Raúl Monsalvo Vázquez
Ma. del Rocío Romero Sánchez
Ma. Guadalupe Miranda Pascual
Graciela Muñoz Pérez

Balance de materia y energía

Procesos industriales

GRUPO EDITORIAL PATRIA

Balance de materia y energía. Procesos industriales

GRUPO EDITORIAL PATRIA

FREELIBROS.ORG

Balance de materia y energía. Procesos industriales

Raúl Monsalvo Vázquez
Ma. Guadalupe Miranda Pascual
Ma. del Rocío Romero Sánchez
Graciela Muñoz Pérez
Instituto Politécnico Nacional

PRIMERA EDICIÓN EBOOK
MÉXICO, 2014

GRUPO EDITORIAL PATRIA

Para establecer comunicación
con nosotros puede hacerlo por:

correo:
Renacimiento 180, Col. San Juan
Tlihuaca, Azcapotzalco,
02400, México, D.F.

fax pedidos:
(01 55) 5354 9109 • 5354 9102

e-mail:
info@editorialpatria.com.mx

home page:
www.editorialpatria.com.mx

Dirección editorial: Javier Enrique Callejas
Coordinación editorial: Estela Delfín Ramírez
Diseño de interiores: Jorge Martínez Jiménez (Seditograf)
Diseño de portada: Eleazar Maldonado San Germán
Ilustraciones: Tomás Miranda Lara/Arturo D. Ramírez

Revisión técnica

Dra. Lourdes Delgado Núñez
Profesora-Investigadora
Departamento de Energía
Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco

Mtra. Irma Delfín Alcalá
Profesora-Investigadora
Universidad Nacional Autónoma de México-Reyes Iztacala

Balance de materia y energía. Procesos industriales
Derechos reservados:
© 2014, Raúl Monsalvo Vázquez, Ma. Guadalupe Miranda Pascual, Ma. del Rocío Romero Sánchez, Graciela Muñoz Pérez.
© 2014, GRUPO EDITORIAL PATRIA, S.A. DE C.V.
Renacimiento 180, Colonia San Juan Tlihuaca,
Delegación Azcapotzalco, Código Postal 02400, México, D.F.

Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana
Registro núm. 43

ISBN ebook: 978-607-438-895-4

Queda prohibida la reproducción o transmisión total o parcial del contenido de la presente obra en cualesquiera formas, sean electrónicas o mecánicas, sin el consentimiento previo y por escrito del editor.

Impreso en México
Printed in Mexico

Primera edición ebook: 2014

Agradecimientos

Raúl Monsalvo Vázquez

Esta obra no sería posible sin la ayuda de un grupo de personas; a ellas corresponde en gran medida el mérito de mi agradecimiento, entonces vaya mi reconocimiento a aquellos personajes. Además, a ti Laura, que eres la fuente de inspiración y mejora en mi vida. Muchas gracias.

María del Rocío Romero Sánchez

Agradezco a mis padres y hermano. A Karina, Miguelito, Vanessa, Juan Antonio, Saúl y Meche, y un agradecimiento muy especial para Grace.

María Guadalupe Miranda Pascual

Agradezco a la vida, a mi familia, a mis amigos y a mis compañeros y, en especial, a Smid Santiago Pedro.

Graciela Muñoz Pérez

Les agradezco a mis padres, a mis hermanos y hermanas por estar conmigo; a mis amigos Alejandro y María del Rocío y a mis queridos sobrinos Diego y Karla.

Prefacio

Para los estudiosos y los interesados en la naturaleza y el desarrollo de los procesos industriales resulta fundamental conocer los principios básicos relacionados con el balance de masa, ya que en la actualidad todas las industrias ponen en práctica los principios elementales de los cambios de la materia en su recorrido: desde la materia prima hasta la obtención del producto, el cual debe cumplir con las características y los requerimientos necesarios que lo hacen útil para el consumidor final. Hoy en día, la necesidad de que el profesional y toda persona vinculada con los procedimientos industriales conozcan y entiendan estos temas, hace imperiosa la necesidad de proporcionar una obra completa que incluya una adecuada diversificación de contenidos que deben conocer y manejar; de este modo, en los primeros cinco capítulos de este libro se abordan y se analizan la naturaleza, las características y la importancia de los diferentes tipos de empresas o industrias que existen actualmente; así como también se hace un análisis de la importancia del sistema internacional de unidades, cuyo uso se ha extendido en todo el mundo y ha adquirido una gran importancia en la globalización presente; asimismo se estudian temas importantes que desarrollan la habilidad de cálculo de propiedades de la materia, se incluye la mezcla de materiales en fluidos con y sin reacción y se estudian las propiedades termodinámicas consideradas en estos sistemas

En esta obra también se presentan aspectos relacionados con las operaciones y los procesos unitarios principales, dando un repaso a los conceptos, aparatos y dispositivos usados, asimismo se proponen problemas relacionados con estos tópicos, los cuales involucran el balance de la masa y la energía en los procesos industriales. Por último, se desarrolla el tema de soluciones, en los que se ejemplifican casos comunes de cuando se involucran mezclas de sustancias.

Con el fin de ejemplificar la solución a problemas comunes relacionados con el balance de materias y energía, en todos los capítulos se han agregado problemas resueltos que muestran, paso a paso, la metodología propuesta para resolver éstos; asimismo, se han incluido problemas propuestos para que el lector utilice la metodología propuestas para encontrar la su solución y, al final de cada capítulo, se incluye una sección en la que se presentan temas de actualidad, cuya finalidad es presentar casos actuales, y reales, en los cuales se puedan aplicar los conceptos desarrollados en cada capítulo.

En conclusión, esta obra se ha diseñado como un curso introductorio a la transferencia de masa y a las operaciones y procesos unitarios que se interrelacionan con la materia. Con la exposición de la teoría necesaria y la inclusión de problemas resueltos y problemas de aplicación, este material puede utilizarse como libro de texto básico o como libro de consulta, o bien como un muestrario de problemas para los cursos relacionados con los procesos industriales.

Por el gran valor que posee en sí mismo y porque es el resultado del esfuerzo cotidiano de un grupo de académicos de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería, Ciencias Sociales y Administrativas del Instituto Politécnico Nacional, es muy satisfactorio presentar este libro a los interesados en el balance de masa y energía y en los procesos industriales.

Como todo trabajo, esta obra es susceptible de ser mejorado, por lo que agradecemos de antemano las observaciones y las recomendaciones que pueda hacer a esta obra con el fin de mejorarla.

Los autores

Contenido

Capítulo 1 Introducción a los procesos industriales 1

1.1 La empresa y su clasificación 1
1.2 Diagrama conceptual de una empresa industrial 7
1.3 Materias primas, producción industrial y necesidades humanas 12
1.4 Los procesos industriales 15
1.4.1 Nivel laboratorio 16
1.4.2 Nivel piloto 16
1.4.3 Nivel productivo 16
1.4.4 Investigación de mercado 19
1.4.5 Selección del proceso 19
1.4.6 Determinación del costo de un producto 19
1.5 Importancia de las variables de proceso en los balances de materia y energía 21
1.6 Actividades y problemas 25
1.7 Cuestionario 27
1.8 Actividad propuesta 28
1.9 Resumen 29
1.10 Tema de actualidad 29
1.11 Bibliografía 36

Capítulo 2 Sistemas de unidades y sistema internacional de unidades 37

2.1 Antecedentes generales 37
2.2 Sistema Internacional de unidades 41
2.3 Unidades básicas y derivadas 42
2.4 Múltiplos y submúltiplos de unidades 44
2.5 Unidades que no son del SI 46
2.6 Conversión de unidades 48
2.7 Cifras significativas 52
2.8 Recomendaciones para la escritura de las unidades del SI 53
2.9 Metodología para resolver problemas de conversión de unidades 56
2.10 Aplicación de la metodología para resolver problemas de conversión de unidades 56
2.11 Actividad propuesta 60
2.12 Problemas 62
2.13 Tema de actualidad 64
2.14 Bibliografía 66

Capítulo 3 Conceptos básicos usados en los procesos industriales y en la mezcla de gas sin reacción 67

3.1 Conceptos básicos 67
3.2 Temperatura y escalas de temperaturas 68

3.3 Densidad 70
3.4 Peso específico y peso específico relativo 74
3.5 Volumen específico 75
3.6 Concepto de mol 75
3.7 Concentración 76
3.8 Presión 77
3.9 Viscosidad 79
3.10 Presión de vapor 81
3.11 Entalpía de vaporización 83
3.12 Por ciento y fracción peso de una mezcla 84
3.13 Fracción y por ciento en mol de una mezcla 86
3.14 Por ciento y fracción volumen de una mezcla 89
3.15 Por ciento y fracción presión de una mezcla 90
3.16 Gasto volumétrico y gasto másico 92
3.17 Problemas 92
3.18 Tema de actualidad 103
3.19 Bibliografía 108

Capítulo 4 Mezcla de gas sin reacción con balance de masa 109

4.1 Propiedades de los gases ideales 109
4.2 Teoría cinética molecular 111
4.3 Ley general de los gases 112
4.4 Mezcla de gases 114
4.5 Metodología para resolver problemas de mezcla de gases sin reacción 116
4.6 Aplicación de la metodología para resolver problemas de mezcla de gases sin reacción 116
4.7 Actividades propuestas 127
4.8 Problemas 127
4.9 Tema de actualidad 131
4.10 Bibliografía 134

Capítulo 5 Procesos termodinámicos y balance de energía 135

5.1 Definición del estado gaseoso, propiedades e idealidad de los gases 135
5.2 Leyes de los gases 137
5.2.1 Ley de Charles y Gay Lussac 137
5.2.2 Ley de Boyle-Mariotte 138
5.2.3 Ley de Avogadro y Amagat 138
5.3 Sistemas de unidades relacionados con las leyes de los gases ideales 139
5.4 Metodología para resolver problemas relacionados con las leyes de los gases ideales 140
5.5 Aplicación de la metodología para resolver problemas de procesos en gases ideales 141

5.6 Termodinámica 145
5.7 Primera ley de la termodinámica o principio de equivalencia del calor en trabajo mecánico 148
5.8 Trabajo 149
5.9 Calor y capacidad calorífica a presión o volumen constantes 150
5.10 Entalpía o calor a presión constante 151
5.11 Energía o calor a volumen constante 152
5.12 Aplicación de la primera ley de la termodinámica en los procesos termodinámicos 153
5.12.1 Proceso isotérmico 153
5.12.2 Proceso isobárico 153
5.12.3 Proceso isométrico 154
5.12.4 Proceso adiabático 154
5.13 Ciclos termodinámicos 155
5.13.1 Ciclo de Carnot 157
5.13.2 Ciclo de Diesel 157
5.13.3 Ciclo de Otto 158
5.13.4 Ciclo de Rankine 158
5.13.5 Ciclo de Brayton o Joule 159
5.13.6 Ciclo de Atkinson 159
5.13.7 Ciclo Stirling 160
5.14 Metodología para resolver problemas de leyes de los gases ideales y procesos termodinámicos 161
5.15 Aplicación de la metodología para resolver problemas de procesos termodinámicos 161
5.16 Ley cero de la termodinámica (termofísica) 170
5.17 Calor sensible y calor latente 171
5.17.1 Calor sensible 171
5.17.2 Calor latente o calor de cambio de estado 172
5.18 Balance de calor 172
5.19 Metodología para resolver problemas de termofísica 173
5.20 Aplicación de la metodología 173
5.21 Problemas 176
5.22 Tema de actualidad 185
5.23 Bibliografía 187

Capítulo 6 Operaciones unitarias (primera parte). Transporte y almacenamiento de materiales 189

6.1 Introducción 189
6.2 Clasificación de las operaciones unitarias 190
6.2.1 Transporte de gases 191
6.2.2 Transporte por tuberías 193
6.2.3 Transporte por bombas 194
6.2.4 Clasificación de las bombas 196
6.3. Transporte de líquidos 197
6.3.1 Transporte por vagones 197
6.3.2 Transporte por camiones cisterna 197
6.3.3 Transporte por botellas o tambores 199

6.3.4 Transporte por vía marítima ... 199
6.3.5 Transporte por ductos ... 199
6.4 Transporte de sólidos ... 199
6.4.1 Transporte de partes embaladas o semiembaladas ... 199
6.5 Almacenamiento ... 207
6.6 Características de los materiales almacenados ... 210
6.6.1 Almacenamiento de materiales sólidos ... 210
6.6.2 Almacenes de planta ... 211
6.6.3 Almacenes cubiertos ... 212
6.6.4 Edificios de depósitos ... 212
6.6.5 Silos ... 213
6.6.6 Recipientes ... 214
6.6.7 Contenedores ... 214
6.6.8 Palets ... 215
6.6.9 Estanterías ... 215
6.7 Almacenamiento de líquidos ... 215
6.7.1 Tanques ... 216
6.7.2 Estanques ... 216
6.7.3 Recipientes ... 217
6.7.4 Cuba de almacenaje ... 217
6.7.5 Recipientes y contenedores estándar ... 218
6.8 Almacenamiento de gases ... 218
6.8.1 Gasómetros telescópicos ... 218
6.8.2 Gasómetros estacionarios ... 218
6.8.3 Recipientes ... 219
6.8.4 Almacenamientos en recipientes de presión, botellas y líneas de tuberías ... 220
6.8.5 Almacenamiento de gas en cilindros ... 220
6.8.6 Tipos de cilindros ... 221
6.8.7 Precauciones generales de seguridad en el manejo de gases ... 221
6.8.8 Almacenamiento de materiales específicos ... 222
6.8.9 Prevención de accidentes directamente relacionados con la contaminación en los almacenamientos ... 224

Capítulo 7 Operaciones unitarias (segunda parte) 225

7.1 Formación de mezclas ... 225
7.2 Formación de mezclas homogéneas ... 226
7.2.1 Mezclado ... 226
7.2.2 Agitación ... 231
7.3 Formación de mezclas heterogéneas ... 232
7.3.1 Dispersión ... 232
7.3.2 Emulsión ... 233
7.4 Separación de mezclas ... 234
7.4.1 Separación de mezclas homogéneas ... 234
7.5 Manejo de sólidos ... 238
7.5.1 Reducción de tamaño ... 239
7.6 Representación gráfica de los procesos industriales ... 242
7.7 Balance parcial y total de masa en operaciones unitarias ... 249

7.8 Metodología para resolver problemas de balance de masa con operaciones unitarias ... 250
Aplicación de la metodología ... 250
7.9 Ejemplos de aplicación de operación unitaria ... 262
7.10 Problemas ... 268
7.11 Tema de actualidad ... 273
7.12 Bibliografía ... 278

Capítulo 8 Balance de masa y energía en sistemas con reacción química ... 279

8.1 Introducción ... 279
8.2 Conceptos básicos usados en el balance de materia ... 280
8.2.1 Estequiometría ... 280
8.3 Reacción química ... 286
8.3.1 Clasificación de las reacciones químicas ... 286
8.4 Reactores químicos ... 287
8.4.1 Tipos de reactores químicos ... 288
8.5 Conceptos relacionados con la estequiometría ... 289
8.5.1 Leyes estequiométricas ... 289
8.6 Relaciones cuantitativas entre especies en una reacción química ... 290
8.7 Balance de una reacción ... 290
8.8 Técnicas para el balance de materiales ... 291
8.9 Metodología para resolver problemas de mezcla de gas, con reacción ... 293
8.10 Termodinámica química ... 302
8.10.1 Primera ley de la termodinámica ... 303
8.11 Termoquímica ... 304
8.12 Leyes de la termoquímica ... 304
8.12.1 Metodología para resolver problemas aplicando la primera ley de la termoquímica ... 305
8.12.2 Segunda ley de la termoquímica ... 306
8.12.3 Metodología para resolver problemas de termoquímica aplicando la ley de Hess ... 306
8.12.4 Ley de Lavoisier-Laplace ... 308
8.12.5 Aplicaciones importantes de las leyes de la termoquímica ... 308
8.13 Problemas ... 309
8.14 Tema de actualidad ... 316
8.15 Bibliografía ... 318

Capítulo 9 Balance de materia en los procesos unitarios .. 319

9.1 Procesos unitarios ... 319
9.2 Clasificación de los procesos unitarios ... 323
9.2.1 Combustión ... 323
9.2.2 Calcinación ... 325
9.2.3 Oxidación ... 327
9.2.4 Intercambio iónico ... 327
9.2.5 Neutralización ... 329

9.2.6 Hidrólisis 331
9.2.7 Electrólisis 331
9.2.8 Esterificación 332
9.2.9 Saponificación 333
9.2.10 Fermentación 334
9.2.11 Hidrogenación 336
9.3 Metodología para resolver problemas de procesos industriales 340
9.3.1 Metodología para resolver problemas de procesos unitarios con balance de masa 340
9.3.2 Metodología para resolver problemas de estequiometría 340
9.4 Aplicación de la metodología 340
9.5 Problemas 345
9.6 Tema de actualidad 350
9.7 Bibliografía 352

Capítulo 10 Soluciones 353

10.1 Introducción 353
10.2 Definición de solución 354
10.3 Clasificación de las soluciones 355
10.4 Concentración en las soluciones 357
10.5 Metodología para resolver problemas de formación de soluciones 363
10.6 Mezclas de soluciones 366
10.6.1 Mezcla de dos o más soluciones conocidas para formar otra de concentración desconocida 368
10.6.2 Mezclar dos o más soluciones conocidas para formar otra con concentración y volumen conocido 369
10.6.3 Mezcla de una o más soluciones conocidas, con agua, para formar una solución de concentración desconocida pero volumen conocido 369
10.6.4 Mezcla de una o más soluciones conocidas para formar otra con concentración conocida y volumen desconocido 370
10.6.5 Eliminación de agua por evaporación para concentrar la solución hasta una concentración y volumen conocidos 371
10.6.6 Neutralización de soluciones ácidas básicas (mezcla de soluciones ácidas con básicas) 371
10.7 Metodología para resolver problemas de mezclas de soluciones 372
10.8 Aplicación de la metodología en los diferentes tipos de soluciones 372
10.8.1 Mezcla de dos o más soluciones conocidas para formar otra con concentración desconocida 372
10.8.2 Mezcla de dos o más soluciones conocidas para formar un volumen conocido, de otra concentración: 374
10.8.3 Mezcla de una o más soluciones conocidas con agua para formar una solución de concentración desconocida, pero volumen conocido 376
10.8.4 Mezcla de una o más soluciones conocidas para formar otra con concentración conocida y volumen desconocido 378
10.8.5 Eliminación de agua por evaporación para concentrar la solución hasta una concentración conocida y un volumen desconocido 381

10.8.6 Neutralización de soluciones ácidas básicas (mezclas de soluciones ácidas con básicas) 382
10.9 Factores que afectan la solubilidad 384
10.10 Problemas 384
10.11 Tema de actualidad 389
10.12 Bibliografía 390

Respuestas a problemas seleccionados 391

Índice analítico 397

Capítulo

1

Introducción a los procesos industriales

Planta productora de papel
(Jupiter Images Corporation)

1.1 La empresa y su clasificación

Los procesos industriales tienen como objetivo fundamental la transformación de insumos o materias primas en productos o bienes de consumo final; en este contexto, conceptos como empresa industrial, producción y medios de producción tienen un valor significativo,

al igual que la clasificación de las empresas, que adquiere importancia en todos los sectores industriales del país y, en general, del mundo entero.

Para iniciar, se describe el origen de las empresas. Hacia los siglos XVIII y XIX ya existían talleres artesanales en los cuales algunos de los pobladores del lugar donde se asentaban éstos fabricaban en forma empírica instrumentos de uso cotidiano y de trabajo (lanzas, cuchillos, cristales, vasijas, joyas, arados, ropa, fibras en general, entre otros), los cuales intercambiaban con otros pobladores por productos agrícolas (granos, semillas, frutos, etc.) y productos derivados del ganado de crianza (pieles, huesos, lana, carne, grasa, etc.). Es así como surge el principio de la empresa industrial: la transformación de materias primas obtenidas de la naturaleza en productos finales de consumo. Hoy en día, la mayor parte de estas empresas artesanales ha desaparecido, no sólo como consecuencia de la introducción de nuevas tecnologías y de complejos procesos físicos y químicos en la producción, sino también por los nuevos requisitos de competitividad que exige el mercado global.

