Technology Inc. y Honeywell Inc. Por el permiso para incluir los pantallas que se generaron utilizando su software para ilustrar los ejemplos de la simulación de procesos y los cálculos de los costes. Laurie Wang de Honeywell también proporcionó comentarios valiosos de las revisiones. Las hojas de seguridad de los materiales se reproducen en el Apéndice I con permiso de Fischer Scientific Inc. Aspen Plus®, Aspen Kbase, Aspen ICARUS y todos los demás nombres de productos AspenTech o logotipos son marcas registradas o marcas comerciales o registradas de Aspen Technology Inc. o sus subsidiarias en los Estados Unidos y/o en otros países. Todos los derechos reservados.

El material suplementario contiene imágenes de procesos y equipos de muchas fuentes. Nos gustaría agradecer a las siguientes compañías por el permiso para utilizar estas imágenes: Alfa-Laval, ANSYS, Aspen Technology, Bete Nozzle, Bos-Hatten Inc., Chemineer Dresser, Dresser-Rand, Enardo Inc., Honeywell, Komax Inc., Riggins Company, Tyco Flor Control Inc., United Valve Inc., UOP LLC, y The Valve Manufacturer's Association.

Jonathan Simpson de Elsevier desempeñó un papel fundamental en el lanzamiento y la dirección de este proyecto y proporcionó orientación y soporte editorial durante todo el desarrollo del libro. Nos gustaría también agradecer a Renata Corbani por su excelente trabajo en el montaje del libro y la gestión del proceso de producción.

1 INTRODUCCIÓN AL DISEÑO

Contenidos del capítulo

- 1.1. **Introducción**
- 1.2. **Naturaleza del diseño**
- 1.3. **La anatomía de un proceso de fabricación de productos químicos**
- 1.4. **La organización de un proyecto de ingeniería química**
- 1.5. **Documentación del proyecto**
- 1.6. **Códigos y Normas estándar**
- 1.7. **Factores de diseño (márgenes de diseño)**
- 1.8. **Sistemas de unidades**
- 1.9. **Optimización**
- 1.10. **Referencias**
- 1.11. **Nomenclatura**
- 1.12. **Problemas**

Objetivos clave de aprendizaje

- Cómo se llevan a cabo los proyectos de diseño y cómo se documentan en la industria
- Por qué los ingenieros en la industria utilizan códigos y estándares y establecen márgenes en sus diseños
- Cómo se mejora un diseño utilizando métodos de optimización
- Por qué los ingenieros de diseño experimentados utilizan muy raramente métodos de optimización rigurosos en la práctica industrial

1.1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo es una introducción a la naturaleza y a la metodología del proceso de diseño, y a sus aplicaciones en el diseño de procesos de fabricación de productos químicos.

1.2. NATURALEZA DEL DISEÑO

Esta sección es una discusión general sobre el proceso de diseño. El objetivo de este libro es el diseño en ingeniería química, pero la metodología descrita en esta sección se aplica igualmente a otras ramas de la ingeniería.

La ingeniería química ha sido sistemáticamente una de las profesiones de ingeniería mejor pagadas. Existe una demanda de ingenieros químicos en muchos sectores de la industria, incluyendo las industrias de procesos tradicionales: productos químicos, polímeros, combustibles, alimentos, fármacos y papel, así como en otros sectores tales como materiales y dispositivos electrónicos, productos de consumo, minería y extracción de metales, implantes biomédicos, y generación de energía.

La razón de que las empresas de una gama tan diversa de industrias valoren tanto los ingenieros químicos es la siguiente:

Partiendo de un planteamiento de un problema, definido vagamente como una necesidad del cliente o de un conjunto de resultados experimentales, los ingenieros químicos pueden desarrollar una comprensión de la ciencia física subyacente importante relacionada con el problema y utilizar esta comprensión para crear un plan de acción y un conjunto de especificaciones detalladas, que si se aplican, llevarán a los resultados financieros previstos.

La creación de planes y especificaciones y la predicción de resultados financieros, si los planes se aplican en las plantas, es pues la actividad del diseño en ingeniería química

El diseño es una actividad creativa, y como tal puede ser uno de las actividades más gratificantes y satisfactorias realizadas por un ingeniero. El diseño no existe al principio del proyecto. El diseñador empieza con un objetivo específico o una necesidad del cliente en mente, y mediante el desarrollo y evaluación de diseños posibles, consigue la mejor manera de alcanzar aquel objetivo; ya sea una silla mejor, un puente nuevo, o para el ingeniero químico, un producto químico nuevo o un proceso de producción nuevo.

Cuando se consideran posibles maneras para conseguir el objetivo, el diseñador se verá limitado por muchos factores, lo que limitará el número de diseños posibles. En raras ocasiones existe una única solución posible al problema, sólo un diseño. Normalmente son posibles varias maneras alternativas para conseguir el objetivo, incluso varios diseños buenos, dependiendo de la naturaleza de las limitaciones.

Estas limitaciones en las posibles soluciones a un problema de diseño se presentan de muchas maneras. Algunas limitaciones serán fijas e invariables, tales como aquellas que surgen de las leyes físicas, regulaciones gubernamentales, y estándares. Otras serán menos rígidas, y el diseñador las puede “relajar” como parte de la estrategia general de búsqueda del mejor diseño. Las limitaciones que están fuera de la influencia del diseñador se pueden considerar limitaciones externas. En la Figura 1.1 se muestra este conjunto de límites externos de diseños posibles. Dentro de estos límites habrá un número de diseños plausibles constreñidos por otras limitaciones, las limitaciones internas, sobre las cuales el diseñador tiene algún tipo de control; tales como, elección del proceso, elección de las condiciones de proceso, de los materiales y del equipo.

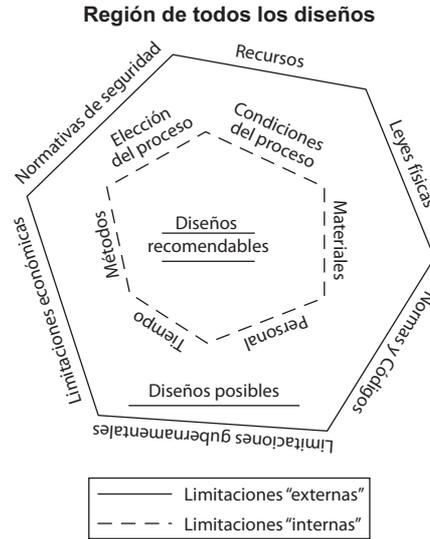


Figura 1.1. Limitaciones de diseño.

Las consideraciones económicas obviamente son la principal limitación en cualquier diseño de ingeniería: las plantas deben proporcionar un beneficio. En el Capítulo 6 se discutirá el coste y la economía del proceso

El tiempo será también una limitación. El tiempo disponible para completar un diseño limitará normalmente el número de diseños alternativos que se puedan considerar.

En la Figura 1.2 se muestra un diagrama de las etapas en el desarrollo de un diseño, desde la identificación inicial del objetivo hasta el diseño final. Cada etapa se discutirá en las siguientes secciones.

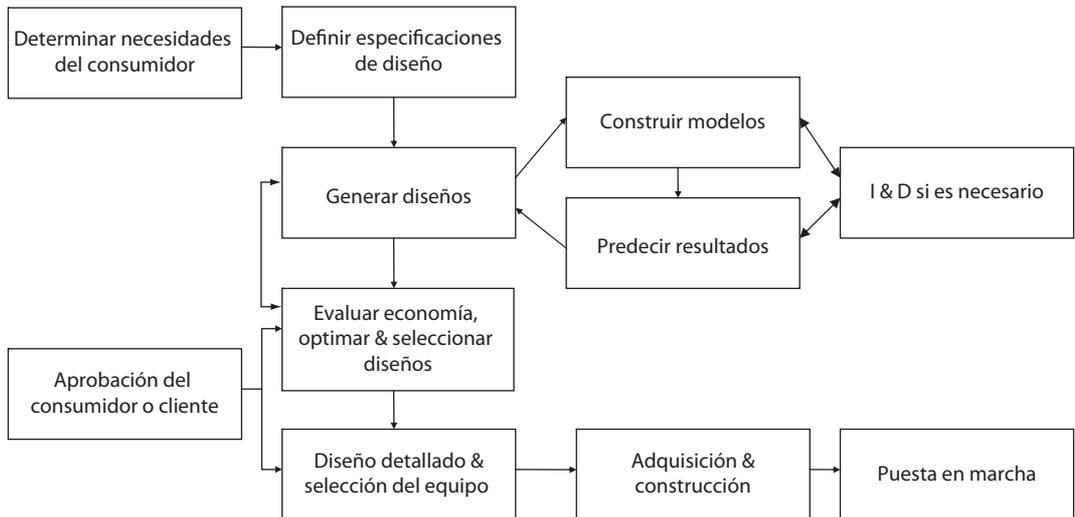


Figura 1.2. El proceso de diseño.

La Figura 1.2 muestra el diseño como un procedimiento iterativo, a medida que el diseño se desarrolla el diseñador será consciente de más posibilidades y limitaciones, y estará constantemente buscando nuevos datos e ideas, y evaluando posibles soluciones del diseño.

1.2.1. El objetivo del diseño (la necesidad)

Todos los diseños comienzan por una necesidad percibida. En el diseño de un proceso químico, el objetivo es la necesidad pública de un producto, creando una oportunidad comercial, según lo previsto por la organización de ventas y de mercado. Dentro de este objetivo general el diseñador reconocerá subobjetivos; los requisitos de varias unidades que componen el proceso global.

Antes de empezar a trabajar, el diseñador debe obtener una declaración lo más completa, y sin ambigüedades, de los requisitos posibles. Si el requisito (la necesidad) surge de fuera del grupo de diseño, de un cliente o de otro departamento, entonces, el diseñador tendrá que esclarecer los requisitos reales mediante una discusión. Es importante distinguir entre las necesidades que se “deben hacer” de aquellas que se “tienen que hacer”. Las que se “tienen que hacer” son aquellas partes de la especificación inicial que pueden considerarse convenientes, pero que pueden ser más flexibles cuando se está desarrollando el diseño. Por ejemplo, una especificación de un producto determinado se puede considerar conveniente por el departamento de ventas, pero puede ser difícil y costosa de obtener, y podría ser posible cierta “relajación” de la especificación, consiguiendo un producto vendible y más barato. Siempre que sea posible, el diseñador debe cuestionar los requisitos del diseño (el proyecto y las especificaciones del equipo) y mantenerlos bajo revisión mientras progresa el diseño. Para el ingeniero de diseño es importante trabajar estrechamente con el departamento de ventas y de mercado o directamente con el cliente, para tener lo más claro posible una comprensión de las necesidades del mismo.

Cuando se escriben especificaciones para otros, tales como el diseño mecánico, o la compra de una pieza para un equipo, el ingeniero de diseño debe ser consciente de las restricciones (limitaciones) que van indicando otros diseñadores. Una especificación bien pensada y exhaustiva de los requisitos para la pieza de un equipo define las limitaciones externas en las que otros diseñadores deben trabajar.

1.2.2. Establecer la base del diseño

El paso más importante para empezar un diseño de un proceso es traducir la necesidad del cliente en una base del diseño. La base del diseño es un comunicado más preciso del problema que se ha de resolver. Normalmente incluye el caudal de producción y las especificaciones de pureza de la mayoría de los productos, conjuntamente con la información de las limitaciones que influirán en el diseño tales como:

1. El sistema de unidades que se utilizará.
2. Los códigos de diseño, nacionales, locales o de la compañía que se deben seguir.
3. Detalles de las materias primas que están disponibles.
4. Información de lugares posibles donde se puede colocar la planta, incluyendo datos climatológicos, condiciones sísmicas y la disponibilidad de infraestructura. En el Capítulo 14 se discute el diseño del lugar.
5. Información de las condiciones, disponibilidad y precio de los servicios públicos tales como gas combustible, vapor de agua, agua de refrigeración, aire de proceso, agua de proceso, y electricidad, que serán necesarios para poner en marcha el proceso.

La base del diseño se debe definir de forma clara antes de que se pueda empezar el diseño. Si el cliente realiza el diseño entonces se debe revisar la base del diseño con el cliente al comienzo del proyecto. Muchas empresas utilizan formas estándares o cuestionarios para obtener información de las bases del diseño. En el Apéndice G se da un ejemplo patrón y se puede bajar en formato Excel MS de la dirección de Internet: <http://elsevierdirect.com/companions>.

1.2.3. Generación de conceptos de diseño posibles

La parte creativa del proceso de diseño es la generación de soluciones posibles al problema para el análisis, evaluación y selección. En esta actividad, la mayoría de los diseñadores cuentan en gran medida con experiencias anteriores, la propia y la de los demás. Es dudoso que ningún diseño sea totalmente novedoso. Los antecedentes de la mayoría de los diseños generalmente se pueden rastrear fácilmente. Los primeros automóviles fueron claramente carruajes tirados por caballos pero sin el caballo; y el desarrollo del diseño de los coches modernos se puede rastrear paso a paso desde los primeros prototipos. En la industria química, los procesos de destilación modernos se desarrollaron a partir de los alambiques antiguos usados para destilar bebidas alcohólicas, y las columnas de relleno utilizadas para la absorción de gas se desarrollaron a partir de las torres primitivas rellenas de broza. Por lo tanto, no es frecuente que un diseñador de procesos se enfrente a la tarea de producir un diseño para un proceso completamente nuevo o una pieza nueva de un equipo.

Los ingenieros experimentados normalmente prefieren los métodos probados y evaluados, en lugar de diseños nuevos no probados pero posiblemente más excitantes. El trabajo que se requiere para el desarrollo de procesos nuevos, y el coste, hace que normalmente se desestimen. La comercialización de tecnología nueva es difícil y cara y pocas compañías están dispuestas a hacer inversiones multimillonarias en tecnología que no está bien probada (se conoce como el síndrome "*me third*": yo, el tercero). Se avanza con más seguridad en pequeñas etapas; sin embargo, cuando se quiere innovación, la experiencia previa, a través de prejuicios, puede inhibir la generación y aceptación de nuevas ideas (conocido como síndrome de "*no inventado aquí*").

La cantidad de trabajo, y la manera de abordarlo, dependerán del grado de novedad en un proyecto de diseño. El desarrollo de procesos nuevos requiere inevitablemente mucha más interacción con los investigadores y la recolección de datos de laboratorios y plantas piloto.

Los proyectos de ingeniería química se pueden dividir en tres tipos, dependiendo del grado de novedad:

1. Modificaciones, y adiciones, en una planta que ya existe; normalmente llevadas a cabo por el grupo de diseño de la planta.
2. Nueva capacidad de producción para satisfacer la creciente demanda de ventas, y la venta de los procesos establecidos por los contratistas. Repetición de los diseños existentes, con sólo pequeños cambios en el diseño, incluyendo diseños de procesos de un proveedor o un competidor llevados a cabo para entender si tienen un coste más convincente de producción.
3. Procesos nuevos, desarrollados en un laboratorio de investigación, a través de plantas piloto, para un proceso comercial. Incluso aquí, la mayoría de las operaciones unitarias y el equipo de proceso utilizará diseños establecidos.

La mayoría de los procesos de diseño se basan en diseños que existían anteriormente. El ingeniero de diseño muy rara vez se sienta delante de un papel en blanco para crear un diseño nuevo a partir de cero, una actividad a veces referida como "síntesis del proceso". Incluso en industrias tales como farmacéuti-

cas, donde la investigación y el desarrollo de productos nuevos son especialmente importantes, los tipos de proceso utilizados a menudo se basan en diseños previos para productos similares, a fin de hacer uso de un equipo bien estudiado y facilitar el proceso de obtener la aprobación reglamentaria para la planta nueva.

El primer paso para crear un diseño de proceso nuevo será esbozar un diagrama de bloques en borrador que muestren las principales etapas en el proceso; y hacer una lista de las funciones principales (objetivo) y las limitaciones principales para cada etapa. La experiencia entonces debe indicar que tipos de operaciones unitarias y equipo se debe considerar. En el Capítulo 4 se describen los pasos involucrados en la determinación de la secuencia de las operaciones unitarias que constituyen un diagrama de flujo del proceso.

La generación de ideas para posibles soluciones para un problema de diseño no se pueden separar de la etapa de selección del proceso de diseño; algunas ideas se rechazarán como poco prácticas, tan pronto como se conciben.

1.2.4. Pruebas de aptitud

Cuando se sugieren las alternativas de diseños, se deben probar para ajustar los objetivos. En otras palabras, el ingeniero de diseño debe determinar lo bien que se ajusta cada concepto del diseño a las necesidades identificadas. En el campo de la ingeniería química es excesivamente costoso realizar varios diseños para encontrar cual funciona mejor (una práctica conocida como desarrollo de prototipos, que es común en otras disciplinas ingenieriles). En cambio, el ingeniero químico diseña un modelo matemático del proceso, normalmente mediante un simulador informático de procesos, de reactores, y de otros equipos clave. En algunos casos, el modelo de rendimiento puede incluir una planta piloto u otra instalación para predecir el rendimiento de la planta y recopilar los datos necesarios para el diseño. En otros casos, los datos del diseño se pueden recoger de una instalación a escala real existente o se pueden encontrar en la literatura de ingeniería química.

El ingeniero de diseño debe reunir toda la información necesaria para el modelo del proceso con el fin de predecir sus rendimientos frente a los objetivos identificados. Para el diseño del proceso éste incluirá información de procesos posibles, rendimiento del equipo, y datos de las propiedades físicas. En el Capítulo 8 se revisarán las fuentes de información de los procesos y las propiedades físicas.

Muchas organizaciones de diseño preparan un manual de datos básicos, conteniendo todos los conocimientos prácticos (“know-how”) del proceso en los que se basa el diseño. La mayoría de las organizaciones tienen manuales de diseño que cubren los métodos preferidos y los datos de los procedimientos de diseño usados más frecuentemente. Los estándares nacionales también son fuentes de obtención de métodos de diseños y datos. Son también limitaciones de diseño, como que las plantas nuevas deben estar diseñadas de acuerdo con los estándares nacionales. Si los datos o modelos de diseño necesarios no existen entonces se necesita un trabajo de investigación y desarrollo para recopilar los datos y obtener modelos nuevos.

Una vez recopilados los datos y establecido un modelo de trabajo del proceso, el ingeniero de diseño puede empezar a determinar el tamaño y los costes del equipo. En esta etapa será obvio que algunos diseños no son rentables y se podrán rechazar sin más análisis. Es importante asegurarse de que todos los diseños que se consideran son aptos para el servicio, es decir, reúnen los requisitos del cliente que “deben tener”. En la mayoría de los problemas de diseño de ingeniería química esto reduce la producción de productos que cumplen con las especificaciones requeridas. Un diseño que no cumple con los objetivos del cliente normalmente se puede modificar hasta que si los cumple, pero esto adiciona siempre costes extras.

1.2.5. Evaluación económica, optimación y selección

Una vez el diseñador ha identificado unos pocos diseños candidatos que cumplan con el objetivo del cliente, se puede empezar el proceso de selección del diseño. El criterio primordial para la selección del diseño normalmente es el rendimiento económico, aunque factores tales como seguridad e impacto medioambiental pueden también jugar un rol importante. La evaluación económica implica generalmente analizar el capital y los costes de operación del proceso para determinar la devolución de la inversión, tal como se describe en el Capítulo 6.

También se puede utilizar el análisis económico del producto o proceso para optimar el diseño. Cada diseño tendrá diferentes variantes posibles que tienen sentido económico en determinadas condiciones. Por ejemplo, el grado de recuperación del calor del proceso es una compensación entre el coste de la energía y el coste de los intercambiadores de calor (generalmente expresado como el coste del área del intercambiador de calor). En las regiones donde los costes de energía son elevados, son atractivos los diseños que utilizan mucha superficie de intercambio de calor para maximizar la recuperación del calor residual para su reutilización en el proceso. En las regiones donde los costes de energía son bajos, puede ser más económico utilizar más combustible y reducir el coste del capital de la planta. En la Sección 1.9 se discuten brevemente las técnicas matemáticas que se han desarrollado para ayudar en la optimación del diseño de la planta y de la operación.

Cuando todos los diseños candidatos se han optimado, se debe seleccionar el mejor diseño. Con mucha frecuencia, el ingeniero de diseño encontrará que diseños diferentes tienen un rendimiento económico muy cercano, en cuyo caso se elegirá el diseño más seguro o el que tiene la mejor trayectoria comercial. En la etapa de selección un ingeniero experimentado tendrá también muy en cuenta que los diseños candidatos son seguros, operables y fiables, y que no se ha pasado por alto ningún coste significativo.

1.2.6. Diseño detallado y selección del equipo

Después de haber seleccionado el proceso o el producto, el proyecto pasa al diseño detallado. Aquí se determinan las especificaciones detalladas del equipo tales como recipientes, intercambiadores, bombas e instrumentos. El ingeniero de diseño puede trabajar con otros profesionales, tales como ingenieros civiles para la preparación del lugar, ingenieros mecánicos para diseñar los recipientes y estructuras, e ingenieros eléctricos para la instrumentación y el control.

Muchas empresas contratan empresas de Ingeniería, Adquisición y Construcción (IAC; en inglés: EPC) comúnmente conocidas como contratistas, en la etapa del diseño detallado. Las compañías EPC mantienen un gran personal de diseño que pueden realizar de forma rápida y competente proyectos con un coste relativamente bajo.

Durante la etapa del diseño detallado todavía puede haber algunos cambios en el diseño y sin duda habrá una optimación en curso a medida que se desarrolla una idea mejor de la estructura del coste del proyecto. Las decisiones del diseño detallado tienden a enfocarse principalmente en la selección del equipo más bien que en los cambios en el diagrama de flujo. Por ejemplo, el ingeniero de diseño puede necesitar decidir si utiliza un intercambiador de tubos en U o de cabezal flotante, como se discute en el Capítulo 12, o si utiliza platos o rellenos para una columna de destilación, como se describe en el Capítulo 11.

1.2.7. Adquisición, construcción y operación

Cuando se han finalizado ya los detalles del diseño, se puede comprar el equipo, y se puede construir la planta. La adquisición y la construcción normalmente se llevan a cabo por una empresa EPC a menos

que el proyecto sea muy pequeño. Debido a que trabajan en muchos proyectos cada año, las empresas EPC son capaces de realizar pedidos a granel tales como tuberías, cables, válvulas, etc., y pueden usar su poder de compra para conseguir descuentos en la mayoría de los equipos. Las compañías EPC también tienen una gran experiencia en el campo de la construcción, inspección, ensayo e instalación de los equipos. Por lo tanto, pueden contratar normalmente la construcción de una planta para un cliente más barata (y normalmente también más rápida) que si el cliente se la construye él mismo.

Finalmente, una vez construida la planta y preparada para la puesta en marcha, se puede comenzar la operación. Entonces, se llama con frecuencia al ingeniero de diseño para ayudar a resolver cualquier tema de la puesta en marcha y los problemas iniciales de la planta nueva.

1.3. LA ANATOMÍA DE UN PROCESO DE PRODUCCIÓN QUÍMICA

En la Figura 1.3 se muestran los componentes básicos de un proceso químico típico, en el que cada bloque representa una etapa en el proceso global para la fabricación de un producto a partir de sus materias primas. La Figura 1.3 representa un proceso generalizado, no todas las etapas son necesarias para cualquier proceso particular y la complejidad de cada etapa dependerá de la naturaleza del proceso. El diseño en ingeniería química se ocupa de la selección y disposición de las etapas, y de la selección, especificación y diseño del equipo requerido para realizar la función de cada etapa.

Etapa 1. Almacenamiento de las materias primas. A menos que las materias primas (llamadas también almacenamientos o alimentaciones) se suministren como productos intermedios de una planta vecina, se tendrá que hacer alguna provisión de almacenamiento para algunos días, o semanas, con objeto de resolver fluctuaciones e interrupciones en el suministro. Incluso cuando los materiales provienen de una planta adyacente se realiza normalmente alguna provisión para mantener algunas horas, o incluso días, el inventario para desacoplar los procesos. El tipo de almacenamiento que se requiere depende de la naturaleza de las materias primas, el método de suministro, y que seguridad se puede tener en la continuidad del suministro. Si los materiales se suministran por barco (contenedores o buque de carga a granel) se necesita un lote almacenado de varias semanas, mientras que si se suministran por carretera o por tren, en lotes más pequeños, se necesita un almacenamiento menor.