En general, hace tiempo la industria tradicional trataba de modificar los productos que ofrecía la naturaleza, adaptándolos a las necesidades del hombre y de la sociedad; de esta forma, si se fabricaba un producto era porque escaseaba en la naturaleza o porque su extracción presentaba mayores dificultades que su fabricación; en ambos casos, el objetivo era obtener productos más baratos que los naturales.

En la actualidad, la empresa industrial, además de fabricar productos de mejor calidad que los naturales, ofrece productos que no están disponibles en la naturaleza. Entre las ramas que conforman el sector industrial se pueden citar los de alimentos, bebidas y tabacos, de artículos de papel y de escritorio, automotriz, médica-farmacéutica, metal-mecánica, de la construcción, de información y comunicaciones, entre otras.

La diversidad y la complejidad han dado lugar a una amplia gama de empresas industriales, muchas de las cuales ya no trabajan a partir de productos naturales, sino de sustancias previamente elaboradas por otras industrias.

La competitividad global y las necesidades cambiantes de los usuarios que permanecen en la actualidad han forzado un cambio primordial en los estilos de producción, la configuración de organizaciones industriales y la planificación de fabricación centralizada y secuencial; al igual que la disponibilidad de recursos, los mecanismos de control tradicionales son, en general, poco flexibles para responder a los cambios en los estilos de producción, así como a los requisitos de fabricación altamente variables. Los enfoques tradicionales limitan la capacidad de expansión y de reconfiguración de los sistemas de fabricación.

Las empresas de fabricación del siglo XXI se encuentran inmersas en un entorno en el cual los mercados son muy cambiantes, nuevas tecnologías emergen constantemente y los competidores se multiplican debido a la globalización; bajo esta premisa, las estrategias de fabricación deben cambiar para soportar la competitividad global, la innovación y la introducción de nuevos productos y dar una respuesta rápida al mercado.

Así, los sistemas de fabricación en el futuro deberán estar mayormente orientados a optimizar y reducir el tiempo de producción; sin embargo, éstos todavía deberán centrarse en el costo y la calidad de fabricación. Estos requerimientos darán como resultado: productos más complejos (debido a mayores características y variantes), productos que cambian con mayor rapidez (debido a los ciclos de vida reducidos del producto), introducción más rápida de los productos (debido a la reducción del tiempo para salir al mercado) e inversiones reducidas (por producto).

Todo lo anterior nos lleva a pensar que el futuro del sector de la fabricación estará determinado por la manera en que éste satisfaga los desafíos de la "nueva fabricación",[1] los cuales están basados en los procesos de producción.

[1] HMS, 1994; Shen y Norrie, 1999: *Integración de la empresa escalable y tolerancia a fallos*.

Es necesario resaltar que un proceso industrial es una operación que transforma los aportes de material, energía e información en productos, como parte de un sistema de producción industrial.

El proceso de producción industrial está constituido por las fases consecutivas en la elaboración de un producto y precisa de ciertos elementos como materia prima, mano de obra calificada y determinada tecnología más o menos compleja. El resultado del proceso de producción industrial es el producto final, que constituye el eje en torno al cual gira todo; éste ostentará una serie de características, de las cuales una es fundamental desde el punto de vista de la gestión y el control de la producción: **la calidad del producto.**

Todo proceso de producción industrial precisa de una estructura donde se realizan las actividades necesarias para la producción, las cuales están en un entorno que modifica la propia actividad industrial (demanda, disponibilidad de materia prima y mano de obra calificada, climatología y medios de comunicación, entre otros).

Tradicionalmente, las operaciones industriales se basaban en una simple modificación o en un aumento de las dimensiones de los aparatos utilizados por los investigadores; en la actualidad, sin embargo, los instrumentos que se emplean en el proceso industrial han sido diseñados expresamente para aplicarlos en las operaciones a gran escala que efectúa la industria.

En las empresas dedicadas a la industria existe la tendencia, cada vez más generalizada, a reunir en un solo proceso las operaciones que hasta hace poco se efectuaban de forma independiente. No se trata, ahora, de tener experiencia y habilidad manual, sino de adquirir el dominio en el manejo de los nuevos equipos y de reconocer la importancia del uso de la instrumentación, de la utilización de los ordenadores electrónicos, de la automatización de las operaciones industriales, del análisis y la interpretación de datos y de la elaboración de modelos teóricos y de simulación, los cuales son herramientas que dan valor agregado a la manufactura de bienes y servicios.

Los sectores económicos de un país se dividen en primario, secundario y terciario.

- **Sector primario (empresas extractivas)**. Está formado por la agricultura, la ganadería, la caza y la pesca, éstas son consideradas actividades primarias mediante las cuales se explotan los recursos naturales, ya sean renovables o no renovables. Estas empresas se caracterizan por la extracción de las materias primas.
- **Sector secundario o industrial (empresas manufactureras)**. Está integrado por todas las industrias y actividades similares. Se encarga de transformar las materias primas en productos terminados, los cuales pueden ser de consumo final (bienes que satisfacen directamente la necesidad del consumidor) y que, a su vez, pueden ser duraderos o no duraderos, suntuarios o de primera necesidad, o en bienes de producción (bienes que satisfacen preferentemente la demanda de las industrias de consumo final). Algunos ejemplos de empresas pertenecientes a este sector son las productoras de papel, las que elaboran maquinaria ligera y pesada, las que producen materiales de construcción y productos químicos, entre otras.
- **Sector terciario o de servicios**. Éste se conforma de todas aquellas actividades que complementan las anteriores y que se requieren para que funcione el sistema económico. Entre éstas se encuentran el comercio, el transporte y las empresas de servicios financieros, comunales, profesionales y gubernamentales (servicios públicos, educación, salud, etcétera).

Existen diferentes formas de clasificar a las empresas dedicadas a la transformación de materias primas, entre las cuales destaca la clasificación de acuerdo con su especificidad, en industrias de tipo mecánico y de proceso químico.

En las industrias de proceso químico o simplemente de proceso, es común que la producción esté enfocada a la obtención de un producto específico (véase figura 1.1), aunque con frecuencia se obtienen también subproductos o coproductos; incluso en la producción de especialidades químicas, cada corrida de un reactor tiene por objeto obtener un producto determinado.

En la industria de proceso, la **producción continua** es la más empleada, sobre todo cuando se producen grandes volúmenes; por ejemplo, en refinerías, petroquímicas o en la producción de aceite comestible (véase tabla 1.1). La **producción por lotes** o **intermitente** se emplea principalmente para obtener productos de alto valor agregado o cuando en la línea de producción se cambia frecuentemente de producto; tal es el caso de la industria farmacéutica y la producción de jugos naturales, yogurt, pinturas, entre otros.

En ambos tipos de producción, continua o por lotes, se emplea equipo especializado, por lo general diseñado expresamente para el proceso en el que se usa. Otra característica es que los procesos tienden a la sistematización, ya sea de forma manual o mediante la automatización, para asegurar una calidad uniforme del producto y abatir los costos de operación.

Tabla 1.1. Ejemplos de las industrias de proceso.

Ramas de las industrias de proceso		
Producción de cárnicos y lácteos	Alimentos para animales	Vidrio y sus productos
Envasado de frutas y legumbres	Cerveza	Cemento
Molienda de trigo y sus productos	Refrescos embotellados	Industrias del hierro
Molienda de nixtamal y productos de maíz	Tabaco y sus productos	Industrias básicas de metales no ferrosos
Procesamiento de café	Hilados y tejidos de fibras (duras y blandas)	Otros productos alimenticios
Azúcar y subproductos	Cuero y sus productos	Bebidas alcohólicas
Aceites y grasas vegetales comestibles	Papel y cartón	
Derivados del petróleo, sustancias químicas y productos de caucho y plástico		
Refinación del petróleo	Abonos y fertilizantes	Jabones, detergentes, perfumes y cosméticos
Petroquímica básica	Resinas sintéticas, plásticos y fibras artificiales	Productos de hule
Química básica	Productos medicinales	Artículos de plástico

Figura 1.1 *Ejemplo de una industria de proceso (destilación de whisky).*

A diferencia de los productos obtenidos en la industria de proceso, los productos de las plantas de la industria mecánica por lo general están constituidos por múltiples piezas que requieren ser ensambladas o montadas (véase figura 1.2). Como ejemplos de la industria mecánica están los automóviles, relojes, aparatos electrodomésticos, etc. (véase tabla 1.2.) En la industria mecánica, aun cuando se elabore un solo tipo de producto, la producción necesariamente es **discontinua**. Incluso cuando las cadenas de producción o de armado de ésta fluyen de manera constante, los equipos se diseñan para operaciones parciales y los equipos de una misma operación suelen usarse para productos muy diferentes.

Tabla 1.2. Ejemplos de industrias mecánicas.

Industrias de tipo mecánico
Prendas de vestir
Aserraderos (incluso triplay)
Otras industrias de la madera
Imprentas y editoriales
Muebles y accesorios metálicos
Productos metálicos estructurales
Maquinaria y equipo no eléctrico
Maquinaria y aparatos eléctricos
Aparatos electrodomésticos
Equipo y accesorios electrónicos
Vehículos automóviles
Carrocerías y partes automotrices
Otros equipos y material de transporte
Otras industrias manufactureras

Figura 1.2 *Ejemplo de una industria mecánica (fundición de metales).*

Existen, además, otras clasificaciones de la empresa que se basan en atributos generales o en su giro o actividad económica, en su tamaño o en el origen del capital o la aplicación tecnológica; pero, en general, una empresa suele conceptualizarse como un sistema donde su función esencial es la fabricación de uno o varios productos. En la figura 1.3 es posible observar las distintas formas de clasificar a las empresas en función de su actividad económica y de algunas de sus características más significativas.

Así, el concepto de empresa implica las acciones emprendidas por un grupo social con el fin de producir, bajo un riesgo implícito, un bien de uso común o un servicio específico, y que con ciertas características éstos satisfagan las necesidades de la sociedad.

Históricamente, los siglos XIX y XX fueron testigos de un crecimiento espectacular de las empresas industriales tanto en extensión como en el número de productos que fabricaban; asimismo, se desarrollaron técnicas de especial importancia para el desarrollo de los procesos químicos industriales.

Algunas de estas importantes técnicas son: la obtención de procesos a gran escala, derivados de trabajos en laboratorio o plantas piloto, el desarrollo de la industria de productos sintéticos y la evolución de la electroquímica, las cuales dieron origen a la obtención de productos de gran pureza. Por su parte, las técnicas de simulación también son de gran importancia y actualidad, ya que éstas permiten establecer mecanismos de obtención y desarrollo de fármacos y de nuevos materiales, así como la visualización de problemas complejos y su posible resolución a través del uso de modelos matemáticos, soportados en herramientas computacionales y sustentados experimentalmente.

La evolución histórica que han experimentado las empresas industriales las han convertido en el punto central de la civilización moderna, constituyendo la base de gran parte de la actividad económica de ésta; en efecto, la producción de las empresas industriales ha

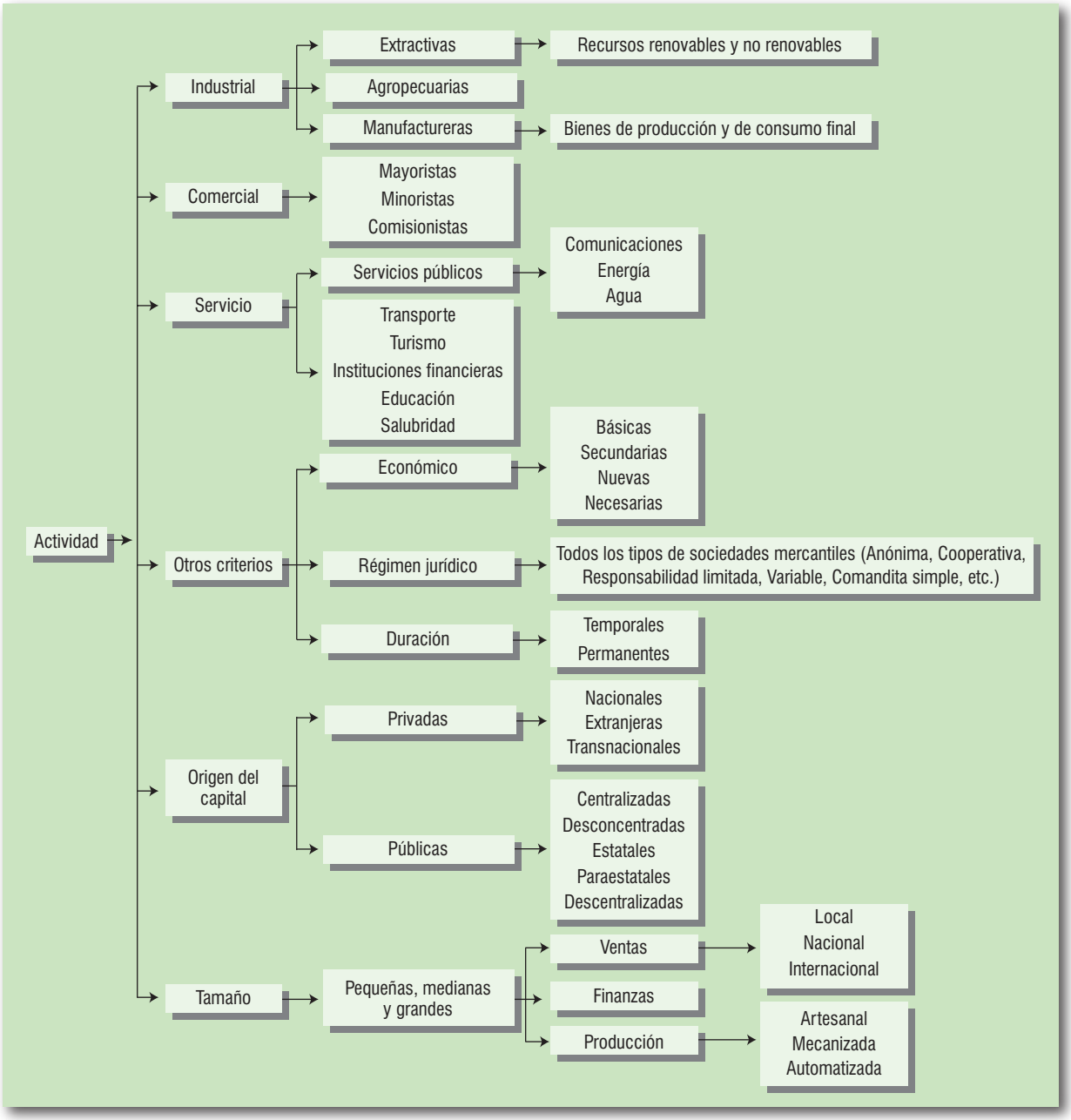


Figura 1.3 *Clasificación de las empresas.*

crecido a un ritmo vertiginoso, lo cual implica un elevado consumo de los productos que se expenden en el mercado, no sólo en los países industrializados, sino en todas aquellas naciones que los necesitan. Los productos elaborados por las industrias son una constante de la vida cotidiana; se presentan en forma de medicinas, plásticos, fibras químicas, pinturas, jabones y productos de limpieza, cosméticos, aditivos alimenticios, etc. En conclusión, el consumo de tales productos se ha convertido en un factor indicativo del grado de desarrollo de un país.

Los fundamentos básicos de los procesos industriales se sustentan en principios basados en los conocimientos científicos; su aplicación se desarrolla en el laboratorio de investigación dentro de un proceso industrial económico. El factor individual más importante es, por lo general, el rendimiento (la fracción de materia prima recuperada como producto principal o deseado), el cual debe ser cuidadosamente diferenciado de la conversión (que es la fracción cambiada en otra sustancia, subproductos o productos). Al cambiar las condiciones de las variables de proceso, es posible modificar el rendimiento y/o la conversión del proceso.

Los ingenieros difieren de los científicos por su preocupación respecto a los costos y los beneficios de los productos; cada decisión de ingeniería implica consideraciones de costos, además de que una tarea específica dentro de la industria es la contabilidad de las distintas operaciones efectuadas en una planta industrial.

1.2 Diagrama conceptual de una empresa industrial

En los siguientes párrafos se presenta un panorama general de los distintos aspectos que requiere una planta industrial para satisfacer las necesidades de producción.

Los **diagramas de procesos de manufactura o transformación** se utilizan para el mejor entendimiento de los procesos de producción; el uso de estos diagramas permite la fácil identificación de actividades y sus relaciones (véase figura 1.4).

Todo ingeniero industrial debe tener la capacidad de entender y elaborar representaciones sintéticas que muestren las actividades de producción o de organización por medio de diagramas, en los cuales se representan todas las acciones que dan como resultado los productos o los servicios de una organización. El diagrama de proceso es la representación gráfica de las acciones necesarias para lograr la operación de un proceso.

La **planta piloto** es una unidad a escala reducida, diseñada para realizar experimentos de los cuales se obtienen datos significativos para las plantas productivas (a gran escala) y, a veces, para producir cantidades significativas de algún nuevo producto que permitan que el usuario lo evalúe. El desarrollo de experimentos en una planta piloto resulta costoso, pero con frecuencia es necesario.

Una de las funciones básicas del **área de investigación y desarrollo** consiste en mantener informada a la empresa de los progresos y procurar que esté disponible el conocimiento de las mejoras e incluso de las variaciones fundamentales que lleven a la producción de cualquier producto dado, en el cual se interese la organización.

Las **áreas de empacado y almacenamiento** son costosas, por lo que deberían evitarse en la medida de lo posible; los recipientes más económicos son los rellenos a granel, como los tanques, los buques cisterna, las tuberías, los carros tanque, las góndolas y las cajas de cartón. Muchos productos industriales son enviados en recipientes más pequeños, los cuales pueden ser retornables o de un solo viaje, la apariencia del recipiente es importante sólo para aquellos productos que son vendidos directamente al consumidor.

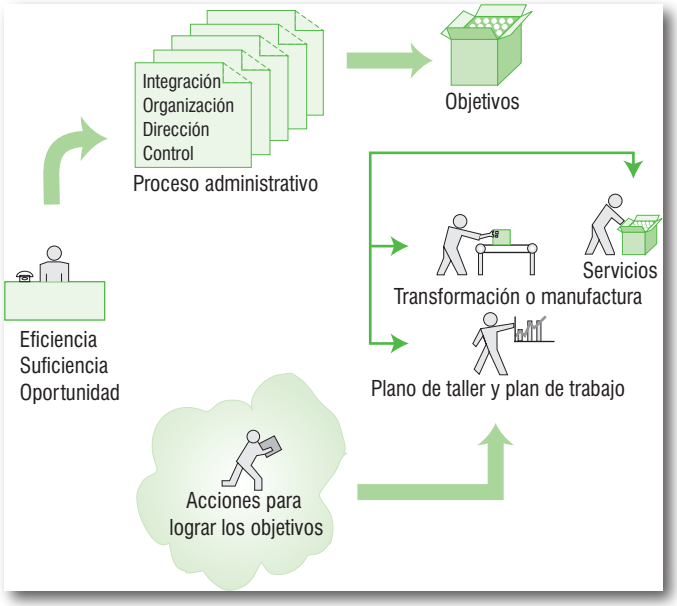


Figura 1.4 *Elementos básicos de un plan de trabajo.*

Todos los conceptos desarrollados en este capítulo dan origen a la descripción del diagrama conceptual de una empresa industrial (véase figura 1.5); en éste se observan cada una de las áreas relacionadas con la elaboración de un producto. Sin embargo, cabe aclarar que no todas las empresas industriales cuentan con todas estas áreas; en el proceso de fabricación de un producto, el departamento de investigación y desarrollo permite a la empresa no sólo experimentar con nuevos productos, sino también aplicar nuevas tecnologías que hagan más eficientes los procesos industriales, abatiendo costos, los cuales serían mayores si no existiera este departamento; en éste también se determinan los tiempos de producción que tendrá el producto a nivel de laboratorio, los cuales al ser extrapolados a la planta productiva permiten obtener tiempos de producción muy cercanos a los reales.