Etapa 2. Preparación de la alimentación. Se necesitará normalmente una purificación y preparación de las materias primas antes de que sean suficientemente puras, o en la forma correcta, para alimentar la etapa de la reacción. Por ejemplo, el acetileno generado por el proceso del carburo contiene com-

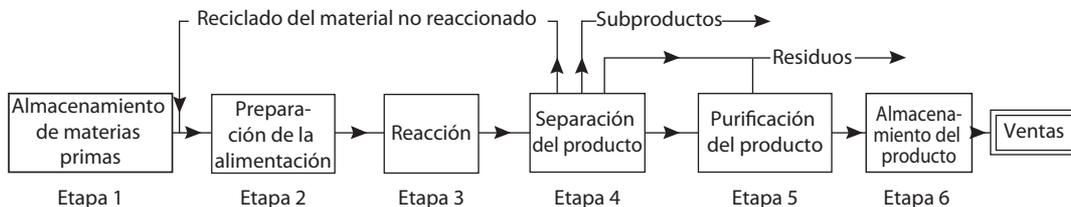


Figura 1.3. Anatomía de un proceso químico.

puestos de arsénico y de azufre, y otras impurezas, que se deben eliminar por lavado con ácido sulfúrico concentrado (u otro proceso) antes de ser suficientemente puro para reaccionar con el ácido clorhídrico para producir diclorometano. Se deben eliminar los contaminantes de la alimentación que puedan envenenar los catalizadores, enzimas o microorganismos. Las alimentaciones líquidas se tienen que evaporar antes de alimentar a reactores en fase gaseosa y se puede necesitar triturar, pulverizar y tamizar los alimentos sólidos.

Etapa 3. Reacción. La etapa de reacción es el corazón de un proceso de producción química. En el reactor se introducen todas las materias primas juntas en las condiciones que conducen a la obtención del producto deseado; casi siempre, se formarán también algunos subproductos, ya sea consecuencia de la estequiometría de la reacción, o de reacciones secundarias, o de las reacciones de las impurezas presentes en la alimentación.

Etapa 4. Separación del producto. Después del reactor (o reactores) los productos y subproductos se separan de cualquier material que no haya reaccionado. Si la cantidad es suficiente, el material que no ha reaccionado se reciclará a la etapa de reacción o a la etapa de preparación y purificación de la alimentación. Los subproductos se pueden también separar de los productos en esta etapa. En procesos de química fina existen a menudo etapas múltiples de reacción, cada una seguida por una o más etapas de separación.

Etapa 5. Purificación. Antes de la venta, el producto principal necesitará frecuentemente una purificación para obtener las especificaciones del producto. Si se producen en cantidades económicas, los subproductos también se pueden purificar para su venta.

Etapa 6. Almacenamiento del producto. Se realizará un inventario del producto acabado para ajustar la producción a las ventas. Se necesita también una provisión para el envasado y transporte del producto, dependiendo de la naturaleza del mismo. Los líquidos se despachan normalmente en bidones y en cisternas (carretera, tren y mar), los sólidos en sacos, envases de cartón o balas.

La cantidad de producto almacenado dependerá de la naturaleza del producto y del mercado.

Procesos auxiliares

Además de las etapas principales del proceso mostradas en la Figura 1.3, se debe hacer una previsión para el suministro de los servicios (instalaciones auxiliares) necesarios; tales como, agua de proceso, agua de refrigeración, aire comprimido y vapor de agua. Se necesitan también instalaciones para el mantenimiento, la protección contra incendios, oficinas y otras dependencias, y laboratorios; véase Capítulo 14.

1.3.1. Procesos continuos y discontinuos (o por cargas)

Los procesos continuos se diseñan para operar 24 horas al día, 7 días a la semana, durante todo el año. Se preverá algún tiempo de parada para el mantenimiento y, para algunos procesos, para la regeneración del catalizador. Se denomina factor de servicio de la planta o tasa de operación al porcentaje de las horas disponibles en un año que la planta opera, y está normalmente entre el 90 y el 95%.

$$\text{Factor de servicio \%} = \frac{\text{horas operadas}}{8760} \times 100$$

Los procesos discontinuos se diseñan para operar intermitentemente, normalmente, con algunas, o todas, las unidades de proceso estando frecuentemente apagadas y en marcha. Es muy común para plantas discontinuas utilizar una combinación de operaciones en discontinuo y en continuo. Por ejemplo, se puede utilizar un reactor en discontinuo para alimentar una columna de destilación en continuo.

Los procesos en continuo son normalmente más económicos para producciones a gran escala. Los procesos en discontinuo se utilizan cuando se quiera cierta flexibilidad en el caudal de producción o en las especificaciones del producto.

Las ventajas de un proceso en discontinuo son:

1. Un proceso en discontinuo permite la producción de varios productos diferentes o tipos de productos diferentes en el mismo equipo.
2. En una planta en discontinuo, la integridad de un lote se conserva cuando se mueve de una operación a otra. Esto puede ser muy útil para los objetivos de control de calidad.
3. El caudal de producción de las plantas en discontinuo es muy flexible, ya que no hay episodios inestables cuando se opera a baja producción.
4. Las plantas en discontinuo son más fáciles de limpiar y de mantener estéril la operación.
5. Los procesos en discontinuo son más fáciles para llevar a cabo el escalado de un proceso químico a partir de datos de laboratorio.
6. Las plantas en discontinuo necesitan menor capital para volúmenes de producción pequeños. La misma pieza del equipo se puede usar con frecuencia para realizar diferentes operaciones unitarias.

Las desventajas de los procesos en discontinuo son:

1. La escala de producción es limitada.
2. Es difícil conseguir economías de escala utilizando caudales de producción elevados.
3. La calidad de cada lote puede variar, y esto conduce a una producción elevada de productos residuales o productos fuera de especificaciones.
4. El reciclado y la recuperación del calor son más difíciles, haciendo las plantas en discontinuo menos eficientes energéticamente y muy probablemente productoras de subproductos residuales.
5. La utilización del capital inmovilizado es menor en las plantas en discontinuo ya que la planta, casi inevitablemente, está parada parte del tiempo.
6. Los costes fijos de producción son mucho más elevados para las plantas en discontinuo sobre una base de \$/unidad másica de producto.

Selección de producción en continuo frente a discontinuo

Teniendo en cuenta unos costes fijos mayores y una menor utilización de la planta de procesos en discontinuo, el proceso en discontinuo sólo tiene sentido normalmente para productos que tienen un valor elevado y se producen en pequeñas cantidades. Las plantas en discontinuo se utilizan normalmente para:

- Productos alimentarios
- Productos farmacéuticos tales como medicamentos, vacunas y hormonas
- Productos para el cuidado personal
- Productos químicos especiales

Incluso en estos sectores, la producción en continuo es más recomendable si se conoce bien el proceso, el volumen de producción es grande y el mercado es competitivo.

1.4. LA ORGANIZACIÓN DE UN PROYECTO DE INGENIERÍA QUÍMICA

El trabajo de diseño requerido en la ingeniería de un proceso de producción químico se puede dividir en dos grandes fases:

Fase 1: Diseño del proceso, que cubre los pasos desde la selección inicial del proceso a utilizar, a través del establecimiento de diagramas de flujo del proceso; e incluye la selección, especificación y diseño de ingeniería química del equipo. En una organización típica, esta fase es responsabilidad del Grupo de Diseño de Procesos, y el trabajo se realiza principalmente por ingenieros químicos. El grupo de diseño de procesos también puede ser responsable de la preparación de los diagramas de tuberías e instrumentación.

Fase 2: Diseño de la planta, que incluye el diseño mecánico detallado del equipo, el diseño estructural, civil y eléctrico, y la especificación y diseño de los servicios auxiliares. Estas actividades son responsabilidad de los grupos especialistas en su diseño, teniendo experiencia en la amplia gama de disciplinas ingenieriles.

Otros grupos especializados serán los responsables de la estimación del coste, y de la compra y adquisición del equipo y materiales.

En la Figura 1.4 se muestra en forma de diagrama la secuencia de los pasos en el diseño, construcción y puesta en marcha de una planta de un proceso químico típico, y en la Figura 1.5 se muestra la organización de un grupo de proyectos típico. Cada paso en el proceso del diseño no se separa de forma clara de los otros como se indica en la Figura 1.4; ni tampoco la secuencia de acontecimientos está tan claramente definida. Existirá un intercambio constante de información entre las diferentes secciones de diseño a medida que el diseño se desarrolla, pero está claro que, en un diseño, algunos pasos deben estar en gran medida completados antes de poder empezar otros.

Un director de proyectos, a menudo un ingeniero químico de profesión, suele ser responsable de la coordinación del proyecto, como se muestra en la Figura 1.5. Además de la coordinación de las actividades de los diferentes grupos de especialistas que participan en el diseño, el director de proyectos garantizará que los trabajos intermedios que se pueden dar en el plan del proyecto se completen a tiempo y que el proyecto se mantenga ajustado al presupuesto previsto.

Como se estableció en la Sección 1.2.1, el diseño del proyecto debe comenzar, con una especificación clara definiendo el producto, capacidad, materias primas, proceso y localización del lugar. Si el proyecto se basa en un proceso y producto establecidos, se puede disponer de una especificación completa al inicio del proyecto. Para un producto nuevo, se desarrollarán especificaciones a partir de una evaluación económica de los procesos posibles, basada en investigaciones de laboratorio, ensayos en planta piloto e investigación de mercado del producto.

Algunas de las compañías de producción química más grandes tienen sus propias organizaciones de diseño de proyectos y éstas llevan a cabo el diseño e ingeniería de proyectos, y posiblemente la construcción, dentro de su propia organización. Más normalmente, el diseño y la construcción se llevan a cabo bajo contrato por una de las empresas internacionales de contratación de ingeniería, adquisición y construcción (empresas EPC: *Engineering, Procurement and Construction firms*).

El conocimiento técnico (“know-how”) para el proceso puede provenir de la compañía de operación o podría estar “licenciado” por el contratista o un vendedor de tecnología. La compañía operadora, el proveedor de la tecnología y el contratista trabajarán en estrecha colaboración en todas las etapas del proyecto.

En muchos proyectos actuales, la compañía operadora bien puede ser una unión de varias compañías diferentes. El proyecto se puede llevar a cabo entre compañías de diferentes partes del mundo. Un

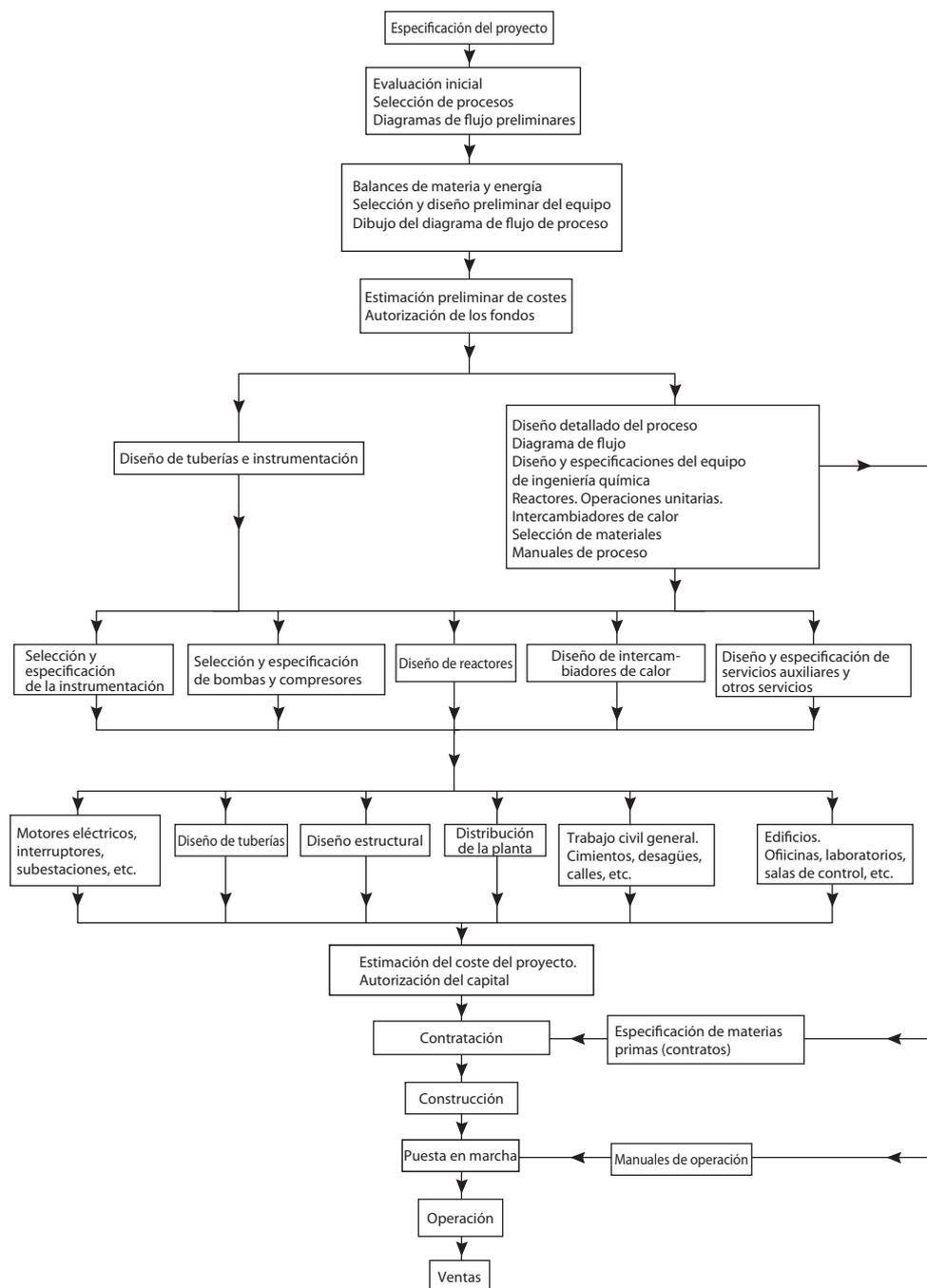


Figura 1.4. La estructura de un proyecto de ingeniería química.

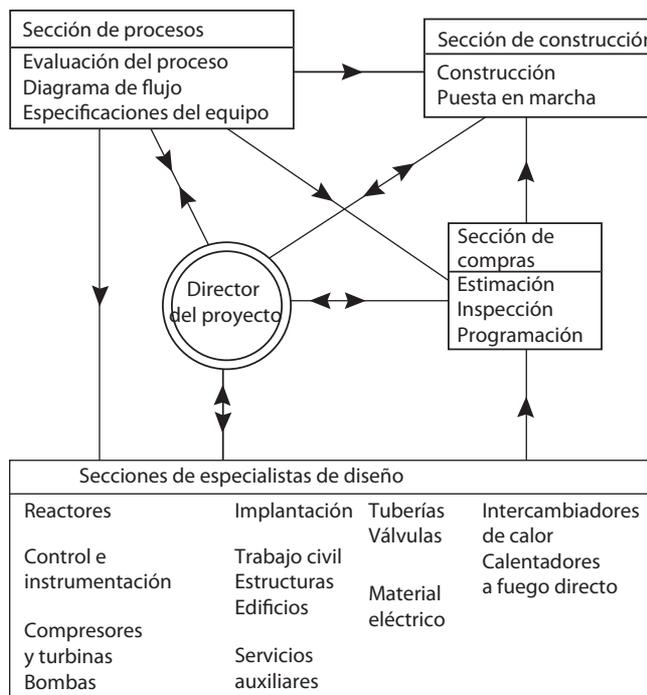


Figura 1.5. Organización de un proyecto.

buen trabajo en equipo, comunicaciones y gestión del proyecto son, por lo tanto, especialmente importantes para asegurar que el proyecto se realizará con éxito

1.5. DOCUMENTACIÓN DEL PROYECTO

Como se muestra en la Figura 1.5 y se describe en la Sección 1.4, el diseño y la ingeniería de un proceso químico requieren la cooperación de muchos grupos especializados. Una cooperación efectiva depende de una comunicación efectiva, y todas las organizaciones de diseños tienen procedimientos formales para el manejo de la información y documentación del proyecto. La documentación del proyecto incluirá:

1. Correspondencia general dentro del grupo de diseño y con:
 - Departamentos gubernamentales
 - Vendedores de equipos
 - Personal del lugar
 - El cliente
2. Hojas de cálculo
 - Cálculos del diseño
 - Estimación de costes
 - Balances de materia y de energía

3. Dibujos
 - Diagramas de flujo
 - Diagramas de tuberías e instrumentación
 - Diagramas de distribución
 - Planos del lugar
 - Detalles del equipo
 - Diagramas de tuberías (isométricos)
 - Dibujos arquitectónicos
 - Bocetos del diseño
4. Hojas de especificación
 - La base del diseño
 - Especificaciones de las materias primas y de los productos
 - Un listado del equipo
 - Hojas para el equipo, tales como: intercambiadores de calor, bombas, calefactores, etc.
5. Información sobre la salud, la seguridad y el ambiente
 - Hojas de seguridad de los productos (fichas MSDN)
 - Documentación HAZOP o HAZAN (véase Capítulo 9)
 - Evaluaciones de las emisiones y permisos
6. Pedidos de compra
 - Presupuestos
 - Facturas

Se asigna un número de código a todos los documentos para facilitar las referencias cruzadas, el archivo y la recuperación.

Hojas de cálculo

El ingeniero de diseño deberá desarrollar el hábito de realizar los cálculos de modo que se puedan entender fácilmente y comprobar por otros. Es una buena práctica incluir en las hojas de cálculo la base de cálculo, y cualquier suposición y aproximación hecha, con suficientes detalles de los métodos, así como la aritmética, para su comprobación. Los cálculos de diseño se realizan normalmente en hojas estándares. El encabezamiento en la parte superior de cada hoja debe incluir: el título del proyecto y el número de identificación, el número y la fecha de revisión y, lo más importante, la firma (o iniciales) de la persona que ha revisado el cálculo. En el Apéndice G se muestra una plantilla de una hoja de cálculo y se puede descargar en formato Excel MS de Internet: <http://elsevierdirect.com/companions>.

Dibujos

Todos los dibujos de proyectos se dibujan normalmente en hojas impresas especiales; con el nombre de la compañía; título y número del proyecto; título del dibujo y el número de identificación; nombre del dibujante y persona que revisa el dibujo; todo colocado de forma clara en una caja en la esquina de la parte inferior derecha. Se deberá también prever el poder anotar todas las modificaciones realizadas del esquema inicial.

Los dibujos deben ajustarse a las convenciones aceptadas de dibujo, preferentemente aquellas establecidas por los estándares nacionales. En los Capítulos 4 y 5 se discuten los símbolos utilizados para los diagramas de flujo y los diagramas de tuberías e instrumentación. En la mayoría de las empresas de diseño, se utilizan actualmente métodos de diseño asistidos por ordenador (abreviatura inglesa: CAD)

para realizar los dibujos requeridos para todos los aspectos de un proyecto: diagramas de flujo, tuberías e instrumentación, trabajo mecánico y civil. Mientras que las versiones oficiales de los dibujos están normalmente desarrolladas por un profesional, el ingeniero de diseño necesitará frecuentemente llevar a cabo cambios en los dibujos o hacer modificaciones menores en los diagramas de flujo, por lo que es útil tener algunos conocimientos de los programas informáticos de dibujo.

Hojas de especificaciones

Las hojas de especificaciones estándares se utilizan normalmente para transmitir la información requerida para el diseño detallado, o la compra de los distintos equipos; tales como intercambiadores de calor, bombas, columnas, reactores a presión, etc.

Así como garantizan que la información se presenta de forma clara y de modo inequívoco, las hojas de especificaciones estándares sirven como listas de comprobación para asegurar que se incluye toda la información necesaria.

En el Apéndice G se dan ejemplos de hojas de especificaciones de equipos. Estas hojas de especificaciones se utilizarán en ejemplos a lo largo de este libro. Están disponibles plantillas en blanco de estas hojas de especificaciones en formato Excel MS en la dirección <http://elsevierdirect.com/companions>. A menudo se utilizan también hojas de cálculo estándares para los cálculos que se repiten normalmente en un diseño.

Manuales de procesos

Los manuales de procesos se preparan normalmente por el grupo de diseño de procesos para describir el proceso y las bases del diseño. Junto con el diagrama de flujo proporcionan una descripción técnica completa del proceso.

Manuales de operación

Los manuales de operación contienen las instrucciones detalladas, paso a paso, de la operación del proceso y del equipo. Se preparan normalmente por el personal de operación de la compañía, pero también se pueden confeccionar por un contratista o propietario de la licencia de tecnología como parte del paquete de transferencia de tecnología para un cliente con menor experiencia. Los manuales de operación se utilizan para la instrucción y formación del operario, y para la preparación de las instrucciones del funcionamiento oficial de una planta.

Revisión, comprobación y firma

A pesar de los mejores esfuerzos de los ingenieros trabajando en un diseño, casi siempre se realizan errores en los cálculos y los dibujos del diseño y en la transcripción de los números entre diferentes programas de ordenador o entre los programas de ordenador y otra documentación del proyecto. Es importante eliminar el mayor número de estos errores cuanto sea posible antes de empezar la compra y construcción, ya que más adelante podrían requerirse correcciones costosas en el proyecto.

Los ingenieros de diseño son responsables normalmente de la calidad de su trabajo, y es una buena idea desarrollar el hábito de comprobar los cálculos a lo largo del proceso de diseño. Como se indica en los Capítulos 2 y 3, se pueden usar frecuentemente balances de materia y de energía rápidos para confirmar que las respuestas son aproximadamente correctas. En este libro se introducen algunos métodos

abreviados y reglas de oro o heurísticos que pueden ser útiles también para confirmar con más detalle los cálculos del diseño.

En los proyectos industriales, el diseño se comprueba y se revisa también por un ingeniero de diseño sénior, que debe entonces visar el cálculo, dibujo o hoja de especificaciones para indicar que es satisfactorio. Las plantillas usadas para los cálculos y las hojas de especificaciones tienen normalmente un espacio para indicar quién ha revisado y aprobado la validez del diseño. En algunos casos, el revisor debe ser un ingeniero licenciado o certificado, un ingeniero colegiado en Reino Unido o un ingeniero profesional en Estados Unidos.

1.6. CÓDIGOS Y ESTÁNDARES

La necesidad de una estandarización se planteó temprano en la evolución de la industria de ingeniería moderna. Whitworth introdujo la primera rosca de tuerca estándar para obtener una medida de la intercambiabilidad entre diferentes fabricantes en 1841. Los estándares de ingeniería modernos cubren una función mucho más amplia que el intercambio de partes. En la práctica de la ingeniería abarcan:

1. Materiales, propiedades y composiciones.
2. Procedimientos de ensayo para rendimiento, composiciones y calidad.
3. Tamaños preferidos, por ejemplo, tubos, platos, secciones, etc.
4. Métodos de diseño, inspección y fabricación.
5. Códigos de prácticas para operación y seguridad de la planta.

Los términos *estándar* y *código* se utilizan de forma intercambiable, aunque *código* debería reservarse para un código de práctica que cubre, un diseño recomendado o un procedimiento de operación; y *estándar* para tamaños preferidos, composiciones, etc.

Todos los países desarrollados, y muchos de los países en desarrollo, tienen organizaciones nacionales estándares, responsables para la emisión y mantenimiento de los estándares para las industrias productoras, y para la protección de los consumidores.

En el Reino Unido, la preparación y promulgación de los estándares nacionales son la responsabilidad de la Institución británica de estándares (BSI). La preparación de los estándares es en gran parte responsabilidad de los comités de personas de la industria apropiada, las instituciones de ingenieros profesionales, y otras organizaciones interesadas. Todos los estándares británicos publicados están enumerados en el Catálogo del Instituto Estándar Británico, que está disponible en internet en www.BSI-global.com. Actualmente muchos de los estándares británicos se han armonizado con los estándares europeos.

La organización internacional para la estandarización (ISO) coordina la publicación de los estándares internacionales. ISO es una red de los institutos nacionales de estándares de 157 países y ha publicado más de 16.500 estándares internacionales. Muchos de los estándares ISO que se han adoptado son variantes de los estándares nacionales o, en algunos casos, estándares que se han desarrollado por organizaciones comerciales. Se puede obtener información de los estándares ISO en www.iso.org. Otra agencia internacional importante es la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), que se fundó en 1906, 41 años antes que la ISO. La IEC reúne estándares para equipos eléctricos y electrónicos, y por lo tanto juega un papel importante en la recopilación de estándares para instrumentaciones de procesos y sistemas de control; para más información véase www.iec.ch. Muchos estándares IEC son co-esponsorizados por la ISO.

Los países europeos utilizaban para cada mantenimiento sus estándares nacionales, pero de acuerdo con el Artículo 7 de la Directiva parlamentaria europea 98/34/EC, los estándares nuevos para los estados miembros de la Unión Europea deben estar en consonancia con los estándares europeos o internacionales. Los estándares europeos están recogidos por el Comité europeo para la estandarización (CEN), el comité europeo para la estandarización electrotécnica (CONELEC) y el instituto europeo de estándares de telecomunicaciones (ETSI). Los estándares europeos se deben obtener de las organizaciones nacionales miembros tales como BSI; los detalles sobre el proceso de armonización de los estándares europeos se recogen en la dirección de Internet de CEN en www.cen.eu.

En los Estados Unidos, la organización del gobierno responsable de coordinar la información de los estándares es el Instituto nacional de estándares y tecnología (NIST); los estándares se publican por las diversas organizaciones federales, estatales y comerciales. Las principales de interés para los ingenieros son aquellos publicados por el Instituto de estándares nacional americano (ANSI), el instituto petrolífero americano (API), la sociedad americana para los materiales de ensayo (ASTM), la sociedad americana de los ingenieros mecánicos (ASME) (reactores a presión y tuberías), la asociación nacional de protección contra el fuego (NFPA) (seguridad), la asociación de productores de intercambiadores tubulares (TEMA) (intercambiadores de calor) y la sociedad de instrumentación, sistemas y automatización (ISA) (control de procesos). La mayoría de las provincias canadienses aplican los mismos estándares utilizados por los Estados Unidos.