Para un mejor entendimiento de estas áreas, a continuación se definirán éstas y se hará una breve explicación de su funcionamiento.

- **Ciencia.** Es el conjunto de conocimientos ciertos de las cosas por sus principios y causas. Esta definición es muy general, ya que en el caso de una industria, el conocimiento teórico constituye un todo desde el punto de vista de la química, aplicado al proceso de transformación.

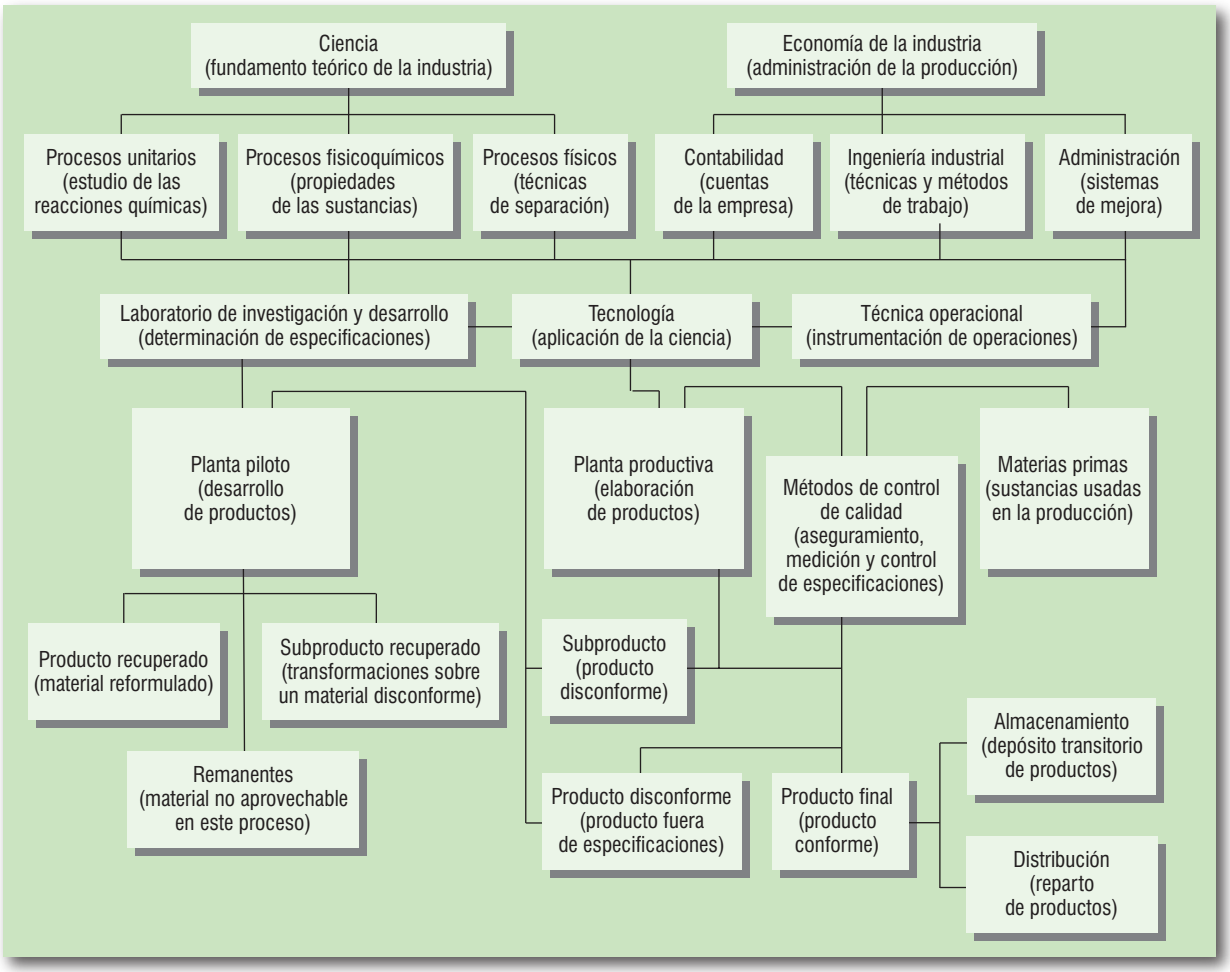


Figura 1.5 *Diagrama conceptual de una empresa industrial.*

- **Procesos físicos.** Son las operaciones mecánicas que se efectúan a las materias primas, las cuales cambian su estado físico, pero no alteran sus propiedades químicas. También son llamadas operaciones unitarias; las cuales pueden ser de diferentes tipos: de almacenamiento, de transporte, de formación de mezclas, de separación de mezclas o de reducción de tamaño de sólidos; algunos ejemplos pueden ser la filtración, que es la operación unitaria que permite la separación de mezclas heterogéneas de un sólido no disuelto y un líquido a través de una malla o un medio filtrante (por ejemplo, al filtrar el jugo de naranja en el colador quedan atrapadas las semillas y en el recipiente el jugo que logra pasar la malla del colador), en esta operación unitaria es claro que las sustancias no cambian sus propiedades al momento que se separan.

- **Procesos químicos.** Son transformaciones en las que intervienen una o más reacciones químicas de las materias primas; en este tipo de procesos cambian las propiedades físicas y químicas de las sustancias. A éstos también se les conoce con el nombre de procesos unitarios. Algunos ejemplos de procesos químicos son: fermentación, hidrogenación, hidrólisis, saponificación, combustión y calcinación, entre otros. En este tipo de procesos existe una transformación de las materias primas y se cumple la primera ley de la materia que dice: "La materia, como la energía del universo, no se crea ni se destruye, sólo se transforma". De la fermentación de la glucosa contenida en el azúcar, por ejemplo, se obtiene el alcohol etílico y de la reacción entre la sosa y el aceite de coco se obtiene el jabón.

- **Procesos fisicoquímicos.** Son las operaciones combinadas de manipulaciones físicas y reacciones químicas; por ejemplo, la electrólisis de una sal fundida. En este tipo de procesos existe un cambio de estado y un cambio de las propiedades químicas.

- **Tecnología.** Es el conjunto de conocimientos propios de una industria en particular; constituye una coordinación de los fundamentos teóricos y prácticos que nos llevan al "cómo hacerlo" conjuntamente con las condiciones óptimas de trabajo. De esta forma, la tecnología es útil para elaborar un producto con la mayor eficiencia a un mínimo costo posible.

  Cada día surgen nuevas tecnologías que pueden ser empleadas en las plantas de una empresa industrial con el fin de mejorar y hacer más eficiente su proceso de producción, pero algunas de éstas requieren comprar maquinaria, lo cual significa que implantar estas nuevas tecnologías no sea a bajo costo, por lo que algunas industrias prefieren seguir utilizando la misma tecnología con la que cuentan y que les permite obtener su producto final; en algunas ocasiones, en el laboratorio de investigación y desarrollo se logran mejorar las tecnologías actuales y el costo por ello es mucho menor.

- **Laboratorio de investigación y desarrollo.** En este laboratorio se realizan actividades de investigación dirigidas a mejorar la capacidad de producción, la calidad del producto o a desarrollar nuevos productos, presentaciones o servicios. También se estudia la utilización de los subproductos y desechos, de manera que puedan constituir fuentes de ingresos adicionales. En general, en los laboratorios de investigación y desarrollo no se realiza investigación básica, sino más bien aplicada, es decir, enfocada al desarrollo tecnológico, ya sea a corto, mediano o largo plazo. En el caso de los laboratorios de investigación y desarrollo de la industria de procesos, se desarrollan y aplican procesos físicos, fisicoquímicos y químicos.

  En esta área también se determinan los tiempos de producción a nivel laboratorio, los cuales se extrapolan a la planta piloto con producciones intermedias, para finalmente extrapolarlos a la planta productiva, haciendo los procesos productivos más eficientes y en tiempos exactos, para que posteriormente se apliquen para la automatización, en caso necesario, de todo el proceso productivo.

- **Economía de la industria.** La economía de la industria es fundamental para la empresa, tanto como la ciencia, ya que uno de los objetivos de la industria es fabricar su o sus productos al mínimo costo posible con la máxima eficiencia. Esto contempla la aplicación de un conjunto de normas económicas que nos llevan a utilizar los recursos económicos (capital de la empresa), físicos (materias primas), productivos (material y equipo) y humano (personal administrativo, directivo y obrero) de una manera óptima.

  Las ramas económicas consideradas en el diagrama conceptual son: contabilidad, administración e ingeniería.

- **Contabilidad.** Constituye el orden adoptado para llevar las cuentas del capital de la industria. Esta área controla las cantidades invertidas en bienes inmuebles (edificios e instalaciones) y en insumos (materias primas y productos elaborados); asimismo, controla la cartera de la industria, que constituye el dinero por concepto de compras, nómina y ventas, entre otros aspectos.

- **Administración.** Esta área está constituida por los diferentes niveles del organigrama de la empresa para ejecutar, planear, modificar y ampliar las políticas productivas de la empresa.

- **Ingeniería industrial.** El alcance de la ingeniería industrial es demasiado amplio; por ejemplo, al interior de una industria química nos ayuda a optimizar el empleo de la materia prima y, por consiguiente, el manejo de inventarios de las mismas (almacenes). Esta área está dedicada a aplicar los estudios de tiempos y movimientos a: las técnicas operacionales, la tecnología, el desarrollo y la investigación de operaciones y el control estadístico de la calidad en el laboratorio analítico.

- **Técnica operacional.** La constituyen las operaciones efectuadas en un orden lógico para la obtención del o los productos.

- **Planta química productiva.** Es el área de la fábrica donde se llevan a cabo los procesos físicos, fisicoquímicos y químicos para transformar la materia prima en producto terminado.

- **Materias primas.** Este término se utiliza para denominar a todas aquellas sustancias que, de forma directa o indirecta, constituyen el producto terminado. Las materias primas pueden ser clasificadas en:

  a) *Materias primas derivadas del carbono.* Éstas son los reactivos químicos derivados del carbono, aunque dentro de esta categoría también pueden considerarse a todos los derivados del petróleo que se utilicen en el proceso de producción; por ejemplo: benceno, tolueno, alcohol etílico, etcétera.

  b) *Materias primas de origen animal.* Son productos derivados de origen animal, como el cuero que se utiliza para la producción de la gelatina, la grasa para la obtención de jabones, las cerdas (pelo) de los animales para elaborar brochas, pinceles, etcétera.

  c) *Materias primas de origen vegetal.* Son productos de origen vegetal, como ceras, aceites, resinas, etc.; los propios vegetales, como la caña de azúcar; las raíces como el barbasco; la piel de las frutas, como la de ciruela, la cual por sus altos contenidos de pectina permite que los alimentos a los cuales se adiciona tengan una consistencia gelatinosa, como por ejemplo en las jaleas, etcétera.

- **Laboratorio analítico de control de calidad.** Éste tiene como finalidad el control de calidad de las materias primas que ingresan a la planta productiva, del producto en proceso y del producto terminado. Los encargados de esta área dan su aceptación si el producto

final cumple con las normas de calidad establecidas o lo rechazan si no las cumple; en este caso, en ocasiones el producto rechazado que no satisface las normas de calidad se transfiere a la planta piloto para su recuperación, elevando sus constantes de calidad.

- **Planta productiva.** En ésta se procesa la materia prima y se obtiene el producto final en una producción a gran escala, es decir la producción establecida para venta y distribución.
- **Producto.** Es el bien o sustancia fabricado por la industria que se sujetará al análisis de control de calidad para su aceptación o rechazo. Si se acepta, éste recibe el nombre de producto final o producto terminado.
- **Subproducto.** Este término se utiliza para nombrar a los productos secundarios que son parte de las materias primas, degradadas o transformadas, que no tienen las características del producto final. Algunos de estos subproductos son recirculados a la planta productiva, otros, en ocasiones, son aprovechados directamente o bien pasan a la planta piloto para obtener otros productos de mayor rendimiento económico.
- **Producto recuperado.** Es el producto que inicialmente no cumplió con los estándares de calidad y es reprocesado para elevar su calidad y así ser aceptado por el laboratorio de control de calidad.
- **Subproducto recuperado.** Es el subproducto que ha sufrido una transformación en la planta piloto; por ejemplo, la recuperación de progesterona en las aguas madre de la cristalización durante la producción de la hormona sintética, la obtención de las esencias de las frutas obtenidas de la cáscara de las mismas, etcétera.
- **Planta piloto.** La planta piloto es el área de la empresa industrial que está constituida por instalaciones y equipo de menor capacidad que la planta productiva. Su principal característica es que ésta debe ser versátil con el fin de modificar, en un momento dado, la técnica operacional. Las funciones de una planta piloto al interior de una industria son: probar nuevas técnicas desarrolladas en el laboratorio de investigación y desarrollo para poder adaptarlas a la producción final, con el escalonamiento adecuado; recuperar los subproductos y los productos rechazados y tratar químicamente los desechos industriales para neutralizar su nocividad y así evitar el deterioro del medio, etc. Cuando la planta piloto cumple satisfactoriamente con estas funciones, se puede decir que ésta produce una utilidad en el proceso productivo y un aumento de eficiencia del mismo.
- **Desecho industrial.** Es toda sustancia que sale de la industria y que no es económicamente aprovechada ni de utilidad para la planta productiva, aunque sí puede ser útil en otra industria. Los desechos industriales son muy variados, por ejemplo: las emisiones de humo de la chimenea, las aguas residuales de los drenajes y los residuos que produce una planta química productiva (algunos de estos residuos químicos pueden ser peligrosos para el medio ambiente, por lo que el laboratorio de investigación deberá estar encargado de investigar la manera de eliminarlos sin producir daños al medio ambiente; una vez que se dictamina la mejor manera de eliminarlos, corresponde a la planta piloto aplicar la técnica correspondiente para tratarlos y desecharlos en una forma segura y confiable).

  En la actualidad, casi todas las plantas industriales cuentan con una planta tratadora de aguas de desecho debido a que la contaminación del medio ambiente preocupa a todos, pero en especial a las autoridades encargadas de minimizar los impactos ambientales de las diferentes industrias.

En el futuro, los ingenieros tendrán un reto muy importante: deberán investigar e implementar las mejores formas de tratar los desechos; por ejemplo, los pañales desechables no se degradan hasta después de muchos años y ocasionan daños irreparables a la tierra y a los mantos acuíferos; por otro lado, recientes investigaciones han demostrado que los pañales de desecho doméstico pueden ser lavados y reutilizados como contenedores de medios de cultivo para los hongos.

1.3 Materias primas, producción industrial y necesidades humanas

Las industrias requieren, en su proceso de producción, de sustancias obtenidas de la naturaleza en forma directa o de sustancias producto de otras industrias intermedias que no se pueden utilizar para consumo final, sino que todavía deben ser procesadas hasta obtener un producto de consumo final, dichas sustancias son llamadas **materias primas** y se definen de la siguiente manera: son todas las sustancias que intervienen en un proceso productivo y son transformadas hasta obtener productos finales, por ejemplo, las sustancias obtenidas de forma directa de la naturaleza, como el carbón, los cereales, el algodón, la sal común, la arcilla y las pieles animales, y las sustancias obtenidas por industrias intermedias, como los colorantes naturales, el cuero curtido, los ungüentos y los perfumes.

De las materias primas también se obtienen otros artículos por métodos industriales, que reciben el nombre de productos de consumo intermedio y/o final (manufacturas); entre éstos se encuentran el hierro, la harina, el ácido clorhídrico, la porcelana, los colorantes artificiales y el cuero sintético.

Todas las materias primas son sustancias; su obtención y uso están íntimamente ligados a su composición química; por consiguiente, para el estudio de éstas y su comercialización es necesario clasificarlas en función de su composición química (véase tabla 1.3).

Tabla 1.3. Clasificación de las materias primas con base en su composición química y su origen (animal o vegetal).

Composición química	Ejemplos
Orgánica	Carbohidratos, grasas, aceites.
Inorgánica	Cobre, carbón, sal, minerales.
Sintética	Nailon, ácido sulfúrico, sosa caústica.
Derivados del carbón	Gasolinas, naftas, polímeros, etcétera.

Origen	Ejemplos
Animal	Piel, cartílagos, vísceras, carne.
Vegetal	Frutas, legumbres, forraje, leguminosas.

Debido a que la obtención de productos a partir de materias primas es el objetivo principal de toda empresa y/o proceso industrial, su clasificación permite conocer el tipo de tratamiento previo que se le debe dar a cada una para poder ser utilizada en la producción total.

La diversidad y la complejidad de las materias primas han dado lugar a una amplia gama de industrias, muchas de las cuales ya no trabajan a partir de productos naturales, sino de sustancias previamente elaboradas por otras empresas (productos intermedios).

Se puede decir que en la actualidad todas las técnicas manejadas en los procesos industriales utilizan sustancias químicas llamadas aditivos industriales; por ejemplo, para la conservación de los alimentos es muy común el uso del benzoato de sodio; por su parte, el cloruro de sodio (NaCl) se utiliza en gran escala en la mayoría de los alimentos proce-

sados, ya sea como saborizante o como conservador de alimentos (tocino y bacalao, entre otros); el ácido láctico es fundamental en las fermentaciones lácticas; algunos compuestos químicos presentes en el humo (fenoles, furanos, alcoholes, ésteres, hidrocarburos aromáticos, entre otros), los cuales se obtienen principalmente por la combustión de maderas finas, son utilizados en productos cárnicos para producir el color y el sabor a ahumado; los nitritos encontrados principalmente en los alimentos cárnicos permiten que la carne se reblandezca, rompiendo los enlaces entre los músculos, y los azúcares utilizados en las bebidas refrescantes dan un sabor dulce a éstas; asimismo, existen muchas más sustancias que ayudan a que los productos obtenidos en las industrias biotecnológicas adquieran características organolépticas aceptables para el consumidor final.

Otros compuestos químicos también se encuentran en la composición de origen del producto, tal es el caso de los triglicéridos de la leche, los ácidos grasos omega 3 y 6 en el pescado, los carbohidratos en el azúcar, las frutas, el pan, el espagueti, los fideos, el arroz, el centeno, etc.; las proteínas, constituidas por carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y trazas de otros elementos, son encontradas en plantas y animales, mismas que son de utilidad para formar estructuras como los cartílagos, la piel, las uñas, el pelo y los músculos.

Entre las proteínas contenidas en la carne está el colágeno, el cual es una sustancia que con la temperatura se transforma en otra proteína más suave, que es soluble en agua caliente: la grenetina o agarosa.

En la industria de los alimentos se cuenta con una gran cantidad de sustancias llamadas aditivos, que como ya se mencionó, tienen aplicaciones como conservadores, antioxidantes, acidulantes, neutralizadores, ajustadores iónicos, agentes afirmadores, emulsificantes, estabilizadores, humectantes, agentes de maduración, agentes de blanqueo, saborizantes, edulcorantes, colorantes, etc.; estos aditivos otorgan características distintivas a los productos obtenidos en las industrias, por lo que su uso es de suma importancia. Así pues, conocer sus propiedades químicas es indispensable para cualquier ingeniero o tecnólogo encargado del proceso de producción de una empresa de transformación de este tipo.

En la industria dedicada a la manufactura de los materiales en estado sólido se cuenta con fundentes, minerales, colorantes, pigmentos, refractarios, cerámicos, escoria, oxidantes, vidrios, elementos de transición y tierras raras, metales, polimorfos, polímeros, arcillas, ácidos y bases, silicio, germanio, cemento, carbón y coque, caliza, acero y fundiciones, carburo de silicio, vidrio plano, azufre y carbonato de calcio, entre otros muchos, que son utilizados como aditivos de gran importancia, ya que son fundamentales en sus procesos de transformación.

Cuando se habla de materias primas utilizadas en la industria farmacéutica, destacan sustancias como los analgésicos, las drogas, los antihistamínicos, los jabones, las urotropinas, las vitaminas, las membranas, la hemoglobina, el ácido acetilsalicílico, etc., que además de ser utilizadas como aditivos en algunos casos, en otros son consideradas los principios activos del fármaco.