Las listas de los códigos y estándares y copias de la mayoría de las versiones actuales se pueden obtener de las agencias nacionales de estándares o por suscripción en webs comerciales tales como IHS (www.ihs.com).

Además de los diversos estándares nacionales y códigos, las organizaciones de diseño más grandes tienen sus propios estándares (en casa). Gran parte de los detalles en el trabajo de ingeniería de diseño son rutinarios y repetitivos, y esto ahorra tiempo y dinero, y asegura la conformidad entre proyectos, si los diseños estándares se utilizan siempre que sea posible.

Los fabricantes de equipos estandarizan (normalizan) también para producir diseños estandarizados y gamas de tamaño para piezas de uso común; tales como motores eléctricos, bombas, intercambiadores de calor, tuberías y accesorios para tuberías. Se ajustarán a los estándares nacionales, donde existen, o a aquellos publicados por las asociaciones de comercio. Está claro que es más económico producir una gama limitada de tamaños estándar que tener que crear cada pedido como un trabajo especial.

Para el diseñador, el uso de un tamaño de componente estandarizado permite la fácil integración de una pieza del equipo en el resto de la planta. Por ejemplo, si está especificada una gama estándar de bombas centrifugas, entonces se conocerán las dimensiones de la bomba, y esto facilita el diseño de las placas base, las conexiones de las tuberías y la selección de los motores motrices: los motores eléctricos estándar que se utilizarán. Para una compañía de operación, la estandarización de los diseños y gamas de equipos aumenta la intercambiabilidad y reduce la existencia de piezas de repuesto que deben tenerse en almacenes de mantenimiento.

Aunque está claro que existen unas ventajas considerables que se pueden obtener por la utilización de estándares en el diseño, también existen algunas desventajas. Los estándares imponen restricciones al diseñador. El tamaño estándar más próximo normalmente se seleccionará sobre la realización de un cálculo de un diseño (redondeando hacia arriba) pero no será necesariamente el tamaño óptimo; aunque como el tamaño estándar será más barato que un tamaño especial, normalmente será la mejor elección desde el punto de vista del coste inicial de capital. Los métodos de diseño dados en los códigos y estándares son, por su naturaleza, históricos, y no necesariamente incorporaran las últimas técnicas.

En el Capítulo 13 se ilustra el uso de estándares en los diseños en la discusión del diseño de reactores a presión. Los códigos de diseño y estándares relevantes se citan a lo largo de este libro.

1.7. FACTORES DE DISEÑO (MÁRGENES DE DISEÑO)

El diseño es un arte inexacto; errores e incertidumbres surgen de las incertezas de los datos de diseño disponibles y de las aproximaciones necesarias en los cálculos del diseño. Los diseñadores experimentados incluyen un grado de sobredimensionamiento, conocido como factor de diseño, margen de diseño o factor de seguridad, para asegurar que el diseño que se realiza cumple con las especificaciones de producto y opera seguro.

En el diseño mecánico y estructural, los factores de diseño que se utilizan para compensar las incertidumbres en las propiedades de los materiales, en los métodos de diseño, en las operaciones de fabricación están bien establecidos. Por ejemplo, un factor de alrededor de 4 en la resistencia a la tracción, o alrededor de 2,5 sobre el 0,1% del esfuerzo de prueba, se utiliza normalmente en diseños estructurales generales. Los factores de diseño recomendados se recogen en los códigos y los estándares. En el Capítulo 13 se muestra la selección de los factores de diseño en un diseño de ingeniería mecánica, en la discusión del diseño de reactores a presión.

Los factores de diseño se aplican también en el diseño de procesos para obtener alguna tolerancia en el diseño. Por ejemplo, los caudales promedio de una corriente de proceso calculados a partir de los balances de materia normalmente se incrementan por un factor, que suele ser del 10%, para establecer los caudales máximos del equipo, instrumentación, y diseño de tuberías. Este factor dará cierta flexibilidad en la operación del proceso. Cuando se introducen los factores de diseño para obtener alguna contingencia en un diseño de un proceso, se deben acordar en la organización del proyecto, y estar escrito de forma clara en los documentos del proyecto (dibujos, hojas de cálculo y manuales). Si esto no se realiza, existe el peligro que en cada uno de los grupos especializados de diseño añadan sus propios “factores de seguridad”; resultando un diseño grosero e innecesariamente sobredimensionado. Las compañías especifican con frecuencia los factores de diseño en sus manuales de diseño.

Cuando se selecciona el factor de diseño, se tiene que realizar un balance entre el deseado para tener cuidado que el diseño sea adecuado y la necesidad de diseñar unos márgenes estrechos para continuar siendo competitivos. Cuando en los métodos de diseño y los datos la incertidumbre es grande se requiere utilizar factores de diseño mayores.

1.8. SISTEMAS DE UNIDADES

La mayoría de los ejemplos y ecuaciones en este libro utilizan las unidades SI; sin embargo, en la práctica los métodos de diseño, datos y estándares que el diseñador utilizará a menudo están sólo disponibles en las unidades científicas tradicionales y en las unidades de ingeniería. Los ingenieros químicos siempre han utilizado una diversidad de unidades; abrazando los sistemas científicos CGS y MKS, y ambos sistemas de ingeniería americano y británico. Aquellos ingenieros de las industrias más antiguas también han tenido que lidiar con algunas unidades tradicionales extrañas; tales como los grados Twaddle o grados API para la densidad y barriles para la cantidad. Aunque casi todas las sociedades de ingeniería han declarado su apoyo en la adopción de las unidades SI, pero es poco probable que suceda a nivel mundial durante muchos años. Además, muchos de los datos históricos útiles estarán siempre en unidades tradicionales y el ingeniero de diseño debe conocer como entender y convertir esta información. En una economía globalizada, los ingenieros utilizan diferentes sistemas de unidades incluso en una misma compañía, en particular en el sector de la contratación donde la elección de las unidades queda a criterio del cliente. Los ingenieros de diseño deben, por lo tanto, tener una familiaridad con SI, unida-

des métricas y tradicionales, y se presentan unos pocos de los ejemplos y muchos de los ejercicios en unidades tradicionales.

Normalmente la mejor práctica es trabajar en los cálculos del diseño en las unidades en las que se va a presentar el resultado; pero, si se prefiere trabajar en unidades SI, los datos se pueden convertir a unidades SI, el cálculo realizarlo, y el resultado convertirlo a las unidades que se requieren cada vez. En el Apéndice D se dan los factores de conversión para el sistema SI de la mayoría de las unidades científicas y de ingeniería utilizadas en los diseños de ingeniería.

Algunas licencias utilizan el sistema SI. Las temperaturas se dan en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$); los grados kelvin (K) sólo se utilizan cuando se requiere la temperatura absoluta en el cálculo. Las presiones se dan a menudo en bar (o atmósferas) en lugar de Pascales (N/m^2), ya que esto da una mejor idea de la magnitud de las presiones. En los cálculos técnicos el bar se puede tomar como equivalente a una atmósfera, cualquiera que sea la definición utilizada para atmósfera. A menudo se utilizan las abreviaciones bara y barg para denotar el bar absoluto y el bar relativo; análoga a psia y psig cuando la presión se expresa en libras fuerza por pulgada al cuadrado. Cuando se utiliza bar por si sola, sin cualificación, normalmente se toma como absoluta.

Para el esfuerzo, se utiliza N/m^2 , ya que estas unidades están aceptadas actualmente por los ingenieros, y la utilización de una unidad pequeña para el área ayuda a indicar que el esfuerzo es la fuerza por unidad de área en un punto (así como es también la presión). La unidad tradicional correspondiente para el esfuerzo es el ksi o mil libras por pulgada cuadrada. Para la cantidad, normalmente se utiliza el kmol en vez del mol, y para el caudal, kmol/h en lugar de mol/s, ya que esto da cifras más sensiblemente dimensionadas, que están también más cercanas con la unidad más familiar lb/h.

Para volúmenes y caudales volumétricos, se utilizan actualmente m^3 y m^3/h en preferencia a m^3/s , que da valores pequeños ridículos en los cálculos de ingeniería. Para pequeños caudales se utilizan litros por segundo, ya que es la unidad preferida para las especificaciones de las bombas.

Las capacidades de la planta se establecen normalmente sobre una base anual de caudal másico en toneladas métricas por año. Desafortunadamente, la literatura contiene una gran variedad de abreviaciones para toneladas métricas por año, incluyendo toneladas/año, toneladas métricas/año, MT/a (también kMTA = mil toneladas métricas por año), mtpa y el término correcto t/a. Las abreviaciones no estándares se utilizan de forma ocasional, aunque es importante para los ingenieros de diseño estar familiarizados con todos estos términos. La unidad t indica una tonelada métrica de 1000 kg. En este libro, la unidad ton se utiliza normalmente para describir una tonelada corta o ton US de 2000 lb (907 kg) en lugar de una ton larga o ton UK de 2240 lb (1016 kg), aunque algunos ejemplos utilizan ton grandes. La ton larga está más cerca de la ton métrica. Normalmente mil toneladas métricas se indican como un kilotón (kt); la unidad SI correcta gigagramo (Gg) se utiliza muy pocas veces.

En los Estados Unidos, los prefijos M y MM se utilizan frecuentemente para indicar mil y millón, que puede confundir a cualquiera que esté familiarizado con el uso de SI de M como una abreviatura de mega ($\times 10^6$). Esta práctica se evita normalmente, excepto en las unidades extensamente utilizadas de MMBtu (millón de unidades térmicas británicas) y la forma común de abreviar 1 millón de dólares como \$ 1 MM.

La mayoría de los precios se dan en dólares US, indicados en US\$ o \$, reflejando el hecho que los datos se originaron en los Estados Unidos. En el capítulo de la economía de procesos (Capítulo 6) se incluyen ejemplos que utilizan libras esterlinas británicas (£) y Euros (€).

Cuando, por conveniencia, se utilizan otras unidades en cifras o diagramas en vez de las SI, las escalas se dan también en SI, o se dan en el texto los factores de conversión apropiados. Cuando se presentan las ecuaciones en las unidades no SI se da normalmente una equivalencia métrica.

En la Tabla 1.1 se dan algunos factores de conversión aproximados para las unidades SI. Merece la pena memorizar aquellos correspondientes a las unidades de ingeniería tradicionales. En la tabla se muestran también los factores de conversión exactos. En el Apéndice D se ofrece una tabla de factores de conversión más comprensible.

Tabla 1.1. Conversiones aproximadas entre las unidades tradicionales y las unidades SI.

Magnitud	Unidad habitual inglesa	Unidad SI aprox.	Exacto
Energía	1 Btu	1 kJ	1,05506
Entalpía específica	1 Btu/lb	2 kJ/kg	2,326
Capacidad calorífica	1 Btu/lb°F	4 kJ/kg°C	4,1868
Coef. de transmisión de calor	1 Btu/ft ² h°F	6 W/m ² °C	5,678
Viscosidad	1 centipoise	1 mNs/m ²	1,000
	1 lbf/ft h	0,4 mNs/m ²	0,4134
Tensión superficial	1 dina/cm	1 mN/m	1,000
Presión	1 lbf/in ² (psi)	7 kN/m ²	6,894
	1 atm	1 bar	1,01325
Densidad		10 ⁵ N/m ²	
	1 lb/ft ³	16 kg/m ³	16,0185
	1 g/cm ³	1 kg/m ³	
Volumen	1 US gal 3,8	10 ⁻³ m ³	3,7854 × 10 ⁻³
Caudal volumétrico	1 US gal/min	0,23 m ³ /h	0,227

1 galón US = 0,84 galones imperiales (UK)

1 barril (petróleo) = 42 galones US = 0,16 m³ (exactamente 0,1590)

1 kWh = 3,6 MJ

1.9. OPTIMACIÓN

La optimización es una parte intrínseca del diseño: el diseñador busca la solución mejor, u óptima, para un problema.

Muchas decisiones de diseño se pueden realizar sin establecer y resolver formalmente un problema matemático de optimización. El ingeniero de diseño se basará a menudo en una combinación de experiencia y juicio, y en algunos casos el mejor diseño será obvio inmediatamente. Otras decisiones de diseño tienen un impacto insignificante en los costes de proceso por lo que tiene más sentido hacer una estimación cercana a la respuesta que plantear y resolver correctamente el problema de optimización. Sin embargo, en cada diseño existirán diferentes problemas que requerirán una optimización rigurosa. Esta sección presenta las técnicas para formular y resolver problemas de optimización, así como algunas de las trampas que se encuentran comúnmente en la optimización.