En la petroquímica, los hidrocarburos lineales y aromáticos, fenoles, alcoholes, amoniaco, fertilizantes, lodos de perforación, surfactantes, aminas, ácido acético, ácido sulfúrico, éteres, formaldehídos, insecticidas, aceites lubricantes, resinas, parafinas, son algunos ejemplos de la amplia gama de materiales y productos derivados que se utilizan con regularidad en los procesos químicos industriales.

El panorama anterior permite clasificar a la industria química con base en la clase de sustancias que se utilizan en sus procesos, así destacan las industrias extractivas, intermediarias y de transformación final.

Las industrias extractivas se encargan de extraer de la naturaleza las materias primas que pueden ser transformadas para su consumo final; sin embargo, éstas también pueden ser utilizadas en forma directa sin tener que pasar por una industria transformadora, como es el caso de las industrias minera, pesquera, maderera, etcétera.

Las industrias intermediarias utilizan las materias primas naturales obtenidas por las industrias extractivas y las transforman en sustancias intermedias, esto significa que éstas no pueden ser utilizadas en forma directa por el consumidor, sino que tienen que pasar por un proceso de transformación en el que se les dan las características que espera el consumidor final. A este grupo pertenecen muchas de las industrias que obtienen compuestos sencillos; por ejemplo, las que fabrican alcohol etílico por fermentación de azúcares, el cual no puede ser utilizado en forma directa, ya que puede generar daños a la salud de los consumidores; sin embargo, cuando se somete a un proceso de transformación final puede ser utilizado en forma directa por el consumidor, ya sea como desinfectante o como parte de productos envinados de confitería; otro ejemplo significativo es la extracción de los aceites esenciales de frutas y flores, que posteriormente se adicionan en productos finales como perfumes. Asimismo, existen muchos otros productos en los que se utilizan los productos de industrias intermedias como materias primas.

Referente a las industrias de transformación final, se puede decir que éstas pueden utilizar tanto materias primas obtenidas por las industrias extractivas como por las industrias intermedias, su finalidad es obtener un producto que pueda ser comercializado y utilizado directamente por los consumidores; por ejemplo, alimentos enlatados, productos cárnicos, medicamentos, ropa, zapatos, llantas para automóviles, etc. Se puede decir que existen dos tipos de industrias de transformación: las que obtienen productos aptos para ser consumidos directamente y las que constituyen un eslabón intermedio en el proceso de elaboración de un producto final.

Desde un punto de vista económico, los productos elaborados por las empresas industriales de base poseen un valor añadido respecto a los productos naturales de partida, debido a que los primeros contienen conservadores que les permiten tener una vida de anaquel más larga, mientras que los productos naturales, debido a que no cuentan con conservadores, tienen que ser comercializados con mayor rapidez, porque de lo contrario pierden su valor por descomposición, lo que los hace inservibles.

Por lo general, las industrias de transformación final están localizadas en lugares de fácil acceso a las materias primas y a las fuentes de energía de las que dependen. Debido a que se ubican en los mismos lugares de producción o se hallan próximas a los centros de distribución (puertos, oleoductos, vías férreas, carreteras de fácil acceso, etc.), bajan los costos de transportación, ya sea de materias primas o de productos terminados, haciendo que el costo final del producto sea competitivo con los de otras industrias.

La utilización y la explotación intensiva y sin control de materias primas de origen natural puede provocar su agotamiento, pues algunas de éstas son consideradas recursos no renovables, esto genera que las industrias de transformación tengan la necesidad de investigar la forma de obtener materias primas de origen químico (derivadas de reacciones químicas) que puedan sustituir a las naturales; por ejemplo, algunos combustibles fósiles han sido sustituidos por hidrógeno o metano obtenidos a partir de la fermentación del maíz.

Además, la tecnología actual contempla un mayor aprovechamiento de todos los materiales, por lo que es capaz de reducir, en muchos casos, la proporción de materia prima necesaria para la fabricación de un producto, con lo cual se prolonga la disponibilidad de éstas, así como la de los yacimientos del mineral de donde se extraen.

Los implicados en los procesos industriales ya no limitan su tarea a extraer determinadas sustancias para combinarlas con otras, sino que dividen y subdividen las sustancias naturales hasta llegar a los compuestos más simples o, incluso, hasta los propios elementos.

Las auténticas materias primas universales de la industria actual son: el hidrógeno, el oxígeno, el dióxido de carbono y el nitrógeno, ya que a partir de estas materias puede obtenerse casi cualquier producto.

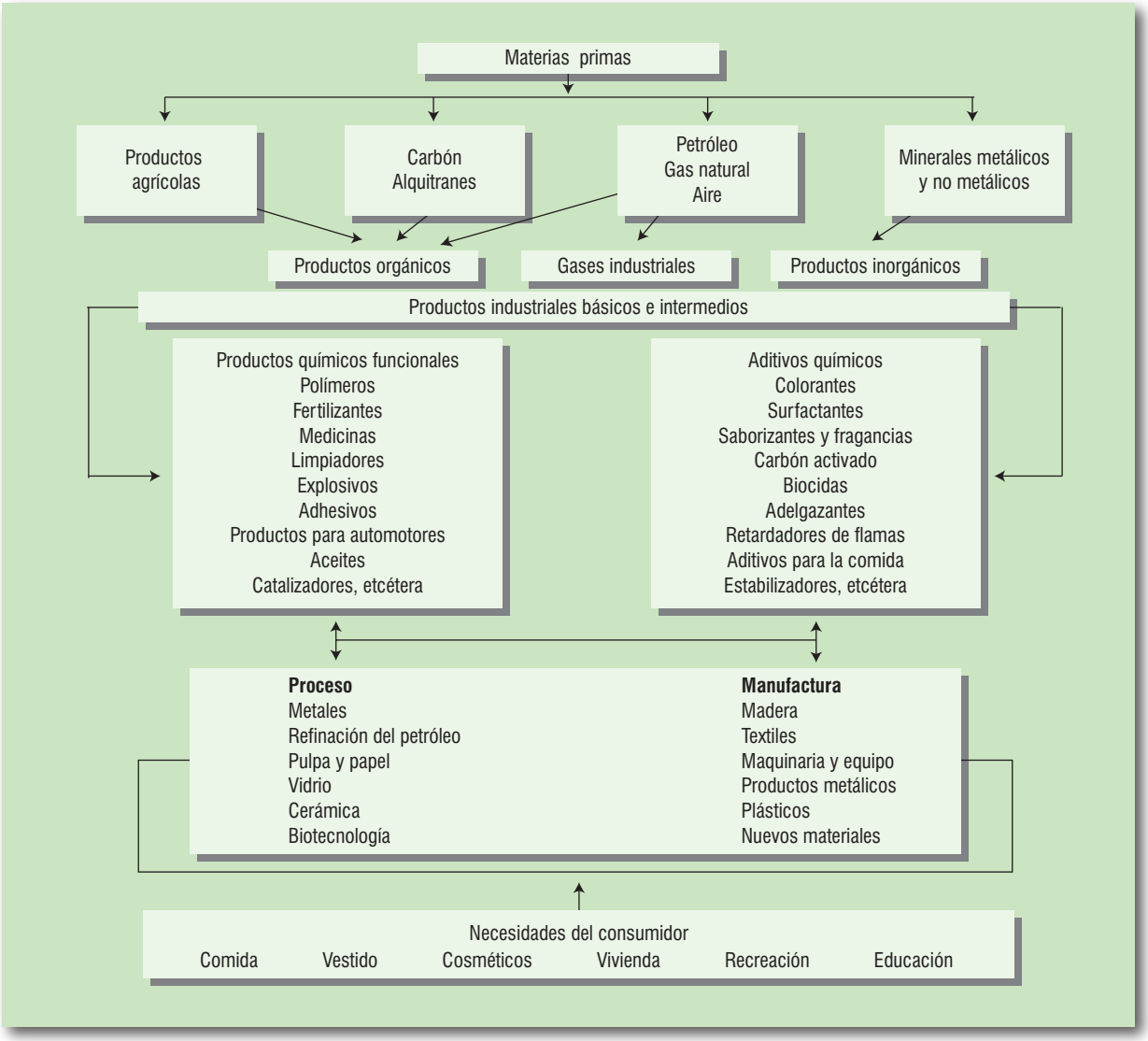


Figura 1.6 *La empresa industrial, materiales y flujo de productos.*

Si se examinan las necesidades de la población y los productos que las satisfacen, se puede observar que esos productos y servicios son proporcionados por importantes industrias. En la figura 1.6 se encuentra un diagrama en el cual se puede observar la cadena generada por las materias primas hacia los diferentes procesos productivos.

1.4 Los procesos industriales

En sentido estricto, un proceso es una serie de pasos que se deben seguir para lograr un objetivo; en el caso de los procesos industriales estos pasos reciben el nombre de **operaciones unitarias** cuando los fenómenos son físicos, y **procesos unitarios** cuando se trata de fenómenos químicos (véase tabla 1.4). En el diagrama conceptual de una empresa industrial

(véase figura 1.5) se puede observar que el proceso productivo se lleva a cabo en la planta industrial; sin embargo, para lograr un resultado óptimo, es necesario que dicho proceso se realice en tres niveles:

- **Nivel laboratorio.** Se realiza en el departamento de investigación y desarrollo.
- **Nivel piloto.** Se realiza en la planta piloto de la empresa.
- **Nivel productivo.** Como ya se mencionó, se realiza en la planta productiva.

1.4.1 Nivel laboratorio

En este nivel no sólo se desarrollan los procesos actuales en micro escala, sino que también se investigan, con todos sus alcances y consecuencias, los posibles procesos que se hayan planteado en la empresa como propuesta de producción (nuevos productos) o las mejoras a los procesos actuales en relación al tiempo, materias primas nuevas, condiciones de operación, etc. Es importante resaltar que es en este nivel donde se investigan y se llevan a cabo las posibles correcciones a los productos que han sido rechazados en la planta productiva para convertirlos en productos recuperados. Asimismo, en este nivel se analiza el posible uso de los subproductos obtenidos durante el proceso de producción existente, cuando los desechos de la empresa son tóxicos y contaminantes del ambiente; en esta área es donde se desarrollan técnicas de manejo de residuos peligrosos, contenedores de sustancias de alto riesgo y desechos industriales en general.

1.4.2 Nivel piloto

El nivel piloto se desarrolla en el área de planta piloto; en ésta se realizan los procesos productivos en una escala intermedia entre la producción real final y el nivel laboratorio. Cabe destacar que en este nivel es donde se obtiene información referente al tiempo real de producción con el fin de hacer los ajustes necesarios a los procesos en función de sus propiedades físicas, químicas y organolépticas, para que en la producción total se obtengan productos que sean aceptados desde el inicio por el departamento de control de calidad; asimismo, aquí también se analizan los tiempos de vida de anaquel de los productos y el mejor manejo de la materia prima y el producto terminado.

Tabla 1.4. Ejemplos de operaciones y procesos unitarios.

Operaciones unitarias (procesos físicos)	Procesos unitarios (procesos químicos)
Filtración	Combustión
Decantación	Neutralización
Evaporación	Electrólisis
Destilación	Hidrogenación
Secado	Saponificación
Centrifugado	Esterificación
Agitación	Calcinación
Mezclado	Hidrólisis
Tamizado	Intercambio iónico
Pulverización	Oxidación

1.4.3 Nivel productivo

A nivel productivo o de planta productiva, el proceso se lleva a cabo a macro escala, del cual se obtiene el producto final que será evaluado por el departamento de control de calidad y que posteriormente será distribuido a los intermediarios para su distribución o a los consumidores finales. La planta productiva debe tener todo el proceso productivo en perfecto control, el cual contempla: condiciones de operación, cantidades de materia prima, forma de alimentación de las materias primas, obtención del producto intermedio para su análisis de control de calidad, manejo de los subproductos obtenidos, forma de trabajo (línea, continuo, por lotes, etc.) y presentación del producto, entre otros aspectos.

En todos los niveles de producción se llevan a cabo procesos físicos, químicos y fisicoquímicos, los cuales se describirán y analizarán en capítulos posteriores.

Figura 1.7 *Ejemplos de operaciones unitarias.*

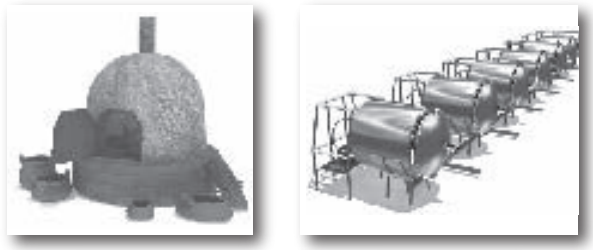


Figura 1.8 *Ejemplos de procesos unitarios.*

Para establecer un proceso de producción se deben responder las siguientes preguntas fundamentales:

1. ¿Cuáles son las actividades necesarias para elaborar el producto?
2. ¿Qué orden deben llevar las actividades en el proceso industrial, de tal manera que se encuentren ordenadas de forma lógica y en secuencia?
3. ¿Qué tiempo se requiere para desarrollar cada actividad?
4. ¿Existe un diagrama de flujo adecuado del proceso de producción?
5. ¿Cuáles son los aspectos de control de calidad que se deben cuidar en el proceso de producción?
6. ¿Cuáles son los pasos más problemáticos del proceso productivo?

Al responder estas preguntas se debe considerar lo siguiente:

1. Las actividades necesarias para la elaboración de un producto en el área productiva están relacionadas con las operaciones (véase figura 1.7) y los procesos (véase figura 1.8) unitarios que se llevan a cabo para obtener el producto; es decir, desde que se selecciona la tecnología se debe conocer cuál será el procedimiento de producción que se debe seguir para lograr obtener el producto final terminado. En esta etapa se debe distinguir perfectamente el carácter de las operaciones unitarias (es decir, si corresponden a transporte, almacenamiento, unión o separación de mezclas, así como de reducción de tamaño de sólidos o aumento del mismo), de la misma manera se debe identificar qué tipo de reacción química se efectuará, con el fin de planear perfectamente el acondicionamiento para la realización de la misma; por ejemplo, si se trata de una reacción exotérmica se debe considerar que el reactor en donde se lleve a cabo tenga un enchaquetado que permita enfriar el reactor, para evitar que los gases generados por la reacción provoquen un aumento en la presión del sistema y no pueda soportarlo y se genere un accidente en la planta productiva.
2. En este punto es necesario elaborar un diagrama de flujo que exprese perfectamente el procedimiento a seguir para la elaboración del producto; es decir, que la secuencia de operaciones y procesos unitarios sea lógica y permita que el producto final cumpla con las especificaciones de calidad establecidas por la norma oficial. Es importante resaltar que esta secuencia de pasos debe llevarse a cabo en la planta industrial siguiendo el orden que deben tener los equipos que se utilizan en el proceso, para que no se pierda tiempo en el traslado del material de un extremo a otro de la planta; por ejemplo, si el

proceso productivo establece que se deben mezclar los reactivos, generar un precipitado y después filtrarlo, lo correcto es que después del tanque de agitación se encuentre el filtro prensa por donde deberá pasar el precipitado obtenido para su filtración. Algo incorrecto e ilógico sería que en un extremo de la planta se encuentre el tanque de agitación y en el otro extremo el filtro prensa, lo cual generaría un transporte innecesario de producto intermedio por toda el área productiva. Por esa razón, el hecho de contar con un diagrama de bloques en donde se indique la secuencia de las operaciones y los procesos unitarios ayuda a que la distribución de equipos en el área sea correcta, lógica y que genere un ahorro de tiempo en la producción.

3. Como ya se mencionó anteriormente, el proceso productivo debe pasar por tres niveles de realización: en el nivel laboratorio se determinan los tiempos de producción con cantidades de materia prima y producto terminado muy pequeñas, lo cual permite que al extrapolar la información a cantidades mayores se puedan hacer los ajustes necesarios para que la producción total se obtenga en el tiempo justo y evitar tiempos muertos en la planta productiva. El tiempo del proceso productivo es muy importante, ya que si una operación o proceso unitario se realiza en un tiempo mayor al requerido, se corre el riesgo de que cambien las características tanto físicas como químicas y organolépticas del producto, provocando que se demerite su calidad y probablemente pueda ser rechazado por el área de control de calidad. Por ejemplo, si a la leche condensada se le deja más tiempo del necesario en el evaporador, ésta cambia de color, oscureciéndose y aumentando su viscosidad, densidad y textura, provocando que sea rechazado por el laboratorio de control de calidad, lo cual puede generar pérdidas en la planta, pues deberá regresarse a la planta productiva para corregir el error y recuperar el producto, lo cual genera un gasto a la empresa. En casos extremos la producción debe ser desechada.

4. En esta etapa el diagrama de bloques es fundamental para distribuir los equipos en la planta y sobre todo para ubicar la materia prima y el producto terminado en forma lógica y práctica. Sin embargo, el diagrama de bloques también tiene otras utilidades, debido a que éste es sólo el bosquejo inicial del proceso y a partir del cual se debe elaborar un diagrama de proceso en el que se incluyan las características de la materia prima (cantidades y propiedades fisicoquímicas), las variables de estado que deben controlarse durante el desarrollo del proceso productivo, las pruebas de control de calidad y los suministros de energía, así como los símbolos representativos de cada operación y proceso unitario, esto permite a todo el personal de la planta productiva ubicarse en ella y desarrollar las actividades correspondientes en el momento oportuno, evitando errores en la producción y pérdida de tiempo.

5. Uno de los factores primordiales en el área de producción es el control de calidad que se debe llevar a cabo en la planta, ya que de éste depende que el producto sea aceptado o no. Por esa razón, el control se lleva a cabo a lo largo de todo el proceso, desde la recepción de la materia prima y el desarrollo del producto, hasta el producto terminado, pasando por una perfecta selección de la maquinaria y el control de las características físicas, químicas, biológicas y organolépticas del producto final, el cual debe cumplir con los estándares determinados en las normas oficiales y con lo establecido por toda la reglamentación sanitaria, de esta manera el producto podrá ser aceptado y sacado a la venta sin ningún problema.

6. Este punto es sustancial debido a que al identificar los puntos en los que el proceso productivo presenta problemas o dificultades, deberá tenerse mayor cuidado en el desarrollo de éstos, evitando que se cometan errores en la producción; por ejemplo, si

una de las características de un producto determinado es la viscosidad en el momento de llevarse a cabo la agitación de las materias primas, se sugiere realizar la determinación de la viscosidad en el tanque y no dejar que el proceso siga hasta que el valor de la viscosidad esté dentro de los límites indicados en el estándar, de lo contrario, cuando el producto esté terminado y su calidad no sea la deseada se deberá regresar el producto hasta que se corrija el error, ocasionando pérdidas de tiempo y dinero para la industria.

Por otro lado, las etapas que debe desarrollar una empresa industrial para el establecimiento de la planta son:

- Investigación de mercado.
- Selección del proceso.
- Determinación del costo de un producto.

1.4.4 Investigación de mercado

Por lo que respecta a la investigación de mercado, es importante aclarar que el dueño o el encargado de la industria que planea establecer una planta productiva debe realizar este tipo de investigación, debido a que puede suceder que se tenga pensado fabricar un producto cuya demanda esté satisfecha en el mercado y establecer una planta con este propósito no tendría ningún éxito, ya que la competencia sería muy grande y el mercado muy pequeño o nulo. Este análisis permite al industrial hacer una perfecta planeación, con base en un adecuado estudio de la demanda del producto que desea elaborar y del mercado al cual va dirigido, así como de las características que el consumidor final espera de éste a fin de satisfacer la demanda detectada.

1.4.5 Selección del proceso

Existe una gran cantidad de procesos que se pueden llevar a cabo para obtener el mismo producto, lo importante es saber seleccionar el que nos genere el menor número de inconvenientes durante el proceso, porque si por ejemplo se elige un proceso que contemple el uso de tecnología extranjera y los distribuidores no ofrecen el apoyo para el establecimiento y la adaptación de ésta a las condiciones del lugar en donde se desea crear la empresa, ajustarlo en forma personal resulta complicado y en ocasiones muy costoso, debido a que se debe contratar a un grupo de ingenieros o a un bufete de ingenieros que haga dichos ajustes. Por ejemplo, un inconveniente se presenta cuando la tecnología contempla la maquinaria para efectuar el proceso y sus características de conexión eléctrica no son compatibles con las existentes en la planta, muchas veces esto cambia la velocidad de operación de la máquina, provocando que el producto obtenido no satisfaga los requerimientos del producto final, generando el rechazo del consumidor; por esto, el proceso debe ser seleccionado con mucho cuidado y con la asesoría de personas capacitadas en la instalación y puesta en marcha del mismo.

1.4.6 Determinación del costo de un producto

En ocasiones, el costo del producto final es determinado en forma incorrecta, ya que sólo se considera el costo de la materia prima, al cual sólo se aplica un aumento en un porcentaje dado, pensando que con eso es suficiente para cubrir todos los gastos; lo cierto es que en algunas ocasiones esto funciona para determinar el precio del producto en la planta, pero no es funcional para hacerlo competitivo en el mercado, provocando que el producto no se venda y, por ende, la planta industrial tenga que cerrar sus puertas. Respecto a este punto,

se debe recordar que todo lo que ocurre en el transcurso del proceso productivo en la planta se relaciona directamente con cada área de ésta, de tal forma que para determinar el precio se deben considerar no sólo los gastos de la materia prima, sino también los gastos por pago de nómina, los servicios que se utilizan en la planta, las amortizaciones del equipo, para que en el momento en que éste se deteriore, se tenga la solvencia económica en la planta para poder reemplazarlo, los seguros contra accidentes y, en general, los seguros para protección de personal, de los bienes inmuebles, etc., así como los gastos por permisos y trámites legales que deben pagarse al gobierno por la instalación y puesta en marcha de la industria, los impuestos y la seguridad del personal, entre muchos otros factores que deben ser cubiertos por los dueños de las plantas industriales. Pero, sobre todo, el costo debe estar íntimamente relacionado con la competitividad que se tenga en el mercado, porque un producto de excelente calidad a un precio excesivo difícilmente será aceptado en el mercado por salir de los estándares establecidos por las otras empresas para un producto similar.

Por las razones previamente expuestas, es primordial resaltar que antes de iniciar la instalación de una empresa se deben tomar en cuenta todas las recomendaciones que se explicaron antes, de lo contrario no se tendrán los argumentos suficientes para poder crear esta industria ni las ganancias esperadas por los inversionistas y la planta será un fracaso industrial.

En resumen, se puede decir que la fabricación de un producto requiere, en general, de la realización de una serie de procesos y operaciones parciales, más o menos independientes, en los cuales la preparación y la purificación de las materias primas, la reacción propiamente dicha y el acondicionamiento de los productos finales son de gran importancia en la fabricación de casi todos los productos. Cada uno de estos procesos y operaciones se pueden subdividir a su vez en operaciones unitarias (trituración, desecación, tamizado, etc.) y procesos unitarios (fermentación, saponificación, neutralización, etc.).

Ambos tipos de procesos son igualmente trascendentes y su implantación en la planta productiva garantiza el curso planeado del proceso total.

Es importante recordar que los procesos asociados a las transformaciones físicas se denominan **operaciones unitarias**, también conocidos como procesos básicos, mismos que a su vez se subdividen en dos grupos principales: formación y separación de mezclas. Cada uno de estos dos grupos forman o separan mezclas de tipo: sólido-sólido, sólido-líquido, sólido-gas, líquido-líquido, líquido-gas y gas-gas (véanse tabla 1.5 y figura 1.9).

Una materia prima raras veces se puede someter a una transformación química en la forma en la que es obtenida de la naturaleza, lo normal es que antes de la reacción tenga que ser preparada y acondicionada, de manera similar al obtener los productos de la reacción y llevarlos a formas de comercialización, éstos deben pasar por procesos de control de calidad y empacado.

Líquido-sólido

Líquido-líquido

Líquido-gas
(Jupiter Images Corporation)

Figura 1.9
Ejemplos de las combinaciones básicas de los estados de agregación de la materia.

Tabla 1.5. Ejemplos de las combinaciones básicas de los estados de agregación de la materia.

Soluto	Solvente		
	Líquido	**Sólido**	**Gas**
Líquido	Alcohol disuelto en agua	Mercurio disuelto en cobre	Adsorción de hidrocarburos
Sólido	Azúcar disuelta en agua	Oro disuelto en plomo	Partículas de polvo en el aire
Gas	Dióxido de carbono en agua	Hidrógeno disuelto (ocluido) en platino	Todas las mezclas de gases

Aunque los procesos físicos básicos son significativos, no suelen constituir el núcleo del proceso total, sino que éste radica más a menudo en la realización de las reacciones químicas o los procesos unitarios básicos, entre los que destacan los procesos térmicos, los cuales frecuentemente se acoplan a las reacciones de oxidación y reducción. La gran cantidad de calor necesaria para su realización se toma muchas veces de la reacción misma, pero también es frecuente suministrarlos desde el exterior con combustibles sólidos, líquidos o gaseosos, de energía eléctrica y, en algunos casos, utilizando directamente hornos de arco eléctrico.

Otros métodos químicos básicos son la electrólisis, la neutralización, la hidrólisis, la saponificación, la esterificación, la fermentación, etc. Los procesos de fermentación, limitados anteriormente a la industria alimenticia, también han adquirido una considerable importancia en los últimos años en la producción de medicamentos que actúan como antibióticos.

Existe una multiplicidad de métodos químicos básicos que no necesariamente corresponden a una cantidad semejante de equipos en los cuales se llevan a cabo. Sin embargo, en la construcción de reactores son determinantes las condiciones* o las variables del proceso a las cuales se debe trabajar, mientras que la reacción química y los productos determinan los materiales con que deben construirse los reactores.

1.5 Importancia de las variables de proceso en los balances de materia y energía

Al estudiar cualquier aspecto de interés, por lo general se comienza por aislar una región del espacio que la rodea, la cual recibe el nombre de sistema; una vez que se ha elegido el sistema, se procede a definirlo con ayuda de las propiedades y las variables de estado. Las variables y las propiedades de estado caracterizan y controlan el proceso, además de que constituyen los parámetros que permiten seleccionar qué equipos y procedimientos tecnológicos conviene aplicar a lo largo del proceso productivo.

Las propiedades de estado pueden dividirse en dos grupos:

1. **Propiedades extensivas**. Dependen de la cantidad de materia (masa, volumen). Su valor total es la suma de los valores correspondientes a las partes en que puede dividirse arbitrariamente el sistema, un ejemplo es el calor específico que es la energía necesaria para incrementar en una unidad de temperatura una cantidad de sustancia; por ejemplo, la cantidad de calor necesaria para que una sustancia cambie del estado líquido al estado gaseoso; de esta forma, si se utilizan 2 g de sustancia, el calor será el doble que si se vaporiza 1 g de la misma, mientras que si se determina el calor requerido para evaporar la mitad de un gramo, éste será la mitad del calor requerido para evaporar 1 g, y así sucesivamente se aumentará o disminuirá la cantidad de calor respecto a la cantidad de materia que se tenga en estudio.
2. **Propiedades intensivas**. Éstas no dependen de la cantidad de materia, por tanto, representan las características de las sustancias presentes, independientemente de su cantidad. Éste es el caso del índice de refracción, la viscosidad, la densidad y la tensión superficial, entre otras; por ejemplo, cuando es necesario medir la viscosidad de la miel no se requiere medirla en toda la miel, basta con hacerlo en una muestra significativa para conocer la resistencia que tiene la sustancia a fluir, que es como se define la viscosidad. De esta manera, es posible distinguir que no importa la cantidad

* Las condiciones son llamadas variables del proceso.

de sustancia que tomemos para el estudio de esta propiedad, ésta no cambia a menos que se cambien sus variables de estado (es decir, cuando se aumenta la temperatura, la viscosidad baja y cuando se disminuye la temperatura la viscosidad aumenta).

Las variables de estado como la presión, la temperatura, la concentración, etc., controlan el proceso, limitándolo a estándares establecidos con anterioridad. Los instrumentos utilizados para controlar estas variables, ya sea en forma manual o automática, permiten que el proceso productivo se desarrolle de forma correcta y eficiente; por ejemplo, cuando se desea evaporar agua en un sistema de concentración de almíbar es necesario que el sistema llegue al punto de ebullición del agua, porque de lo contrario ésta no se podrá evaporar y, por tanto, el producto no tendrá las características de viscosidad deseada, provocando que éste no tenga la apariencia deseada por el consumidor; en este caso es necesario suministrar calor al sistema hasta que la temperatura llegue a los 100 °C a nivel del mar. Para que la viscosidad del almíbar sea la correcta, se baja la temperatura en el sistema para detener la evaporación y evitar que el producto se seque por completo.

Durante el proceso se ajustan las propiedades intensivas y las variables de estado en el sistema para obtener el producto deseado, con la calidad requerida por el área de control de calidad, de tal forma que cuando llegue al mercado el consumidor final lo acepte y compre con regularidad.

Adicionalmente, al interior del sistema puede existir uniformidad o éste puede constar de dos o más fases, las cuales están separadas entre sí por superficies definidas; en el primer caso se habla de un sistema de tipo homogéneo y en el segundo de uno heterogéneo.

El estado de un sistema se puede establecer definiendo los valores para cada una de las variables independientes presentes durante el desarrollo de un proceso; así, se puede hablar de que un cambio de estado se presenta cuando los valores de las variables del proceso entre dos puntos de interés cambian. Son de particular interés, el cambio entre el estado final e inicial de un proceso por lotes y el cambio entre las entradas y salidas de un proceso continuo.

Es importante mencionar que el grupo de variables de proceso que son independientes e indican los grados de libertad que influyen en el proceso efectuado, es el mínimo número de variables que se debe conocer del sistema para describirlo en su totalidad.** Por ejemplo, cuando se tiene un sistema de un solo componente con tres fases en éste, se dice que se llega al punto triple de la sustancia; en este caso, los grados de libertad son cero debido a que, para que existan en el sistema los tres estados de agregación, es necesario tener una temperatura y una presión específica, y si cualquiera de éstas se cambia no es posible llegar a este punto.

La manipulación de las distintas variables, como presión, volumen, concentración y temperatura, pueden modificar la dirección de las reacciones efectuadas durante el desarrollo de un proceso, de esta forma se puede hablar de conceptos como procesos reversibles (cuando se pueden retomar las condiciones de inicio), irreversibles (cuando no es posible regresar a las condiciones originales mediante el cambio de variables), en equilibrio o de operación en estado estacionario (cuando los valores de las variables del proceso que lo caracterizan no varían con respecto al tiempo). Cuando cualquiera de las variables de estado fluctúa con el tiempo, se dice que la operación es transitoria o de estado no estacionario.

Los primeros procesos industriales generalmente se realizaban de manera intermitente; hoy en día muchos procesos continúan haciéndose de ese modo. En los procesos por lotes las variables pueden medirse de manera más fácil; aunque el control de temperatura en éstos puede ser difícil. Los procesos continuos se emplean para producir grandes vo-

** Los grados de libertad están en función del número de fases y componentes del sistema.

lúmenes y casi sin excepción, requieren de equipo mucho más pequeño y menos costoso que el que se necesitaría para obtener una producción equivalente en un proceso por lote, además manejan menos material en el proceso (y, por tanto, hay menos riesgo de perder grandes cantidades de material) y tienen condiciones de operación más uniformes que los procesos intermitentes. Los procesos continuos requieren controles más rápidos de flujos y otras variables, los cuales serían imposibles sin una instrumentación de buena calidad (como los tableros de control).

Es común fabricar pequeñas cantidades de productos por medio de operaciones intermitentes, pero cuando el mercado aumenta, suele adoptarse un proceso continuo, con el que, por lo general, se logra una reducción en el costo de la planta por unidad de producción. A medida que el volumen de producción aumenta, el responsable del proceso debe calcular el punto en que los gastos de mano de obra, investigación, instrumentación y equipo justifican el cambio a un proceso continuo, con una inversión unitaria más baja, costos de operación y calidad más uniformes.

La tendencia actual es crear más plantas pequeñas automatizadas que operen en continuo, como primer paso, en lugar de emplear un proceso intermitente.

Los procesos industriales se pueden clasificar de la siguiente manera:

1. **Intermitentes o por lotes**. Éste se caracteriza porque las entradas se alimentan al inicio del proceso y transcurrido cierto tiempo se aísla el contenido del depósito; no hay traspaso de masa más allá de los límites del sistema desde el momento en que se introduce la alimentación hasta que se retira el producto.
2. **Continuos**. Aquí las corrientes de alimentación y de descarga fluyen de manera continua durante todo el proceso.

Desde que los costos se han visto fuertemente afectados por la utilización y la distribución de los materiales, el balance de masa es el primer paso esencial para el estudio de cualquier proceso. El balance de masa estudia la distribución de todos los materiales empleados en el proceso para obtener productos, subproductos y desechos.

De igual manera, el uso y la distribución de la energía son muy importantes debido a los altos costos actuales de la energía; sin embargo, los procesos industriales constituyen una industria de energía intensiva y actualmente se dedica mucho esfuerzo para minimizar el empleo de este recurso, previendo que en el futuro el ahorro de energía sea un tema de mayor importancia de lo que es ahora. Tanto en el siglo pasado como en éste, los recursos energéticos provenientes de recursos fósiles han aumentado su participación como fuentes primarias de energía hasta ocupar un lugar destacado (véase figura 1.10).

Las tendencias de las curvas que se observan en la figura 1.10 son bastante estables y predecibles, en especial las de los energéticos conocidos, como: madera, carbón, petróleo crudo y gas natural (debido a esto, en la actualidad se buscan nuevas fuentes de energía, como eólica, biomasa y de fermentación del maíz, para obtener combustible a partir de éstos). Sin embargo, la curva de la energía de fisión nuclear ha cambiado de pendiente en los últimos años debido al rechazo que se ha dado en muchos países a la construcción de las plantas nucleoeléctricas.

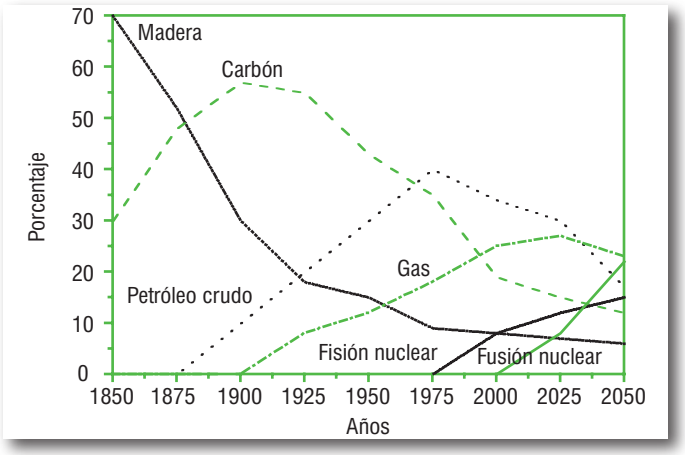


Figura 1.10 *Sustitución de recursos de energía primaria.*

Respecto al balance de masa, es de suma importancia conocer las diferentes etapas por las que pasan los materiales —sólidos, líquidos y gases— en su acondicionamiento en los procesos industriales; así, hay manipulaciones que consisten en transformarlos de formas menos útiles a formas más útiles, como el carbón a gasolina para impulsar vehículos automotores, o el manejo de biomasa en electricidad para hacer funcionar un televisor, por eso es indispensable conocer la intervención de variables que influyen en las propiedades de los materiales durante el proceso de producción, como presión, temperatura, densidad, volumen, energía, etc., y su manejo eficiente durante su control y medición.

Para predecir la mayoría de las propiedades de los materiales bajo ciertos límites de valores de las variables del proceso se han desarrollado ecuaciones sencillas, bajo esa premisa existen datos que son tabulados en varios textos y manuales. De esta manera, se sabe que la densidad de sólidos y líquidos cambia sólo ligeramente con la temperatura y aún menos con la presión; también existen relaciones entre la profundidad de las capas terrestres y la temperatura encontrada; por ejemplo, se sabe que en los pozos de petróleo por cada kilómetro de profundidad hay un aumento de 25 °C en la temperatura, o que el aumento de concentración se relaciona directamente con la rapidez de una reacción.

La observación demuestra que las variables que intervienen en un proceso influyen directamente en su comportamiento; así, en todos los casos en los cuales se debe prestar atención para describir el funcionamiento del proceso, es necesario hacer uso de cantidades medibles, las cuales, en la mayoría de los casos, están directamente relacionadas con las percepciones sensoriales (presión, temperatura, volumen, composición, etc.), éstas son las propiedades que definen el proceso y que se deben considerar al efectuar los balances de masa y energía.

Entonces, las variables del proceso son aquellos atributos físicos percibidos por los sentidos, o que pueden hacerse perceptibles, mediante ciertos métodos experimentales.

Aquí habría que hacer una distinción, los ingenieros o los responsables directos del proceso productivo difieren de los científicos, por su preocupación respecto de los costos y los beneficios, ya que cada decisión de ingeniería implica consideraciones económicas; de esta forma, los ingenieros deben estar siempre al tanto de las implicaciones económicas que puedan afectar sus productos.

De esta manera, el objetivo principal de un ingeniero de procesos debe ser ofrecer al público consumidor los mejores productos y los servicios más eficientes al más bajo costo, mediante la manipulación y el control adecuados de las variables de proceso, así como la aplicación de los balances de masa tanto en las operaciones unitarias como en los procesos unitarios, y en el proceso total. Estos balances nos permiten confirmar la primera ley de la termodinámica, que indica claramente que la materia como la energía del universo no se crea ni se destruye, sólo se transforma, principio que toda industria aplica debido a que de la materia prima que entra a una industria se obtiene al menos un producto terminado que tiene diferentes características y propiedades que la materia que le dio origen; por ejemplo; a partir de la sosa cáustica y el aceite de coco se producen jabón y glicerina; sin embargo, si se analizan detenidamente es posible darse cuenta que las características y las propiedades de la sosa y el aceite en nada se parecen a las del jabón (véase figura 1.11).

Saponificación

Jabón

Figura 1.11 *Aceite de coco y sosa.*

1.6 Actividades y problemas

1. Elabore el diagrama conceptual de una industria.
2. Indique los conceptos de cada una de las partes que lo integran.
3. Mencione la clasificación de las materias primas y escriba un ejemplo de cada una.
4. Mencione cómo se clasifican los productos y escriba un ejemplo.
5. Mencione y explique cómo se clasifican las empresas y escriba un ejemplo de cada una de éstas.
6. Indique cuáles son las diferencias entre un proceso físico, un proceso químico y un proceso fisicoquímico.
7. Explique en qué partes de la industria es necesario realizar controles de calidad.
8. ¿Cuál es la diferencia entre un subproducto y un desecho industrial?
9. Explique las diferencias que existen entre una empresa de extracción, una de explotación y una de transformación.

   Después de leer el siguiente texto, correspondiente al proceso de producción de jalea, indique la secuencia de pasos por bloques y responda las interrogantes que se formulan.

   La fruta se limpia y se eliminan la dermis y los pedúnculos, luego se lava y se tritura; la fruta contiene 86% de agua y 14% de sólidos solubles. Una vez triturada, se mezcla con azúcar en una proporción de 45 a 55% en peso, en este paso también se agrega pectina y ácido cítrico, con lo que el pH alcanza un valor de 3,5. Luego, esta mezcla se somete a una evaporación de 80 °C por 20-30 minutos, con lo cual se elimina agua y la concentración de sólidos en el producto resulta ser de 67% en peso.

10. ¿Cuáles son las materias primas empleadas en el proceso productivo y cómo se clasifican éstas por su origen y su composición?
11. ¿Qué fenómenos físicos (operaciones unitarias) se llevan a cabo?
12. ¿Qué desechos resultan del proceso?
13. ¿Cuáles son las condiciones de operación?
14. ¿En qué tipo de empresa se clasificaría el proceso?

Preguntas 15 a 19.