En este libro, la discusión de la optimización estará limitada, obviamente, a una descripción general breve de las principales técnicas utilizadas en el diseño de procesos y de equipos. Los ingenieros químicos que trabajan en la industria utilizan métodos de optimización para las operaciones de procesos mucho más que para hacer el diseño, como se discute en la Sección 1.9.11. Los estudiantes de ingeniería química se beneficiarían considerablemente de más clases de métodos de investigación operativa, que,

normalmente, son parte del currículum de la Ingeniería industrial. Estos métodos se utilizan en casi cada industria para planificar, programar, y gestionar la cadena de suministro: todas las operaciones críticas para la planta de operación y la dirección. Existe una literatura extensa de los métodos de investigación operativa y varios libros buenos de aplicación de los métodos de optimación en el diseño y operaciones de ingeniería química. En el texto clásico introductorio de Hillier y Lieberman (2002) se ofrece una buena visión general de los métodos de investigación operativa. Las aplicaciones de los métodos de optimación en la ingeniería química se discutieron por Rudd y Watson (1968), Stoecker (1989), Biegler et al. (1997), Edgar y Himmelblau (2001) y Diwekar (2003).

1.9.1. El objetivo del diseño

Un problema de optimación siempre se describe como la maximización o minimización de una cantidad llamada objetivo. Para los proyectos de diseño de ingeniería química, el objetivo sería una medida del grado de eficacia con el que el diseño cumple con las necesidades del cliente. Normalmente, será una medida del rendimiento económico. En la Tabla 1.2 se dan algunos objetivos típicos.

El objetivo general corporativo es normalmente maximizar los beneficios, pero el ingeniero de diseño a menudo encontrará más conveniente utilizar otros objetivos cuando trabaja en los subcomponentes del diseño. En la Sección 1.9.4 se discute con más detalle la optimación de subsistemas.

El primer paso en la formulación del problema de optimación es establecer el objetivo como una función de un conjunto finito de variables, algunas veces referidas como variables de decisión:

$$z = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (1.1)$$

donde

z = objetivo

$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ = variables de decisión

Esta función se llama función objetivo. Las variables de decisión pueden ser independientes, pero normalmente están relacionadas entre sí por muchas ecuaciones de restricción. El problema de optimación se puede establecer entonces como una maximización o minimización de la función objetivo dependiente del conjunto de restricciones. En la siguiente sección se discuten las ecuaciones de restricción.

A menudo los ingenieros de diseño se enfrentan a dificultades en la formulación de la función objetivo. Algunos de los objetivos económicos que se utilizan ampliamente en la toma de decisión de inversiones llevan a problemas de optimación difíciles intrínsecamente. Por ejemplo, el caudal neto

Tabla 1.2. Objetivos de optimación de diseño típicos

Maximizar	Minimizar
Valor actual neto del proyecto	Gastos del proyecto
Recuperación de la inversión	Coste de producción
Productividad del reactor por unidad de volumen	Coste anual total
Disponibilidad de la planta (tiempo en funcionamiento)	Inventario de la planta (por razones de seguridad)
Rendimiento del producto principal del proceso	Formación de productos residuales

descontado de recuperación (abreviatura inglesa: DCFROR) es difícil de expresar como una función sencilla y es altamente no lineal, mientras que el valor neto actual (abreviatura inglesa: NPV) aumenta con el tamaño del proyecto y no está limitada, a menos que se establezca una limitación en el tamaño de la planta o en el capital disponible. Por lo tanto, la optimización se lleva a cabo frecuentemente usando objetivos sencillos tales como “minimizar costes de producción”. Los costes de salud, seguridad, impacto medioambiental e impacto social y los beneficios son difíciles de cuantificar y se refieren normalmente a beneficios económicos. Estos factores se pueden introducir como restricciones, pero pocos ingenieros estarían a favor de construir una planta en la que cada pieza del equipo se diseñara para la seguridad y el rendimiento medioambiental mínimos permitidos legalmente.

Una complicación adicional en la formulación de la función objetivo es la cuantificación de la incertidumbre. Las funciones de objetivos económicos son normalmente muy sensibles a los precios utilizados para las entradas, materias primas y energía, y también a las estimaciones del coste del capital del proyecto. Estos costes y precios se pronostican o estiman y normalmente están sujetos a un error considerable. En las Secciones 6.3 y 6.4 se discuten la estimación de costes y la previsión de precios. También puede existir incertidumbre en las variables de decisión, ya sea por variación en las entradas de la planta, por variaciones introducidas por operación inestable de la planta, o por la imprecisión en los datos del diseño y las ecuaciones de restricción. La optimización en presencia de incertidumbres es un tema especializado por derecho propio y está fuera del alcance de este libro. Véase el Capítulo 5 de Diwekar (2003) para una buena introducción a este tema.

1.9.2. Limitaciones y grados de libertad

Las limitaciones en la optimización son un conjunto de ecuaciones que limitan las variables de decisión y las relacionan entre sí.

Si se escribe \mathbf{x} como un vector de n variables de decisión, entonces se puede establecer el problema de optimización como:

$$\begin{array}{ll} \text{Optimar (Max. o Min.)} & z = f(\mathbf{x}) \\ \text{limitada por:} & \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0} \\ & \mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \end{array} \quad (1.2)$$

donde

z = objetivo escalar

$f(\mathbf{x})$ = función objetivo

$\mathbf{g}(\mathbf{x})$ = un vector de m_i desigualdades limitantes

$\mathbf{h}(\mathbf{x})$ = un vector de m_e ecuaciones limitantes

El número total de limitaciones es $m = m_i + m_e$.

Las limitaciones de igualdad surgen de las ecuaciones de conservación (balances másicos, molares, de energía y de cantidad de movimiento) y relaciones constitutivas (las leyes de la química y la física, correlaciones de datos experimentales, ecuaciones de diseño, etc.). Cualquier ecuación que se introduce en el modelo de optimización que contenga un signo “=” se convertirá en una limitación de igualdad. A lo largo de este libro pueden encontrarse muchos ejemplos de estas ecuaciones.

Las limitaciones de desigualdad surgen normalmente de limitaciones externas discutidas en la Sección 1.2: límites de seguridad, límites legales, límites de mercado y económicos, límites técnicos exigi-

dos por los códigos y los estándares, especificaciones del producto y alimentación, disponibilidad de recursos, etc. Algunos ejemplos de limitaciones de desigualdad son las siguientes:

- Pureza del producto principal $\geq 99,99\%$ en peso
- Contenido de agua de alimentación ≤ 20 ppm en peso
- Emisiones $\text{NO}_x \leq 50$ kg/año
- Caudal de producción $\leq 400\,000$ toneladas métricas por año
- Temperatura de diseño máxima para una caldera ASME y un reactor a presión de la sección VIII del código división 2 ≤ 900 °F
- Capital de inversión $\leq \$50$ MM (50 millones de dólares)

El efecto de las limitaciones es limitar el espacio paramétrico. Ello se puede ilustrar utilizando un problema sencillo de dos parámetros:

$$\begin{aligned} \text{Max.} \quad z &= x_1^2 + 2x_2^2 \\ x_1 + x_2 &= 5 \\ x_2 &\leq 3 \end{aligned}$$

Las dos limitaciones se pueden representar en un gráfico de x_1 frente a x_2 , como en la Figura 1.6.

En el caso de este ejemplo, está claro por inspección que el conjunto de limitaciones no limita el problema. En el límite $x_1 \rightarrow \infty$, la solución de la limitación de igualdad es $x_2 \rightarrow -\infty$, y la función objetivo da $z \rightarrow \infty$, de modo que no se puede encontrar un máximo. Los problemas de este tipo se refieren como “sin límites”. Para que este problema tenga solución se necesita una limitación adicional de la forma:

$$\begin{aligned} x_1 &\leq a \quad (\text{donde } a > 2) \\ x_2 &\geq b \quad (\text{donde } b < 3) \\ \text{o } h(x_1, x_2) &= 0 \end{aligned}$$

para definir un espacio de búsqueda cerrado.

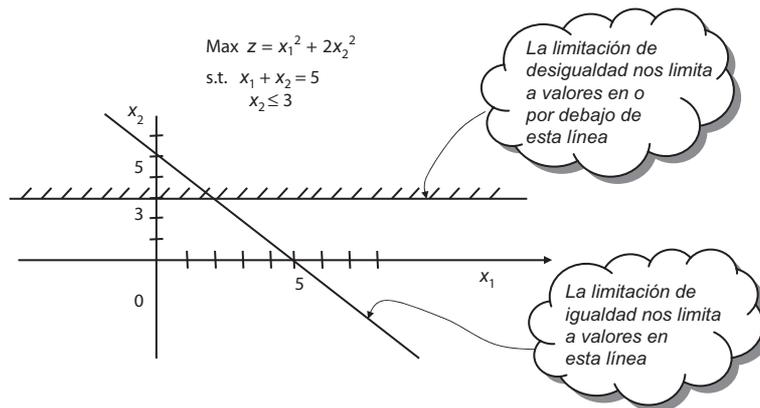


Figura 1.6. Limitaciones en un problema de optimización sencillo.

Es posible también restringir más el problema. Por ejemplo, si se tiene el problema:

$$\begin{aligned} \text{Max } z &= x_1^2 + 2x_2^2 \\ \text{s.t. } x_1 + x_2 &= 5 \\ x_2 &\leq 3 \\ x_1 &\leq 1 \end{aligned}$$

En este caso, se puede ver en la Figura 1.7 que la región posible definida por las limitaciones de desigualdad no contiene ninguna solución para la limitación de igualdad. El problema, por lo tanto, es inviable tal como está planteado.

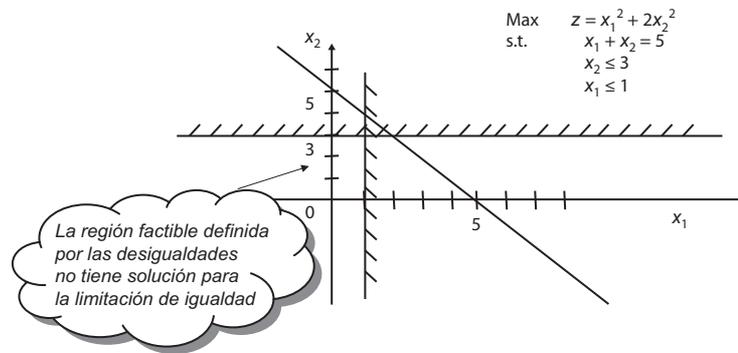


Figura 1.7. Un problema sobre-restringido.

Grados de libertad

Si el problema tiene n variables y m_e limitaciones de calidad entonces tiene $n - m_e$ grados de libertad. Si $n = m_e$ no existen entonces grados de libertad y el conjunto de m_e ecuaciones se puede resolver para las n variables. Si $m_e > n$ entonces el problema está sobre-especificado. En la mayoría de los casos, sin embargo, $m_e < n$ y $n - m_e$ es el número de parámetros que se pueden ajustar independientemente para encontrar el óptimo.

Cuando se introducen limitaciones de desigualdad en el problema, normalmente ponen límites en el intervalo en el que los parámetros se pueden variar y por lo tanto reducir el espacio donde la búsqueda para el óptimo se lleve a cabo. A menudo, la solución óptima para un problema limitado se encuentra en el borde del espacio, i.e., en uno de los límites de las restricciones de desigualdad. En tales casos, el límite de desigualdad se convierte en una igualdad y se dice que es “activo”. Es posible con frecuencia usar perspectiva ingenieril y entendimiento de la química y la física para simplificar el problema de optimización. Si se entiende bien el comportamiento de un sistema, entonces el ingeniero de diseño puede decidir que un límite de desigualdad puede ser activo. Mediante la conversión de la limitación de desigualdad en limitación de igualdad, el número de grados de libertad se reduce en uno y el problema se hace más sencillo.

Esto se puede ilustrar mediante un ejemplo de optimización de un reactor único. El tamaño y el coste de un reactor son proporcionales al tiempo de residencia, que disminuye cuando la temperatura aumenta. La temperatura óptima normalmente es un compromiso entre el coste del reactor y la forma-

ción de subproductos en las reacciones secundarias; pero si no hubiera reacciones secundarias, entonces la siguiente limitación sería la temperatura máxima permitida por el código de diseño del reactor a presión. Las aleaciones más caras podrían permitir en la operación temperaturas más elevadas. La variación del coste del reactor con la temperatura será algo parecido a la curva de la Figura 1.8 donde T_A , T_B y T_C son las temperaturas máximas permitidas por el código de diseño del reactor para las aleaciones A, B y C respectivamente.