Lea el siguiente texto y conteste lo que se le cuestiona:

El proceso de fabricación de silicato sódico inicia con la eliminación de la humedad de todas las materias primas: polvo de cuarzo fino, sulfato sódico y carbón vegetal, en seguida éstas se envían a un equipo en donde se mezclan en las siguientes cantidades: polvo de cuarzo fino (100 kg), sulfato sódico (70 kg) y carbón vegetal (4 kg); el equipo se pone en movimiento hasta que esté perfectamente combinado. Este material se introduce a un horno donde se obtienen silicato sódico, bióxido de carbono y bióxido de azufre. El horno tiene un quemador que funciona con *fuel-oil* y su temperatura de funcionamiento es de 1 500 °C.

Finalmente, una vez formado el silicato, se vacía y se enfría con agua. El material se reduce de tamaño y se le agrega agua.

15. ¿Cuáles son las materias primas o insumos? Clasifíquelas de acuerdo con su composición y su origen.
16. Identifique los suministros del proceso.
17. ¿Cuáles son los subproductos?
18. Identifique los procesos físicos (operaciones unitarias).
19. Mencione los procesos químicos (procesos unitarios).

Conteste las preguntas 20 a 22 con base en la descripción siguiente:

En el proceso de hidrogenación del carbono, para obtener gasolina sintética, se alimenta carbón y un catalizador a un triturador y la descarga se empasta con aceite en un depósito. En seguida, una bomba toma la pasta,

la comprime y la introduce en un horno donde se realiza la reacción de hidrogenación a 450 °C y 200 atm. El producto caliente pasa por una centrífuga para separar la materia volátil, la cual se envía a una columna de destilación. El aceite pesado que se descarga de la centrífuga y de la columna del fondo, va hacia un depósito para recircularlo después y empastar más carbón. El destilado de la columna se lleva al horno de gasolina donde reacciona con hidrógeno en presencia de un catalizador granulado, a 200 atm y 450 °C. El producto gaseoso pasa a otra columna de destilación que descarga gases licuables (principalmente propano) y como producto de fondo es gasolina que se purifica con lejía alcalina (hidróxido de sodio).

20. ¿Cuáles son las materias primas que se utilizan en el proceso antes descrito? Clasifíquelas de acuerdo con su composición y origen.
21. Mencione cuál es el producto, el subproducto y los desechos del proceso.
22. Identifique las operaciones unitarias y los procesos unitarios que se llevan a cabo en este proceso de producción.

Conteste las preguntas 23 a 26 con base en la descripción siguiente:

Durante el procesamiento del maíz se obtiene almidón y proteína mediante las siguientes operaciones: primero, se remoja el maíz en agua a una temperatura de 70 °C, durante 1 o 2 días. En seguida, se le añade 0.15% de SO_2 para su fermentación, posteriormente el grano húmedo se tritura para obtener una suspensión que contiene gérmenes, salvado, almidón y gluten. El germen se separa de la pasta líquida mediante separadores neumáticos (ciclones) para líquidos. Los gérmenes lavados y secos pasan al proceso de extracción del aceite de maíz. Mediante una molienda y un tamizado que se repite varias veces, el salvado se separa de las demás fibras. El resto de la pasta líquida contiene de 5 a 8% en peso de proteína, la cual se concentra separándose el almidón más denso del gluten y el primero se filtra, se lava y se seca. El gluten se seca y se utiliza en la elaboración de alimentos para el ganado.

23. ¿Cuáles son las materias primas en el proceso antes descrito? Clasifíquelas de acuerdo con su composición y origen.
24. Mencione cuál es el producto, el subproducto y los desechos del proceso.
25. Identifique las operaciones unitarias y los procesos unitarios que se llevan a cabo en este proceso de producción.
26. Elabore el diagrama de bloque en donde se distinga la secuencia del proceso de producción.

Identifique lo que se pide en las preguntas 27 a 33 en el siguiente proceso industrial (véase figura 1.12):

27. Materias primas.
28. Clasifique las materias primas.
29. Servicios.
30. Productos obtenidos.
31. Subproductos y sus aplicaciones.
32. Procesos físicos y procesos químicos.
33. Conceptos de cada término de los incisos.

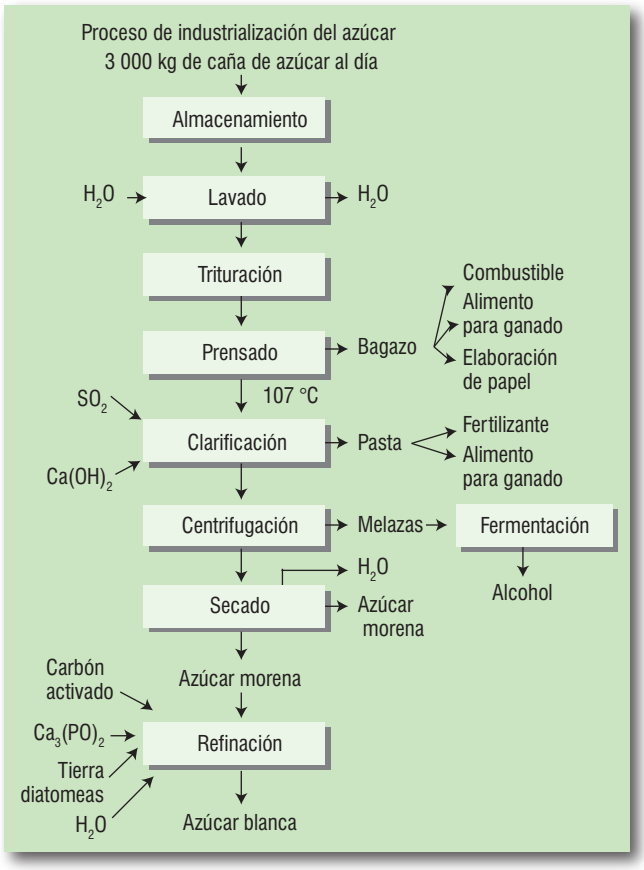


Figura 1.12 *Proceso de industrialización del azúcar.*

1.7 Cuestionario

Conteste correctamente las siguientes preguntas:

1. Al conjunto de conocimientos ciertos de las cosas por sus principios y causas se le conoce como: _____

2. La planta _____ está constituida por instalaciones y equipo de menor capacidad que la planta productiva.

3. La _____ de la industria es fundamental como la ciencia, ya que una de las finalidades de la industria es obtener el producto al mínimo costo posible con la máxima eficiencia.

4. Un proceso _____ consiste en operaciones mecánicas sobre las materias, que pueden cambiar su estado físico, pero no alterar sus propiedades físicas ni químicas.

5. Un proceso _____ consiste en reacciones químicas que se efectúan con las materias primas y cambian las propiedades físicas y químicas de las sustancias.

6. Un ejemplo de proceso _____ es la fermentación.

7. Producto _____ es aquél al que se ha elevado la calidad y es aceptado por el laboratorio de control de calidad.

8. Un _____ también es llamado producto secundario.

9. La planta química _____ es la fábrica en donde se llevan a cabo los procesos físicos, químicos y fisicoquímicos para transformar la materia en producto terminado.

10. El laboratorio analítico de control de _____ vigila la aceptación de las materias primas y la salida del producto terminado.

11. El producto _____ es la sustancia fabricada en la planta productiva que ha sido aceptado por el laboratorio de control de calidad.

12. La _____ es el conjunto de conocimientos propios de una industria en particular.

13. La _____ está constituida por los diferentes niveles del organigrama de la empresa, para ejecutar, planear, modificar y ampliar las políticas productivas de la empresa.

14. La _____ industrial optimiza el uso de materias primas, lo cual influye en su inventario.

15. La técnica _____ la constituyen las operaciones efectuadas en un orden lógico para obtener un producto.

16. _____ fisicoquímicos son operaciones combinadas de manipulaciones físicas y reacciones químicas.

17. En el diagrama _____ de una industria, se muestran las relaciones que existen entre las áreas de la empresa, la organización y los recursos con los que cuenta ésta.

18. Las materias primas _____ son de origen mineral o son reactivos químicos.

19. El _____ rechazado es aquél que no cumple con lo especificado por las normas oficiales y que puede ser recuperado elevando su calidad.

20. La materia _____ es toda aquella sustancia que entra como constituyente directo o indirecto del producto terminado.

1.8 Actividad propuesta

Encuentre las respuestas correctas del cuestionario anterior en la siguiente sopa de letras.

M	P	R	I	M	A	Z	F	R	T	E	C	N	O	L	O	G	I	A
A	R	C	A	N	G	C	I	E	N	C	I	A	C	R	O	A	T	A
T	O	E	S	A	R	T	N	I	P	R	E	S	P	I	R	E	M	O
E	R	L	O	T	Y	O	A	T	O	I	X	O	S	E	C	O	R	P
R	R	A	T	H	R	K	L	R	O	L	L	O	W	C	C	C	P	E
I	E	U	C	N	W	P	I	T	O	M	T	O	L	O	R	E	S	R
N	S	T	U	K	K	J	U	U	R	T	Y	U	T	N	E	C	X	A
G	I	P	D	L	U	U	J	N	N	R	R	Q	A	O	Y	A	O	C
E	D	E	O	I	Y	D	O	C	I	M	I	U	Q	M	Y	L	T	I
N	A	C	R	R	W	E	V	I	J	T	T	R	F	I	S	I	C	O
I	L	N	P	A	C	E	R	G	H	L	A	T	R	A	T	D	U	N
E	K	O	B	S	I	A	C	I	N	A	G	R	O	N	I	A	D	A
R	E	C	U	P	E	R	A	D	O	C	I	M	I	R	T	D	O	L
I	L	I	S	O	P	L	Ñ	Y	M	P	U	I	W	O	S	T	R	L
A	D	M	I	N	I	S	T	R	A	C	I	O	N	T	N	Q	P	O

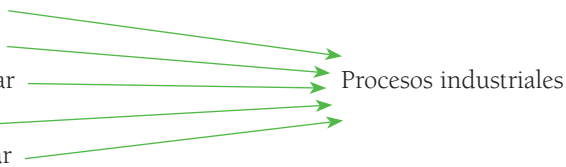
1.9 Resumen

La transformación de los recursos en sustancias o materiales útiles constituye la esencia de la empresa industrial; la capacidad de transformación es una de las características más importantes del hombre, esto lo diferencia respecto a los otros animales. La obtención de productos a partir de materias primas es el objetivo de la tecnología y de los procesos químicos industriales.

El proceso industrial es la secuencia de operaciones y procesos unitarios que permiten transformar las materias primas en un producto útil.

Para los ingenieros industriales los procesos industriales adquieren gran importancia debido a que en la práctica de esta carrera se requiere:

- Planear
- Integrar
- Organizar
- Dirigir
- Controlar



Estas actividades permiten a los ingenieros industriales lograr sus objetivos en el ejercicio de su profesión, puesto que este profesionista debe considerar los procesos de producción como una herramienta para:

- El diseño y la definición de planes, programas y proyectos.
- El diseño, la integración, la organización, la dirección y el control de sistemas.
- La optimización del trabajo.
- La evaluación de los resultados.
- El establecimiento de normas de calidad.
- El aumento y el control de la eficiencia, entre otras actividades realizadas por este profesionista dentro de la industria.

Los procesos industriales presentan características especiales en nuestra cultura y economía; las plantas de producción de las que forman parte son dinámicas, crecientes y muy competitivas, y están basadas en el capital y la mano de obra. En este capítulo se planteó una descripción cualitativa de los procesos industriales, incluyendo la descripción de los elementos esenciales que conforman un proceso a nivel industrial, su importancia y características generales. Estas últimas dan origen a un modelo gráfico que contiene las áreas básicas en un proceso industrial.

1.10 Tema de actualidad

"…Me llaman la tequilera, como si fuera nombre de pila, porque a mí me bautizaron con un trago de tequila…"
(Canción *La tequilera,* de Alfredo D´Orsay Sotelo).

AL HABLAR DE CUALQUIER MERCADO, solemos referirnos a los consumidores como aquellos que pagan un precio a cambio de un producto o servicio. Sin embargo, en sentido ortodoxo, el mercado es el lugar físico o imaginario donde concurren compradores y vendedores para efectuar una transacción. Por tanto, cuando se hable de mercado, hay que considerar incluir tanto a oferentes como a demandantes, y para efectuar cualquier análisis de mercado no basta con

investigar a los consumidores o compradores, hay que estudiar también el lado de la oferta y el tipo de relación que se da entre éstos. El modelo de las cinco fuerzas de Michael E. Porter que ayuda a entender cómo está conformada la estructura de una industria. Sin embargo, este análisis es muy simple y no es suficiente, porque sólo da una visión parcial e incompleta de la industria del tequila: el análisis que se estudió sólo explica las relaciones del productor de tequila con el consumidor; sin embargo hay otras relaciones tan importantes para el sector que se convierten en relaciones estratégicas. ¿Cómo se puede abordar este análisis?

El primer paso que debe considerarse es la conformación de la cadena productiva, es decir, establecer cuáles son los insumos, los procesos y las ramas que intervienen en todo el proceso, desde las materias primas hasta el producto final que llega al consumidor. Por supuesto que dependiendo del eslabón que se ocupe en la cadena productiva, va a ser la posición estratégica que se ocupe (como rama industrial) y, por ende, va a sugerir el tipo de estrategia que se utilice. Por lo general, un productor de materias primas tiene menor peso en la cadena que el comerciante que lleva al cliente final el producto o servicio, precisamente por su cercanía con el consumidor. Dicho de otra manera, si el último eslabón de la cadena comete errores, éstos repercuten en toda la cadena, sin que los participantes de los primeros eslabones estén en condiciones de hacer gran cosa por remediarlo.

Pero, ¿cómo se puede analizar esto en la realidad de las industrias, y particularmente en la industria del tequila? Como ya se mencionó, en primer lugar hay que visualizar la cadena productiva. En la figura 1.13 es posible observar, de manera general, la cadena productiva de la industria, aunque posteriormente se analizará con mayor profundidad.

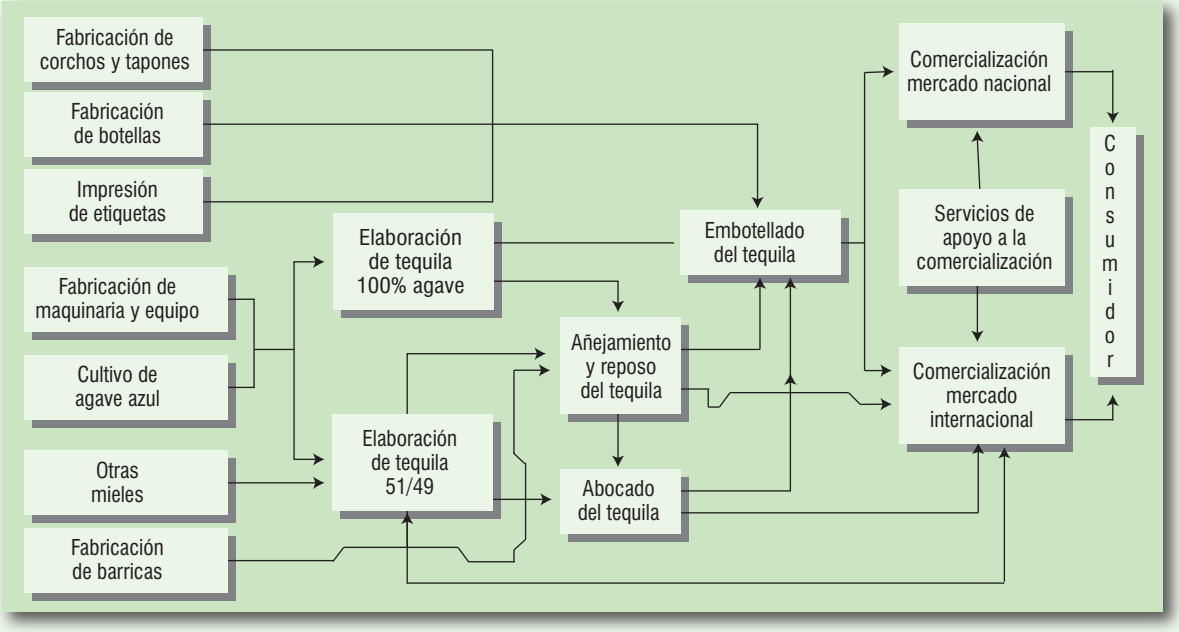


Figura 1.13 *La cadena productiva del tequila.*

Como se puede observar en la figura 1.13, en la cadena productiva del tequila participan muchos agentes económicos que pueden o no pertenecer a la misma empresa, y que por su ubicación en la cadena pueden tener una posición estratégica diferente. Esto significa que aun cuando la industria esté en auge, el valor agregado de la industria puede no llegar a todos los eslabones, o por el contrario, cuando la industria está en recesión, puede haber eslabones que estén en auge. El ejemplo más ilustrativo de lo anterior es la relación existente entre productores de agave y productores de tequila. Durante el auge de la industria, a mediados de la década de 1990, los agricultores no recibían un precio adecuado por sus cosechas, aun cuando la industria estuviera creciendo a ritmos importan-

tes. En la actualidad, a partir del año 2000, la industria ha empezado a caer en una desaceleración y baja en sus ventas; sin embargo, los productores de agave experimentan un auge en sus ingresos, y tal vez es la mejor época en su historia. ¿Por qué sucede esto? La explicación más sencilla puede ser por la ley de la oferta y la demanda; es decir, cuando hay mucha oferta de materia prima, el precio baja, y cuando no hay materia prima el precio sube. Pero la comprensión del fenómeno es mucho más compleja que la que ofrece la ley de la oferta y la demanda, que aunque no pierde su vigencia, supone que al haber más materia prima disponible y más barata, existe más consumo. Este supuesto, como la experiencia lo dice, en ésta y otras industrias, no siempre es válido, la abundancia de materias primas y como consecuencia los precios bajos, no necesariamente conduce a consumos mayores, sobre todo tratándose de las materias primas que se utilizan como insumos para fabricar otro tipo de productos.

Un ejemplo de lo anterior es la situación que vive la industria del azúcar en el país; existe una abundancia de oferta del dulce y, por tanto, precios bajos, lo cual no se ha traducido en que los consumidores finales consuman más azúcar, ni en que las industrias que utilizan los endulzantes como materia prima los consuman más. La explicación en este caso en particular es que los productos sustitutos del azúcar, principalmente la fructuosa, están ejerciendo una fuerza importante sobre la estructura de la industria azucarera, lo que incrementa más la rivalidad existente en la industria y la salida del producto de algunos segmentos del mercado.

Por tanto, la comprensión de la estructura de la industria es importante para entender qué está sucediendo en ésta y, lo que es más importante, pronosticar qué va a suceder en el futuro con un grado de aproximación razonable. Anteriormente se analizó la estructura de la industria tequilera, pero sólo uno de sus eslabones, lo que nos da una idea general y vaga de lo que sucede, pero no profundiza en el análisis. A partir de la cadena productiva, es posible analizarla con el modelo de las cinco fuerzas, pero considerando todas las transacciones comerciales que se dan en la misma, lo que lleva a un análisis exhaustivo de la industria. Primero hay que identificar las transacciones que se dan y el tipo de mercado que se trata. En la figura 1.14 se explica este concepto.