El ingeniero de diseño podría formular este problema de diferentes maneras. Se podría resolver como tres problemas diferentes, cada uno correspondiendo a cada aleación, y cada uno con una limitación en la temperatura de $T < T_{\text{aleación}}$. El ingeniero de diseño elegirá entonces la solución que diera el mejor valor de la función objetivo. El problema se podría también formular como un programa no lineal de números entero mezclados con variables de números enteros para determinar la selección de la aleación y conseguir las limitaciones apropiadas (véase la Sección 1.9.10). El ingeniero de diseño podría también reconocer que los costes de la aleación A son mucho más bajos que los de la aleación B, y las aleaciones superiores sólo ofrecen una extensión relativamente pequeña en el intervalo de temperaturas permitidas. Está claro que el coste disminuye con la temperatura, por ello la temperatura óptima será T_A para la aleación A y T_B para la aleación B. A menos que el ingeniero de diseño sea consciente de algunos otros efectos que tengan un impacto en el coste como el aumento de la temperatura, se puede escribir $T = T_A$ como una restricción de igualdad y resolver el problema resultante. Si el coste de la aleación B no es excesivo entonces sería prudente también resolver el problema con $T = T_B$, usando el coste de la aleación B.

La formulación correcta de las limitaciones es el paso más importante para establecer un problema de optimización. A menudo los ingenieros inexpertos no son conscientes de muchas limitaciones y consecuentemente encuentran diseños “óptimos” que son descartados como inadmisibles por diseñadores expertos.

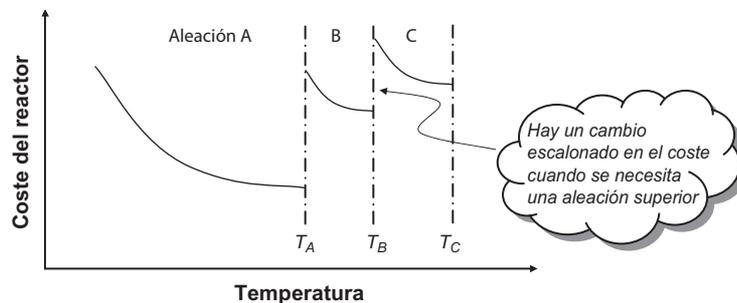


Figura 1.8. Variación del coste del reactor con la temperatura.

1.9.3. Compromisos

Si el valor óptimo del objetivo no es un límite restringido entonces normalmente se determinará por un compromiso entre dos o más efectos. Los compromisos son muy comunes en los diseños, debido a que un mejor rendimiento en términos de mayor pureza, mayor recuperación o menor energía o reducción de materias primas, se produce normalmente a expensas de gastos de capital más elevados, gastos de funcionamiento o de ambos. El problema de optimización debe captar el compromiso entre coste y beneficio.

Un ejemplo muy conocido de compromiso es la optimización de un proceso de recuperación de calor. Un grado elevado de recuperación de calor requiere una propuesta de temperatura cercana en los

intercambiadores de calor (véase Sección 3.17), lo que conduce a un coste de capital elevado ya que los intercambiadores requieren más área superficial. Si se aumenta la temperatura mínima propuesta se reduce entonces el coste del capital pero se recupera menos energía. Se puede determinar el coste del capital y el coste energético frente a la temperatura propuesta mínima, como se muestra esquemáticamente en la Figura 1.9. Si se anualiza el coste del capital (véase Sección 6.7) entonces se pueden añadir dos costes para obtener un coste total. El valor óptimo de la temperatura propuesta, $\Delta T_{\text{óptima}}$ se da entonces en el punto mínimo en la curva de coste total.

Algunos compromisos encontrados en el diseño de plantas químicas incluyen:

- Más equipos de separación y costes de operación frente a menor pureza de producto.
- Mayor coste de reciclado frente a mayor utilización de alimentación y formación de residuos.
- Mayor recuperación de calor frente a red de intercambiadores de calor más económicas.
- Mayor reactividad a presiones elevadas frente a reactores más caros y costes de compresión elevados.
- Reacciones rápidas a temperaturas elevadas frente a degradación del producto.
- Subproductos comercializables frente a más gastos en la planta.
- Vapor y electricidad más económicos frente a mayor coste del capital fuera de la planta.

Indicar un problema de optimización como un compromiso entre dos efectos es útil, a menudo, en la conceptualización del problema y la interpretación de la solución óptima. Por ejemplo, en el caso de un proceso de recuperación de calor, se encuentra normalmente que la forma de la curva del coste total en la Figura 1.9 es relativamente plana en el intervalo $15\text{ °C} < \Delta T_{\text{óptima}} < 40\text{ °C}$. Conociendo esto, los diseñadores más expertos no se preocupan en encontrar el valor de $\Delta T_{\text{óptima}}$, sino que seleccionan un valor para la propuesta de temperatura mínima dentro del intervalo $15\text{ °C} - 40\text{ °C}$, basado en el conocimiento de las preferencias del cliente para una mayor recuperación de energía o menores gastos de capital.

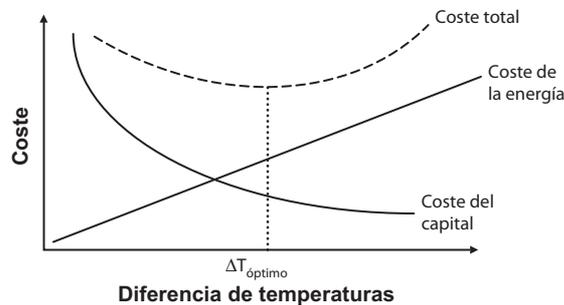


Figura 1.9. Compromiso capital-energía en un proceso de recuperación de calor.

1.9.4. Descomposición del problema

La tarea de optimar formalmente el diseño de una planta de procesos compleja involucrando diferentes cientos de variables, con interacciones complejas, es complicada, pero no imposible. La tarea se puede reducir dividiendo el proceso en unidades más manejables, identificando las variables clave y concentrando el trabajo donde el esfuerzo realizado ofrezca el mejor beneficio. La subdivisión, y optimización de las subunidades más que el total, no necesariamente dará el diseño óptimo para el proceso total. La optimización de una unidad puede ser a expensas de otra. Por ejemplo, por lo general, será satisfactorio optimar la razón de reflujo en una columna de fraccionamiento independientemente del resto de la planta, pero si la columna es una parte de una etapa de separación siguiendo a un reactor, en el que el

producto se separa de los materiales no reaccionados, entonces el diseño de la columna interaccionará, y puede determinar la optimización del diseño del reactor. Siempre se debe tener cuidado para garantizar que los subcomponentes no estén optimizados a expensas de otras partes de la planta.

1.9.5. Optimización de una única variable de decisión

Si el objetivo es una función de una única variable, x , la función objetivo $f(x)$ se puede derivar respecto a x para dar $f'(x)$. Cualquier punto estacionario en $f(x)$ se puede entonces encontrar como las soluciones de $f'(x) = 0$. Si la segunda derivada de la función objetivo es mayor que cero en un punto estacionario entonces el punto estacionario es un mínimo local. Si la segunda derivada es menor que cero entonces el punto estacionario es un máximo local y si es igual a cero entonces es un punto "silla" o inflexión. Si x está ligada a limitaciones, entonces se debe comprobar también los valores de la función objetivo en los límites restringidos superior e inferior. Similarmente, si $f(x)$ es discontinua, entonces se deberá revisar el valor de $f(x)$ en cada lado de la discontinuidad.

El procedimiento se puede resumir con el siguiente algoritmo:

$$\begin{aligned} \text{Min.} \quad z &= f(x) \\ x &\geq x_L \\ x &\leq x_U \end{aligned} \quad (1.3)$$

1. Resolver $f' = \frac{df(x)}{dx} = 0$ para encontrar los valores de x_s
2. Evaluar $f'' = \frac{d^2f(x)}{dx^2}$ para cada valor de x_s . Si $f'' > 0$ entonces x_s corresponde a un mínimo local en $f(x)$.
3. Evaluar $f(x_s)$, $f(x_L)$ y $f(x_U)$.
4. Si la función objetivo es discontinua entonces evaluar $f(x)$ en ambos lados de la discontinuidad, x_{D1} y x_{D2} .
5. El óptimo total es el valor del conjunto $(x_L, x_s, x_{D1}, x_{D2}, x_U)$ que dan los valores más bajos de $f(x)$.

Esto se ilustra gráficamente en la Figura 1.10a para una función objetivo continua. En la Figura 1.10a, x_L es el punto óptimo, aunque hay un mínimo local para x_{S1} . La Figura 1.10b ilustra el caso de una función objetivo discontinua. Las funciones discontinuas son bastante comunes en el diseño de ingeniería, surgiendo, por ejemplo, cuando los cambios en la temperatura o en el pH causan un cambio en la metalurgia. En la Figura 1.10b el óptimo es para x_{D1} , aunque hay un mínimo local a x_S .

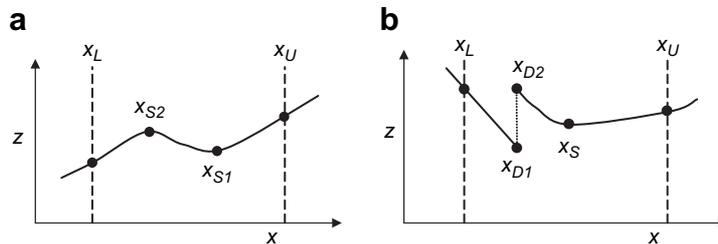


Figura 1.10. Optimización de una variable única entre límites.

Si la función objetivo se puede expresar como una ecuación diferencial entonces es normalmente fácil también trazar una gráfica como las de la Figura 1.10 y determinar rápidamente si el óptimo corresponde a un punto estacionario o una limitación.

1.9.6. Métodos de búsqueda o investigación

En los problemas de diseño, la función objetivo no se puede escribir muy a menudo como una ecuación sencilla que se diferencie fácilmente. Esto es especialmente verdad cuando la función objetivo requiere la solución de grandes modelos por ordenador, posiblemente usando diferentes tipos de programas y requiriendo varios minutos, horas o días para conseguir una solución única. En tales casos, el óptimo se encuentra utilizando un método de búsqueda o investigación. El concepto de método de búsqueda se explica de forma más fácil para problemas de una sola variable, pero los métodos de búsqueda son también el núcleo de los algoritmos de resolución para la optimización de problemas multivariados.

Búsqueda sin restricciones

Si la variable de decisión no está limitada por restricciones entonces el primer paso es determinar un intervalo en el que se encuentre el óptimo. En una búsqueda sin restricciones se realiza una estimación inicial de x y se supone un tamaño de paso, h . Entonces se calcula $z_1 = f(x)$, $z_2 = f(x + h)$, y $z_3 = f(x - h)$. A partir de los valores z_1 , z_2 y z_3 , se determina la dirección de la búsqueda que conduce a una mejora en el valor del objetivo, dependiendo si se desea minimizar o maximizar z . Entonces se continúa aumentando (o disminuyendo) x en pasos sucesivos de h hasta que se supere el óptimo.

En algunos casos, se puede desear acelerar el procedimiento de búsqueda, en estos casos el tamaño del paso se puede duplicar en cada etapa de cálculo. Esto ofrece la secuencia $f(x + h)$, $f(x + 3h)$, $f(x + 7h)$, $f(x + 15h)$, etc.

La búsqueda sin restricciones es un método relativamente sencillo de limitar el óptimo para un problema que no está restringido. En los problemas de diseño de ingeniería casi siempre es posible establecer límites superiores e inferiores para cada parámetro, por eso los métodos de búsqueda sin restricciones no se usan normalmente en el diseño.

Una vez se ha establecido un intervalo que contenga el óptimo, se pueden utilizar los métodos de búsqueda de intervalos restringidos. Éstos se pueden clasificar en términos generales como métodos directos que buscan el óptimo eliminando regiones en las que éste no se encuentra, y métodos indirectos que encuentran el óptimo realizando una estimación aproximada de $f'(x)$.

Búsqueda regular (Investigación del intervalo de tres-puntos)

La búsqueda del intervalo de tres-puntos comienza con la evaluación de $f(x)$ en los límites superiores e inferiores, x_L y x_U , y en el punto central $(x_L + x_U)/2$. Entonces se añaden dos puntos nuevos en los puntos medios entre los límites y el punto central, a $(3x_L - x_U)/4$ y $(x_L + 3x_U)/4$, como se muestra en la Figura 1.11. Los tres puntos adyacentes con el valor más bajo de $f(x)$ (o los valores más elevados para un problema de maximización) se usan entonces para definir el siguiente intervalo de búsqueda.