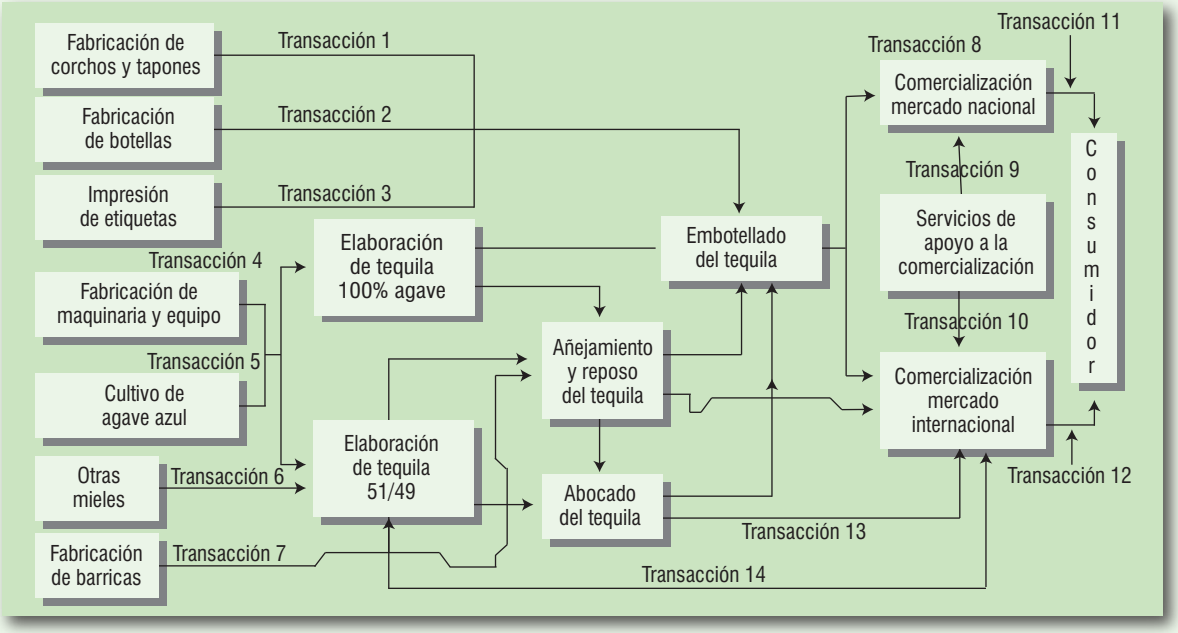


Figura 1.14 *Transacciones comerciales en la cadena productiva del tequila.*

Como podemos observar en la gráfica de la figura 1.14, existen al menos 14 transacciones comerciales a lo largo de la cadena (pueden ser más, dependiendo de la forma de fabricación, distribución, etc.), dichas transacciones

no son iguales, pues cada mercado es diferente y tiene diferentes estructuras y características, por lo que para llegar a conclusiones estratégicas en la industria es necesario distinguir las características de cada una de las transacciones. La tabla 1.6 ilustra algunas de las características específicas de cada mercado.

Tabla 1.6. Características de las transacciones en la cadena productiva del tequila.

Transacción	Proveedor	Cliente	Tipo de mercado
1	Fabricante de corchos y tapones	Embotellador de tequila	Mercadp libre Oligopsonio
2	Fabricante de botellas	Embotellador de tequila	Oligopolio Oligopsonio
3	Impresión de etiquetas	Embotellador de tequila	Mercado libre Oligopsonio
4	Fabricante de maquinaria y equipo	Embotellador de tequila	Mercado libre Oligopsonio
5	Cultivo del agave azul	Fabricante de tequila	Oligopolio Oligopsonio
6	Cultivo de otras mieles	Fabricante de tequila	Mercado libre Oligopsonio
7	Fabricación de barricas	Fabricante de tequila	Mercado libre Oligopsonio
8	Venta en mercado nacional	Distribuidor	Mercado libre Oligopsonio
9	Servicios de apoyo a la comunidad	Comercializador de tequila	Mercado libre Oligopsonio
10	Venta en mercado internacional	Broker o distribuidor	Oligopolio Oligopsonio
11	Venta al consumidor nacional	Consumidor intermedio o final	Mercado libre Mercado libre
12	Venta al consumidor internacional	Consumidor intermedio o final	Mercado libre Mercado libre
13	Venta a granel mercado internacional. Tequila blanco	Comercializador de tequila	Oligopolio Oligopsonio
14	Venta a granel mercado internacional. Tequila abocado, resposado y añejo	Comercializador de tequila	Oligopolio Oligopsonio

El tequila a granel

A continuación se estudia la industria del tequila bajo el esquema del modelo de las cinco fuerzas, incluyendo el tipo de mercado. Este análisis permitirá comprender hacia dónde se dirige el valor creado en toda la cadena productiva. Por supuesto que este análisis es dinámico en el tiempo, es decir, los resultados son diferentes hoy en día de lo que hubieran sido hace tres o cuatro años. Para conocer a fondo la industria, como ya se había mencionado, es necesario hacer el análisis en cada una de las transacciones. En esta sección se analizarán las transacciones que se dan entre los agaveros y los productores, entre los productores y los mayoristas en el mercado internacional, entre este tipo de mayoristas y sus distribuidores minoristas y entre los minoristas y los consumidores, es decir, la ruta del tequila a granel. Por supuesto, también habrá que analizar las diferentes rutas de la cadena productiva e incluir a

todos los proveedores (botellas, corrugado, maquinaria, etc.) para obtener un análisis exhaustivo. En la figura 1.15 se observa el diagrama de la ruta que se debe analizar.

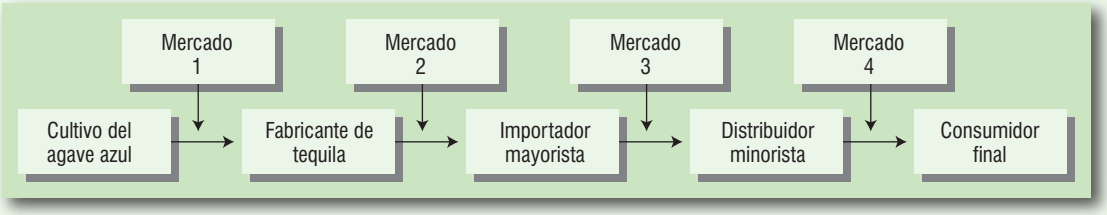


Figura 1.15 *Transacciones a analizar de la cadena productiva.*

En cada uno de los mercados hay proveedores, una rama industrial y clientes; a su vez, cada rama industrial tiene sus propias barreras de entrada y sus productos sustitutos. Cada uno de los cuatro mercados tiene características diferentes, por lo que se puede analizar la estructura de cada uno bajo la óptica del modelo de las cinco fuerzas. En la figura 1.16 se puede ver este diagrama.

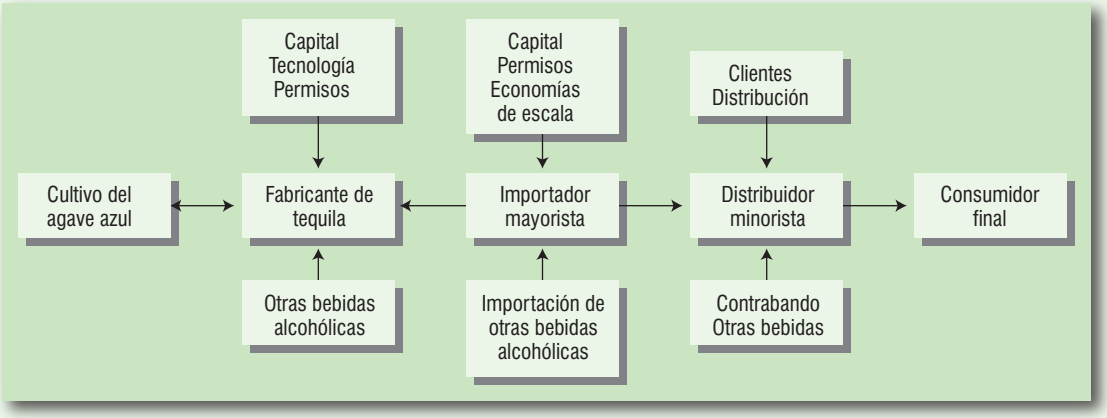


Figura 1.16 *El modelo de las cinco fuerzas aplicado a la cadena productiva del tequila.*

De esta forma, existen tres diferentes modelos de las cinco fuerzas, los cuales se analizarán en este segmento de la industria tequilera: el primero tiene como proveedor a los productores de agave, como compradores a los importadores mayoristas, como barreras a la entrada de capital, la tecnología y los permisos de las autoridades, incluyendo el CRT (Consejo Regulador del Tequila), y como productos sustitutos las otras bebidas alcohólicas. Si se observa la dirección de las flechas, se descubre que todas se dirigen a los productores de tequila, excepto la de los proveedores de agave, que se dirige hacia las dos direcciones. ¿Qué significa esto? Que la rivalidad en la producción de tequila para exportación es alta; por lo cual, los productores de tequila pasan una parte importante de su valor agregado a los otros participantes.

A continuación se analizará paso a paso la relación entre los proveedores de agave y los productores de tequila, que es un tanto extraña. Dependiendo de las circunstancias, los proveedores tienen un alto poder de negociación sobre los productores; en otras circunstancias sucede lo contrario. Esto tiene como consecuencia la gran variación de precios de la materia prima. Los proveedores de agave tienen una tendencia a ser un oligopolio (pocos productores que influyen sobre las condiciones de venta) y los productores de tequila tienden a ser un oligopsonio (pocos compradores que influyen en las condiciones de venta). Este problema estructural es poco común. Pero, ¿qué soluciones plantean las diferentes corrientes económicas? La corriente neoliberal afirmaría que lo mejor sería

dejar la solución al mercado, a la ley de la oferta y la demanda, y que el precio se fije de acuerdo con ésta. Los neokeynesianos pedirían que el gobierno interviniera regulando de alguna manera la formación de oligopolios y oligopsonios, para que el mercado fuera más transparente, inclusive propondrían algún tipo de subsidio. Por su parte, los centralistas afirmarían que el precio se fijara de acuerdo con los costos de producción.

Pero la realidad rebasa cualquiera de las tres soluciones. En la primera, prevalecería un problema que ha estado vigente en la industria: al no haber cierto grado de certidumbre en esta relación, cómo se podría convencer a los productores de agave para que siembren, dado que al paso de ocho años nadie les puede garantizar un precio justo, y cómo se podría convencer a los productores de tequila que dentro de ocho años paguen a los productores de agave un precio justo, si no conocen cuál va a ser la disponibilidad de agave y la demanda del tequila. En resumen, la solución neoliberal impide la planeación a largo plazo de la industria, ya que cada uno de los agentes tendrá que velar por sus propios intereses en un corto plazo; pero, por sus características la industria es de largo plazo.

La solución neokeynesiana, la cual propone que el gobierno intervenga para impedir los oligopolios y los oligopsonios, o que grave la bebida y subsidie la siembra en tiempos de bajos precios o desgrave la bebida y grave la producción de agave en tiempos de altos precios, alteraría de una manera importante la estructura de costos de toda la cadena, lo cual dificultaría su desarrollo en el largo plazo y, por otro lado, obligaría a reformar la NOM (Norma Oficial Mexicana) para impedir la formación de oligopolios y oligopsonios y fomentar una competencia más equitativa, esto significa relajar la política de entradas y salidas de la industria, tanto del agave como del tequila. Con esto, se correría el riesgo de perder la denominación de origen, en el peor de los casos o, en el mejor, que el tequila pasara a ser una bebida que se pudiera fabricar en cualquier parte del país, con la consiguiente pérdida de calidad, control, prestigio, posicionamiento en el mercado, etcétera.

Por último, la solución centralista se apartaría de toda realidad del mercado, pues tal vez restaría valor y utilidades a los productores nacionales y los pasaría a los distribuidores internacionales, que no lo pueden controlar. Aunque podrían gravarse las importaciones, nadie puede garantizar que el tequila que sale a granel se embotelle como se exporta. Como se observa, el problema es complejo y la solución no es fácil, pero se continuará con el análisis de la cadena hasta el final.

En el segundo eslabón de esta cadena productiva se tiene como proveedor al fabricante de tequila, como industria a los importadores mayoristas, como compradores a los distribuidores minoristas (en este paso se incluye el embotellado, para simplificar el análisis), como barreras de entrada, el capital, los permisos de corresponsabilidad y las economías de escala y, finalmente, como sustitutos a la importación de otras bebidas alcohólicas. Si se observan otra vez con detenimiento las flechas, se ve que todas éstas se dirigen a presionar a los importadores, excepto la de los fabricantes de tequila. Esto se interpreta como que las fuerzas de compradores, las barreras de entrada y los sustitutos le pueden quitar parte del valor agregado a los importadores; sin embargo, éstos pueden pasar la factura a los fabricantes de tequila comprando a precios bajos. En esta relación, los productores de tequila pierden su condición de oligopsonio, ya que compiten con otras bebidas y los importadores se constituyen como un oligopolio, ya que 80% de las marcas de tequilas que se comercializan en el mundo sólo están manejadas por 10 empresas, las cuales son dueñas de las marcas o tienen intereses en la producción de tequila, por lo que el poder de negociación lo tienen estas empresas.

Finalmente, en la última relación, la que tiene como proveedor al importador mayorista, la rivalidad se da en la distribución minorista; en ésta los compradores son los consumidores finales, las barreras de entrada son el capital, los clientes y la red de distribución y los sustitutos, el contrabando de bebidas alcohólicas y otro tipo de bebidas alcohólicas, esta relación tiende a ser más un mercado libre, donde la fuerza importante la ejercen los importadores mayoristas sobre los minoristas, pero éstos tienen la posibilidad de recuperar el valor perdido de los compradores, en este caso el consumidor final, vía precios de venta altos.

Si se analizan cada uno de los eslabones, quedarán al descubierto problemas estructurales difíciles de solucionar por las empresas de forma individual, por lo que se necesita la concurrencia de otros agentes económicos,

como el gobierno, la Cámara Nacional de la Industria del Tequila (CNIT), las universidades, etc., y problemas de relación que sí pueden solucionar las empresas en lo individual con una estrategia adecuada. Estos problemas son: la relación productores de agave-productores de tequila; la relación productores de tequila-importadores y la relación importadores de tequila-minoristas. ¿Cómo se pueden resolver estos problemas para que el valor agregado de la industria se reparta en toda la cadena?

El problema estructural es el más difícil de resolver porque implica la concurrencia de muchos agentes económicos, además de la participación de agaveros y tequileros. Si la solución de las corrientes económicas tradicionales no beneficia a la industria, ¿qué se puede hacer? Michael E. Porter propone la formación de *clusters* o asociaciones empresariales con un objetivo común: el desarrollo de la industria.

Los *clusters* son concentraciones geográficas de empresas e instituciones interconectadas en un sector en particular. Los *clusters* pueden abarcar una serie de industrias y otras entidades asociadas importantes en la competencia por un mercado. Estas alianzas promueven la competencia y la cooperación. Los participantes rivales compiten para ganar y retener a sus clientes de una forma intensa. Sin una competencia vigorosa, el *cluster* no prosperará. Paradójicamente, las ventajas competitivas en una economía global nacen más en el conocimiento local, en las relaciones y en la motivación, que los competidores distantes no pueden igualar.

Formar parte de un *cluster* permite a las empresas operar más productivamente, teniendo acceso a materias primas, información, tecnología y a otras instituciones que se coordinan con las empresas relacionadas, midiendo y motivando mejoras en las empresas. En muchos casos, estas alianzas son también una buena alternativa para la integración vertical.

Los *clusters* afectan la competencia de tres maneras:

1. Incrementan la productividad de las empresas asociadas.
2. Direccionan la innovación, la cual apuntala el crecimiento de la productividad futura.
3. Estimulan la formación de nuevos negocios que extienden y fortalecen la propia alianza.

La mejora sustancial en la productividad es posible, pero sólo si varios integrantes del *cluster* cambian simultáneamente. Las empresas que forman parte de un *cluster* tienen conocimiento profundo de los costos de sus proveedores. Además de reforzar la productividad, estas asociaciones juegan un papel vital en la habilidad de una empresa por innovar. La complejidad con que las empresas compiten en una situación particular es influenciada fuertemente por la calidad del ambiente local. Las empresas no pueden emplear técnicas logísticas avanzadas, por ejemplo, sin una infraestructura de transporte de alta calidad.

Las empresas asociadas en una alianza pueden percibir los nichos de mercado para sus productos y servicios más fácilmente, además de que alrededor de éstos se pueden desarrollar nuevos negocios. El resultado es que las empresas asociadas en la alianza aventajan a los competidores en otras localidades. Las alianzas también se pueden desarrollar apoyándose en la demanda local sofisticada o fuerte.

La existencia de industrias proveedoras, de industrias relacionadas o incluso de otras alianzas relacionadas, son la semilla para los *clusters*. Estas alianzas evolucionan continuamente con el surgimiento de industrias y compañías nuevas y cuando las locales se desarrollan y cambian. Sin embargo, para justificar los esfuerzos de desarrollo de una alianza, las empresas interesadas deben haber pasado ya una prueba de mercado.

Un ejemplo claro de un *cluster* de competencia-colaboración se puede observar en la figura 1.17: el *cluster* del vino en California.

Como se puede observar en la figura 1.17, existe una gran infraestructura y muchos agentes económicos participantes para apoyar dos industrias: los cultivadores de uva y los fabricantes de vino, además de que existe una interrelación estrecha entre estos dos. Algo parecido se podría hacer en la cadena productiva del tequila.

En este caso, el principal problema que se debe solucionar es el rompimiento de la relación oligopolio/oligopsonio, que se da entre los productores de agave y los fabricantes de tequila. Los dos agentes económicos deben

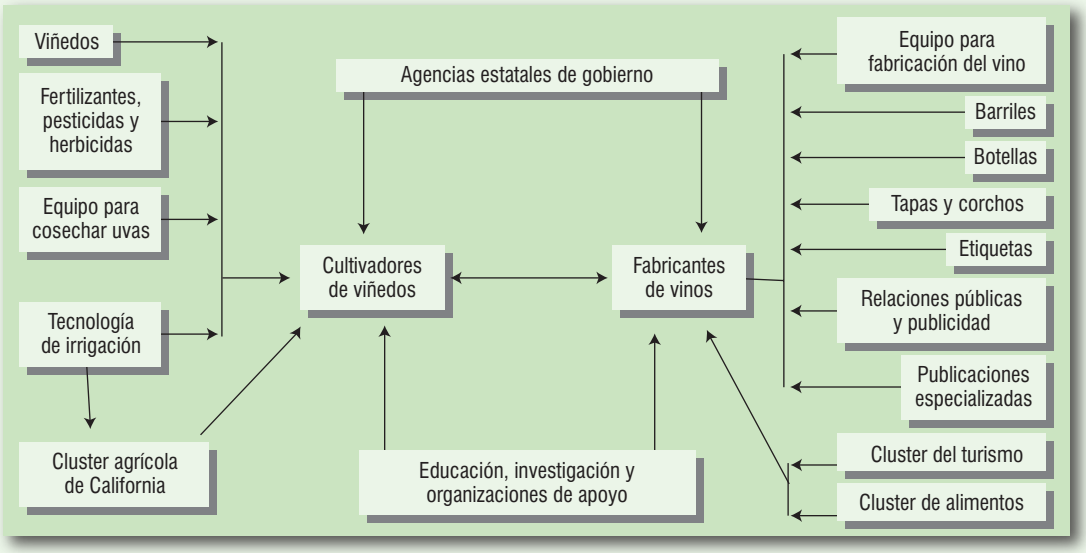


Figura 1.17 *El cluster del vino en California.*

tener soluciones a sus respectivos intereses a corto, mediano y largo plazo. La buena voluntad o la firma de convenios no es suficiente. Una propuesta que podría resultar interesante es la creación de un mercado de futuros del agave, tal como sucede con otras materias primas. Con este instrumento, la incertidumbre bajaría muchísimo y tanto productores de agave como fabricantes de tequila podrían planear a largo plazo.

El segundo problema que ya se había mencionado: la relación productores de tequila/importadores y la relación importadores de tequila/minoristas, se podría solucionar con una estrategia adecuada y muy simple en apariencia: que los fabricantes de tequila tomen en sus manos la comercialización del tequila en los mercados extranjeros o que los importadores no tengan conflictos de intereses, como fabricar o vender otro tipo de bebidas. Esta solución, por supuesto, afecta a algunos productores en un corto plazo. No es fácil montar una infraestructura de comercialización en los mercados extranjeros con todo lo que esto implica: registro y posicionamiento de marcas, logística de distribución, servicio al cliente, etc., en resumen, hacer todas las funciones de mercadotecnia y no dejárselas a otros. El camino es largo y difícil, pero hay que dar el primer paso para alcanzar la meta, y el registro y el posicionamiento de marcas podría ser el inicio, contando por supuesto con la concurrencia de todos los participantes.

José Luis Orozco Martínez

1.11 Bibliografía

Figuera P., *Optimización de Productos y Procesos Industriales*, Editorial Gestión 2000, 2006.