Mediante la eliminación de dos de los cuatro cuartos del intervalo en cada paso, este procedimiento reduce el intervalo a la mitad en cada ciclo. Para reducir el intervalo a una fracción ε del intervalo inicial, se necesitarán n ciclos, donde $\varepsilon = 0,5^n$. Dado que cada ciclo requiere el cálculo de $f(x)$ para dos puntos adicionales, el número total de cálculos es $2n = 2 \log \varepsilon / \log 0,5$.

- Servicios de la planta (servicios públicos) 334-40, 1076-8
 - costes 314, 334-40
- Sillas (relleno de columna) 766-7
 - costes 314
- Sillas Berl 766, 767
- Sillas Intalox 314, 766, 767
- Silos 662
- Símbolos
 - de control distribuido 233
 - de exposición compartidos 233
 - de la instrumentación 231-4
 - diagrama de tuberías / diagrama de flujo 230-4, 1091-9
 - en línea de la instrumentación 232
 - lógicos 522
- Simulación
 - de Monte Carlo 374
 - de procesos
 - — arquitectura del programa 162-5, 164
 - — componentes definidos por el usuario 168
 - — de destilación 179-92, 715-7
 - — de distribución de tamaño de partícula en 168
 - — de intercambio de calor 194-200
 - — de manejo de sólidos 201
 - — de operaciones unitarias 169
 - — de procesos de reciclado 205
 - — de procesos dinámicos *véase* Simulación dinámica
 - — de recipientes 169-179
 - — especificación de los componentes 165
 - — hidráulicos 199
 - — hipocomponentes (pseudocomponentes) 167
 - — métodos convergentes 207
 - — métodos manuales para la aceleración de convergencia 208
 - — modelos de hojas de cálculo en 201
 - — modelos de operación unitaria 170
 - — operaciones unitarias definidas por el usuario 201
 - — para la optimización de hojas de cálculo 216, 218
 - — problemas de convergencia y estrategias 210
 - — programas 163
 - — programas informáticos comerciales para 154, 162, 163
 - — pseudocomponentes 167
 - — reciclados en 205
 - — sales 167
 - — sólidos 167, 201
 - — uso de controladores para optimización de diagramas de flujo 217
 - — dinámica 219
- Simvastatina (ZocorTM) (ejercicio de diseño) 1168
- Síntesis de zeolitas (ejercicio de diseño) 1164
- Sistemas
 - de agua ácida 461
 - de control 268-83
 - — de caudal 271
 - — de nivel 271
 - — de presión 271
 - — de relación 274
 - — de temperatura 272
 - — en cascada 274
 - — Fieldbus 283
 - — inalámbricos 283
 - — normas guía de diseño 270
 - — objetivos 268
 - de instrumentación de seguridad 521
 - de Recuperación de Costes Acelerado Modificado (MACRS) depreciación 348, 350
 - de tubería
 - — caída de presión en 239-44
 - — códigos y estándares 255
 - — distribución y diseño de 258
 - de vapor 336
- Sobrecargas (costes)
 - de planta 297
 - directos 296
- Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME) 17
 - *véase también* Códigos y normas ASME
- Sociedad Americana para Ensayo de Materiales (ASTM) 17
 - *véase también* Códigos y normas ASTM
- Sociedad de Instrumentación, Sistemas y Automatización (ISA) 17
 - *véase también* Códigos y normas ISA
- Sólidos
 - almacenamiento de 662
 - capacidades caloríficas 434
 - conductividad térmica 433
 - disueltos, separación de 599-612
 - mezcla de 655, 655
 - secado de 592-9
 - simulación de 201
 - transporte de 659-61
- Solubidades de gases 462
- Soportes
 - de corchete 1032, 1037
 - de falda 1031, 1033-7
 - — anillo base y diseño del perno de áncora 1036
 - — espesor de la falda 1034
 - de la tubería 257
 - del recipiente 1030-8
 - — faldas 1031, 1033-7
 - — sillas 1031, 1032-3
 - — soportes 1032, 1037
 - del relleno 788
 - tipo sillas 1031, 1032-4
 - — dimensiones estándares 1033-4
 - — diseño de 1032
 - — tensión en la pared del recipiente debido a 1032
- Subproductos 298, 342
- Subrefrigeración en condensadores 889
- Subvenciones gubernamentales 346
- Sulfuración, temperatura elevada 398
- Sumatriptan (ImigranTM) (ejercicio de diseño) 1169
- SuperChems (programa para el cálculo de la carga de alivio) 532
- Tablas, procesos de separación 571, 572
- Tablas Críticas Internacionales (ITC) 422
- TAC (coste anualizado total) 361
- Tamaño de columna, aproximado 730
- Tamices 568
 - de cernido 569
 - *grizzly* 568
 - selección de 568, 569
 - vibratorios 568
- Tamizado 568
- Tanques
 - costes 314
 - de almacenamiento, diseño de 1055
 - de sedimentación (decantadores) 612-7
 - de techo flotante 314
 - diseño de 1055
- Tántalo 408
- Tasas 297, 345, 352
 - de demanda, en análisis de riesgos 523
 - de descuento 358
 - de fallo o error 523
 - de frecuencia de accidentes mortales (FAFR) 525, 525
 - de retorno de la plusvalía actual (DCFRROR) 359
 - índice de riesgo 523
- TCOP (coste total de la producción) 299, 361
- Técnicas de contribución de grupos
 - uso en la predicción de propiedades físicas 429, 436, 439, 445, 446, 451, 458

- Tecnología de pinzamiento 125-44
 - problema de cuatro-corrientes 127-9
 - problema de dos-corrientes sencillo 125-7
 - servicios auxiliares múltiples 129
- Tejas y ladrillos resistentes a los ácidos 412
- Temperatura
 - de autoignición 482
 - de diseño, recipientes a presión 999
 - de intervalo, en el método de tabla problema 130
- Tensión(es)
 - cortante o de cizalladura máxima 985
 - de compresión, recipientes a presión 1020
 - de la tubería 258
 - de membrana en carcasas 987
 - de torsión en recipientes a presión 1018
 - del aro 987, 1005, 1017
 - o esfuerzos secundarias 998
 - superficial 449
 - — de mezclas 448
 - — relleno de la columna 779
- Teoría
 - de fallos 985
 - de la energía de tensión máxima del fallo 986
 - de la tensión máxima cortante del fallo 986
 - de la tensión principal máxima de fallo 985
 - de Tresca 986
 - del invitado 986
 - sigma para las centrifugadoras 584
- Terminaciones y cierres de placas planas 1007-8
- Termodinámica, primera ley 84
- Tiempo de residencia en los bajantes 753
- Tiempo de retorno 356, 357
- Tipos de reactor 663-7
 - lecho fluidizado 666
 - lecho móvil 666
 - lecho relleno 665
 - tanque agitado 664
 - tubular 665
- Tipos de válvulas
 - asiento 236
 - bola 236
 - comprobación / retención 237
 - compuerta 236
 - diafragma 236
 - macho 236
 - mariposa 237
- Titanio 391, 400, 407
- Tocoferol (ejercicio de diseño) 1161
- Tolerancia de corrosión 395, 1003
- Tolvas 662
 - elevadas 662
- Torres
 - de enfriamiento de agua 935
 - de enfriamiento rápido 935
 - de refrigeración 314, 935, 936
- Toxicidad 486, 487
 - aguda 480
- Trabajo isentrópico, cálculo de 105
- Trabajo realizado 85
 - durante la compresión / expansión 105
- Trampas y supresores de fuegos 491
- Transferencia de calor
 - a recipientes 955-61
 - en calentadores de fuego directo 951
 - en refrigerantes con aire 941
 - factor -j 848
 - radiante 951
 - teoría básica 817-8
- Transportadores
 - de tornillo sin fin o de Arquímedes 660
 - de tuberías 661, 661
 - neumáticos 660
- Transporte 655
 - de gases 655-8
 - de líquidos 658-9
 - de sólidos 659-61
 - en la selección del sitio 1069
 - hidráulico 660
- Tratamiento biológico de residuos (lodo activado) 1085-6
- Tratamiento del dióxido de azufre (ejercicio de diseño) 1171
- Trituradoras
 - costes 313
 - selección de 642, 643, 644-5
- TSA (Adsorción con Cambio de Temperatura) 558
- Tubería(s)
 - de venteo 538
 - diámetro económico
 - — para acero al carbono 262
 - — para acero inoxidable 262
 - diámetro equivalente 242, 243
 - — tubos del intercambiador de calor 847
 - diámetro óptimo 259, 262
 - diseño mecánico de 255-8
 - e Instrumentación (T e I)
 - — diagramas 154, 229-34, 282
 - — ejemplo típico 282
 - — símbolos 230-4, 1091-9
 - e instrumentación 229-90
- Tubos con aletas, en intercambiadores de calor 936-8
- Tubos de aleta baja, en intercambiadores de calor 938
- Turboexpansores 121
- Ultrafiltración 606, 607
- Unidad de Datos de las Ciencias de la Ingeniería (ESDU) 423
 - Guía de diseño ESDU 78031 957
 - Guía de diseño ESDU 83038 854
 - Guía de diseño ESDU 84023 883, 895
 - Guía de diseño ESDU 87019 837
 - Guía de diseño ESDU 92003 847
 - Guía de diseño ESDU 93018 847
 - Guía de diseño ESDU 98003-98007 818
 - Series de ingeniería del viento 1025
- Unidades 18
 - de transferencia, predicción de la altura 770
 - factores de conversión 20, 1149-51
 - SI 18
 - — factores de conversión 20, 1149-51
 - sistemas 18
- Uniones con bridas 1006, 1038-46
 - caras de las bridas 1041
 - diseño de bridas 1043-5
 - juntas en 1040-1
 - tipos de bridas 1039
- UOD (demanda máxima de oxígeno) 1086
- Urea (ejercicios de diseño)
 - proceso DSM 1164
 - ruta convencional 1184
- Uso de controladores en la simulación de procesos para optimización de diagramas de flujo 217
- Validez de las estimaciones de costes 326
- Valor
 - actual 358
 - actual neto (NPV) 358
 - calorífico del gas residual 119
 - de libro (para la depreciación) 347
 - futuro 358
 - límite umbral (TLV) 482
 - temporal del dinero 358
 - de K 453
 - — para hidrocarburos 460, 459-60
- Válvulas
 - caída de presión a través 43
 - de alivio de presión 479, 527-41
 - — de muelle 532, 533
 - de asiento 235, 236
 - de bola 235, 236

- Válvulas (*continuación*)
 - de comprobación 235, 237
 - de compuerta 233, 235, 236
 - de control
 - — caída de presión a través 243, 249
 - — modo error o fallo 232
 - — nomenclatura 234
 - — símbolos 231, 232
 - de diafragma 235, 236
 - de liberación operadas en piloto 534, 535
 - de macho 235, 236
 - de no retorno 235, 237
 - de seguridad 528, 532–7
 - — de presión. *Véase* Válvulas de alivio de presión
 - — piloto operada 534, 535
 - — resorte 537, 533
 - — símbolo (P&ID) 233
 - — tamaño 535
 - mariposa 235, 236
- Vapor de agua 335–8, 1076
 - coeficiente de transferencia de calor de condensación 888
- Vapor de agua 335–8, 1076, costes 335
- Vapores, densidad 427
- Vaporización
 - calor latente de 441
 - súbita adiabática (destilación)
 - — cálculos 690
- Vaporizadores 900–26
 - control de 274
 - diseño de 900–26
 - *véase también* Calderas
- Variables de diseño en la destilación 690–2
- Varianza, propagación de 375
- VCOP 296, 299
- Velocidad de corrosión
 - aceptable 395, 395
 - definición 394
 - efecto de
 - — la concentración en 395
 - — la temperatura en 395
 - — la tensión en 397
 - — tasas aceptables 395, 395
- Velocidad de retorno en la inversión (ROR) 359
- Velocidad de sedimentación 614, 638
- Velocidad específica de las bombas 237
- Velocidad interna de retorno (IRR) 359
- Velocidades en la tubería, valores típicos 259
- Venlafaxina (EffexorTM) (ejercicio de diseño) 1169
- Ventajas y desventajas, en la optimización del diseño 25
- Ventiladores 655
- Vertedero 1085
- Vibraciones de los tubos, flujo inducido 836
- Vibraciones inducidas por el caudal, en tubos del intercambiador 836
- Vibraciones inducidas por el viento en las columnas 1025
- Vidrio
 - como material de construcción 411
 - resistencia a la corrosión 1114–9
- Viscosidad 428
 - efecto de la presión 431
 - gases 432
 - líquidos 428, 1121–47
 - mezclas de líquidos 431
 - variación con la temperatura 430
- Viscosidades de líquidos 428
 - de mezclas 431
 - efecto de la presión 431
 - variación con la temperatura 430
- Viton 411
- Volatilidad relativa 454
- Zirconio y sus aleaciones 408