Mc Cabe W., Smith J., Harriot P., *Unit Operations of Chemical Engineering*, McGraw-Hill, New York, 2004.

Mc Cabe W. L., Smith J. L., Harriot P., *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química,* McGraw-Hill, México, 2002.

Peters M. P., Timmerhaus K. D., West R. E., y Peters M., *Plant Design and Economics for Chemical Engineers,* McGraw-Hill, New York, 2002.

Treybal R. E., *Operaciones de Transferencia de Masa,* McGraw-Hill Interamericana Editores, México, 1988.

Capítulo

2

Sistemas de unidades y sistema internacional de unidades

"Si puede usted medir de lo que habla y expresarlo con un número, sabe algo de su tema, pero si no puede medirlo, sus conocimientos son de una especie pobre y muy poco satisfactorios". Lord Kelvin *(Jupiter Images Corporation)*

2.1 Antecedentes generales

Las primeras experiencias de medir las tuvo el hombre primitivo con las nociones: cerca-lejos, rápido-lento, liviano-pesado, claro-oscuro, duro-suave, frío-caliente y silencio-ruido. Originalmente estas percepciones fueron individuales, pero con las experiencias y la vida

en común surgieron las comparaciones entre las personas; así, después del paso de algunos milenios se han desarrollado bases de comparación generalmente aceptadas. Con la revolución científica de los siglos XVII y XVIII se introdujo un cambio radical y muy poco gradual en la diversificación de las escalas de magnitudes necesarias para expresar atributos de las nuevas propiedades que se estaban descubriendo.

El uso y la comprensión de las magnitudes es parte de la formación cultural, resulta difícil saber en qué momento preciso de la historia el ser humano empezó a medir y contar. Ahora bien, como en otros problemas similares, los antropólogos están generalmente de acuerdo en que este tipo de creaciones culturales surgieron paulatinamente de las necesidades producidas por la adaptación de las comunidades humanas a nuevas condiciones (véase tabla 2.1).

Tabla 2.1. La invención de unidades: algunos sucesos importantes.

Año	Acontecimiento relevante
2130 a. C.	En Mesopotamia se establecen los primeros patrones de medición de longitud (el palmo, la cuarta)
3100 a. C.	Los egipcios implantan patrones de longitud referidos a las partes del cuerpo del faraón (el codo)
Siglo V a. C.	Los griegos también establecen patrones de longitud con base en las dimensiones del cuerpo humano (el pie)
Siglo VIII	Carlomagno establece la unidad "pie de rey", equivalente a 325 mm
1100	La yarda inglesa, conocida como la distancia comprendida entre la punta de la nariz de Enrique I hasta su dedo pulgar
1284	En el reinado de Alfonso X se analizan los instrumentos de la medida del tiempo en el campo de la astronomía
Siglo XVI	Durante el Renacimiento, el desarrollo de ciudades y la necesidad del intercambio comercial generan la necesidad de establecer un sistema concreto de pesos y medidas. Así, aparecen la ulna y la pulgada, que son unidades de longitud
1668	La toesa se establece como patrón de longitud (formado por una barra de hierro empotrada en el exterior de un muro del Gran Chatelet de París)
1680	Abbot Gabriel Mouton se considera el precursor del sistema métrico decimal
1776	Francia adopta como el patrón legal de longitud la toesa de Perú o toesa de la academia, que sustituye a la toesa del Chatelet
1790	La Academia Francesa de Ciencias definió el sistema métrico decimal como el sistema unificado de medidas
1793	Lenoir elabora los patrones de longitud en cobre
1795	Se crea el patrón de longitud en platino y se establece la unidad de tiempo
1840	Se establece por ley el sistema métrico decimal (Francia)
1958	El Comité Internacional de Pesas y Medidas de París acuerda establecer un conjunto más amplio de prefijos, separados por intervalos de tres órdenes de magnitud
1960	En la XI Conférence Générale des Poids et Mesures se abolió la antigua definición de metro, se adopta definitivamente el nombre de Sistema Internacional de Unidades
1962	Se agregan los prefijos *fento*, que representa un milmillonésimo (10^{-15}), y *ato,* que equivale a un trillonésimo (10^{-18}), ambos prefijos provienen de las palabras danesas femto ("quince") y atto ("dieciocho")
1975	El Congreso de Estados Unidos de América aprueba una ley que establece una política de conversión al sistema métrico y crean la U.S. Metric Board
1983	En la XVII Conférence Générale des Poids et Mesures se promulgó la nueva definición de metro
1991	Extensión de prefijos en el SI en la XIX Conferencia General de Pesas y Medidas
2001	Se realiza la "decimalización" de las fracciones en Estados Unidos de América

En algún momento de la transición del Paleolítico al Neolítico se puede suponer que las actividades humanas se centraron en el conteo de animales domesticados, en la práctica de la agricultura; la proporción por tanteo de recursos naturales se empleaba regularmente en la elaboración de mezclas (para pócimas de curación, alimentos y otros), pesada de artículos, largo y ancho de terrenos, etc. Estas sencillas premisas desembocaron en el descubrimiento y el uso de los números. Durante mucho tiempo, los números más sencillos permitieron satisfacer las necesidades humanas, y en la medida en que éstas fueron aumentando y diversificándose, también lo hicieron las escalas y las magnitudes representadas por ellos.

En los siglos XVI y XVII, cuando el desarrollo de las ciencias comenzó a cobrar ímpetu, la comunidad científica empezó a establecer la necesidad de cuantificar y comprobar las operaciones y los ensayos realizados.

La propiedad de cantidad, como resultado en la medición de los experimentos controlados, condujo a la aparición de una serie de instrumentos de medición para llegar a la concepción científica de unidad de medida, de tal manera que fuera posible medir la propiedad de un cuerpo o una sustancia, es decir, su magnitud.

Una unidad física sólo se puede medir comparándola con otra de su misma naturaleza. Si se define una cantidad precisa de una magnitud física como unidad, o sea como valor de referencia, cualquier cantidad física de la misma clase puede compararse con ésta, de esta forma se podrá definir su valor, expresándolo con el número que indique la relación de la cantidad medida a la unidad, esto es, el número de veces que la unidad cabe en esa cantidad y agregando el nombre o el símbolo de la unidad.

Hacer una medición es comparar lo desconocido con lo conocido, por ejemplo, al pesar diferentes materiales éstos son comparados con un peso estándar; en el sistema internacional, el peso estándar es 1 kg. El resultado de la comparación es expresado en términos de múltiplos de la cantidad conocida; como consecuencia, se obtendrán materiales con pesos de, por ejemplo, 3 kg, 4 kg, 0,5 kg, 1,5 kg, etcétera.

Es evidente que hay una infinidad de valores que se pueden tomar como unidad para cualquier magnitud física, por lo cual una regla que rige en todo sistema de unidades es que todas las unidades posibles de la misma magnitud física deben estar relacionadas por factores puramente numéricos. La unidad general de una magnitud física se define como su dimensión.

De acuerdo con lo anterior, existen tantas dimensiones como magnitudes físicas, pero según el concepto de los sistemas dimensionales, se puede afirmar que sólo mediante algunas dimensiones fundamentales se pueden expresar todas las magnitudes físicas en unidades generales. De igual manera, el concepto de unidad fundamental permite expresar todas las demás unidades de un sistema en función de las unidades básicas.

Con base en un sistema dimensional apropiado, se puede desarrollar un sistema de unidades, escogiendo para cada dimensión fundamental del sistema una unidad específica relacionada en forma conveniente a un patrón o estándar. A estas unidades se les llama unidades fundamentales, mientras que las magnitudes físicas respectivas se conocen como magnitudes fundamentales. Una magnitud es fundamental o derivada por acuerdo de la comunidad científica.

Al elegir las unidades fundamentales, una para cada dimensión y magnitud fundamental, se pueden expresar todas las demás magnitudes físicas en función de las magnitudes fundamentales y sus unidades. Al desarrollarse los sistemas métricos de unidades, se dio por llamar sistema absoluto a aquel que tuviera como una de sus magnitudes fundamentales la masa, y sistema técnico al que tuviera el peso como una de sus magnitudes fundamentales.

Los primeros sistemas métricos que se desarrollaron estaban orientados a la mecánica y al calor, por tanto, puede decirse que éstos eran incompletos. Posteriormente, estos

sistemas sirvieron como base a los sistemas completos y por último al Sistema Internacional (SI), dichos sistemas son: CGS absoluto, MKS absoluto, también conocido como Sistema Métrico Decimal de Unidades Físicas, MTS absoluto y MKS técnico, cuyos nombres se derivan de las letras iniciales de las tres unidades: longitud, masa y tiempo (véase tabla 2.2).

El Sistema Cegesimal de Unidades o Sistema Gausiano (CGS) es casi idéntico al SI; la principal diferencia entre estos dos sistemas es que en éste se emplean los gramos (g) y los centímetros (cm), en lugar del kilogramo (kg) y el metro (m), como unidades de masa y longitud.

Para el sistema americano de ingeniería, las unidades fundamentales son el pie (ft) para la longitud, la libra masa (lbm) para la masa y el segundo (s) para el tiempo. Este sistema plantea dos dificultades importantes: la primera son sus factores de conversión, los cuales, a diferencia de aquellos de los sistemas métricos, no son múltiplos de 10, y la segunda se refiere a la unidad de fuerza.

Tabla 2.2. Sistema de unidades comunes.

	Longitud	Masa	Tiempo	Fuerza	Energía	Temperatura	Observaciones
Sistemas absolutos (dinámicos)							
CGS	centímetro	gramo	segundo	dina*	erg, joule	K, °C	Anteriormente, científico común
FPS	pie	libra	segundo	poundal*	pie-poundal	R, °F	
SI	metro	kilogramo	segundo	Newton*	joule*	K, °C	Unidades adoptadas internacionalmente para uso común y científico
Sistemas gravitacionales							
Británico de ingeniería	pie	slug*	segundo	libra peso	BTU ft lbf	R, °F	
Americano de ingeniería	pie	libra masa (lbm)	segundo, hora	libra fuerza (lbf)	BTU hp h	R, °F	Usado por ingenieros mecánicos, químicos y petroleros

* Unidad derivada a partir de unidades básicas.

La razón por la cual se ha seleccionado al metro, al kilogramo y al segundo como unidades básicas de longitud, masa y tiempo (MKS) en lugar de, por ejemplo, centímetro, gramo y segundo (CGS), es porque la unidad de trabajo (masa × aceleración × distancia) es el joule (kg m^2 s^{-2}), unidad más adecuada que el ergio (g cm^2 s^{-2} = 10^{-7} joule).

Como se puede observar, estos sistemas tienen sólo tres unidades fundamentales que corresponden a igual cantidad de magnitudes principales; con tres unidades no es posible derivar todas las unidades necesarias para abarcar el amplio campo de la ciencia.

Hasta antes de la adopción general del SI, se usaban 11 sistemas completos de unidades.

Es importante destacar que conviene que las unidades cumplan las siguientes condiciones:

- La unidad debe ser constante, no debe cambiar con el tiempo ni depender de quien realice la medida.

- Debe ser universal; es decir, debe ser utilizada por todos.
- Debe ser fácil de reproducir, aunque a veces, esta facilidad vaya en detrimento de la exactitud.

Aquí se debe hacer una pausa para explicar el concepto de patrón, que originalmente se concebía como una representación física o materialización confiable de la unidad, bajo un conjunto de condiciones claramente definidas para asegurar que el patrón no cambiara por motivo de variaciones, de condiciones como la temperatura, la humedad, la presión atmosférica, etc., que no se empleaba directamente para hacer mediciones, éste es el punto de referencia para construir y utilizar instrumentos de medición. En la actualidad, y dado que los avances de la ciencia han permitido definiciones más exactas y confiables de las unidades, basadas en constantes físicas universales, patrón se define como:

> Una medida materializada, instrumento de medir, material de referencia o sistema de medición, destinado a definir, realizar, conservar o reproducir una unidad o uno o varios valores conocidos de una magnitud, a fin de transmitirlos por comparación a otros instrumentos de medir.

El procedimiento de cómo medir para obtener resultados reproducibles también es importante, y de hecho existen instrucciones precisas sobre cómo hacer la acción, qué unidades emplear y qué patrón utilizar.

En el mundo real, la forma de medir obedece a las siguientes consideraciones:

1. Decidir qué se mide.
2. Seleccionar la unidad acorde a la medida.
3. Seleccionar el instrumento de medición (calibrado).
4. Aplicar el procedimiento establecido.

En resumen, se puede decir que el concepto de medición está asociado con una serie de preguntas que hacen uso del análisis de sistemas, las cuales pueden relacionarse con el concepto de medir:

- ¿Qué?, se relaciona con comparar o cuantificar una magnitud con una unidad.
- ¿Para qué sirve?, para comerciar con volúmenes, masas, reproducir cantidades, etcétera.
- ¿Cómo?, establece una relación de orden cuantificada respecto a una referencia universalmente aceptada.
- ¿Cuándo?, no hay confianza en los datos y ante nuevas situaciones, determinando que no sólo lo que se ve es cuantificable (espectro electromagnético, sonido, luz, moles, etcétera).

2.2 Sistema Internacional de unidades

El año de 1960 marcó el nacimiento del Sistema Internacional de unidades tal como se conoce en la actualidad; este suceso ocurrió en la XI Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) bajo cuya autoridad funciona la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM: Bureau International des Poids et Mesures), la cual se llevó a cabo en Sévres, Francia.

El Sistema Internacional de unidades, universalmente abreviado SI, del francés *Le Système International d´Unitès*, es el moderno sistema métrico de medición más utilizado en la ciencia y en el comercio internacional.

El sistema métrico anterior, MKSA (metro, kilogramo, segundo y ampere), desarrollado por Giovani Giorgi, había logrado ya coherencia entre el metro, el kilogramo-masa, el segundo y las unidades prácticas de electricidad: volt, ampere, joule, watt, ohm, coulomb y henry.

Debido al grado de perfección que había alcanzado Giorgi con dicho sistema, fue elegido para cimentar el Sistema Internacional.

La versión original del Sistema Internacional está cimentada en siete unidades fundamentales y dos suplementarias; además, define 22 unidades derivadas, aunque son muchas más las que se establecen simplemente como consecuencia y por la sola aplicación de las leyes de la física y de los principios del antiguo sistema métrico.

En la definición oficial del SI se citan algunas unidades ajenas al sistema, las cuales no son homogéneas, por lo menos en esta etapa de desarrollo del sistema.

En algunos casos, los científicos que afinaron la presentación original del SI se vieron forzados a respetar la costumbre, como ocurre con las unidades antiguas para los ángulos, el quilate, la hora, el minuto y el watt-hora.

El SI divide en tres clases a las unidades: unidades de base; unidades derivadas y unidades suplementarias, las cuales, en conjunto, forman el sistema de unidades coherentes del SI, además de que se incluyen prefijos para formar múltiplos y submúltiplos decimales.

Entre los organismos de rango internacional que más se han destacado en el estudio de la normalización de unidades y las magnitudes físicas se encuentra la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) y el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM). Asimismo, se han creado organismos no gubernamentales cuyo propósito es la unificación de conceptos y unidades y el desarrollo de disciplinas especializadas (véase tabla 2.3).

Tabla 2.3. Organizaciones no gubernamentales dedicadas a disciplinas específicas de normalización.

Organismo	Siglas
International Union of Pure and Applied Chemistry	IUPAC
International Union of Pure and Applied Physics	IUPAP
International Council for Science	ICSU
International Astronomical Union	IAU
Centro Nacional de Metrología	CENAM
Sistema Interamericano de Metrología	SIM
North American Calibration Committee	NACC
Organización Internacional de Normalización	ISO
Organización Mundial de Comercio	OMC
Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire	CERN

2.3 Unidades básicas y derivadas

El SI tiene una lista de unidades de base definidas en forma absoluta, sin que estén referidas a cualquier otra unidad; las unidades de base son consistentes con la parte del sistema métrico llamado sistema MKS. Como ya se mencionó, el SI cuenta con siete unidades de base: el **metro** para longitud, el **kilogramo** para masa, el **segundo** para tiempo, el **ampere** para corriente eléctrica, el **kelvin** para temperatura, el **mol** para cantidad de sustancia y la **candela** para intensidad de luz (véase tabla 2.4).

Tabla 2.4. Unidades de base del SI.

Nombre	Símbolo	Magnitud física
metro	m	Longitud
kilogramo	kg	Masa
segundo	s	Tiempo
ampere	A	Intensidad de corriente eléctrica
kelvin	K	Temperatura termodinámica
mol	mol	Cantidad de sustancia
candela	cd	Intensidad luminosa

Originalmente, las medidas de base, o fundamentales, recibían este nombre porque se consideraba que éstas eran independientes entre sí y permitían, a su vez, la definición de otras unidades. Los patrones correspondientes eran medidas materializadas que se conservaban en lugares acordados y bajo condiciones determinadas. Los avances científicos y técnicos, así como la disponibilidad de instrumentos de mayor exactitud han dado por resultado que, con excepción del kilogramo, las unidades de base se definan actualmente de diferente forma: con base en experimentos físicos.

Las unidades derivadas se expresan algebraicamente en términos de las unidades de base o de otras unidades derivadas

(incluyendo el radián y el estereorradián). Los símbolos para unidades derivadas son obtenidos a través de operaciones de multiplicación y división. Así, por ejemplo, la unidad derivada de masa molar (masa de un kmol de un átomo o molécula) es el kilogramo por kmol (kg/kmol); o la unidad de fuerza: el newton, es definido como la fuerza que permite acelerar una masa de un kilogramo en un metro por segundo por segundo; esto significa que el newton es igual a un kilogramo metro por segundo cuadrado, así la relación es $N = kg\ m\ s^{-2}$.

Las unidades derivadas del SI incluyen el **radián** y el **estereorradián**, para ángulos planos y sólidos, respectivamente; **newton** para fuerza, **pascal** para presión, **joule** para energía, **watt** para potencia, **grado Celsius** para mediciones cotidianas de temperatura. Por su parte, las unidades para medición de electricidad son **coulomb** (carga), **volt** (potencial), **faraday** (capacitancia), **ohm** (resistencia) y **siemens** (conductancia); las unidades para medir el magnetismo son **weber** (flujo magnético), **tesla** (densidad de flujo magnético) y **henry** (inductancia), **lumen** para flujo luminoso, **lux** para iluminación, **hertz** para frecuencia, **becquerel** para índices de radiactividad y otros eventos aleatorios, **gray** y **sievert** para dosis de radiación y **katal**, que es una unidad de actividad catalítica usada en bioquímica. Estas unidades derivadas del SI, además de nombres especiales, poseen símbolos exclusivos (véase tabla 2.5). Por otra parte, en la tabla 2.6 se pueden observar las magnitudes derivadas más utilizadas, junto con sus unidades del SI y sus símbolos.

Tabla 2.5. Unidades derivadas del SI con nombres y símbolos.

Cantidad derivada	Unidades derivadas del SI			
	Nombre	Símbolo	Expresión en términos de otras unidades del SI	Expresión en términos de unidades de base del SI
Ángulo plano	radián*	rad		$m\ m^{-1}$ –l
Ángulo sólido	estereorradián*	sr		$m^2\ m^{-2}$ –l
Frecuencia	hertz	Hz		s^{-1}
Fuerza	newton	N		$m\ kg\ s^{-2}$
Presión	pascal	Pa	N/m^2	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
Energía, trabajo, cantidad de calor	joule	J	N m	$m^2\ kg\ s^{-3}$
Potencia, carga eléctrica	watt	W	J/s	
Cantidad de electricidad, potencial eléctrico	coulomb	C		s A
Diferencia de potencial	volt	V	W/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
Capacitancia	farad	F	C/V	$m^{-2}\ kg^{-1}s^4\ A^2$
Resistencia eléctrica	ohm	Ω	V/A	$m^2\ kg^{-}\ s^{-3}\ A^{-2}$
Conductancia eléctrica	siemens	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
Flujo magnético	weber	Wb	V s	$m^2\ kg^{-}\ s^{-2}\ A^{-1}$
Densidad de flujo magnético	tesla	T	Wb/m^2	$kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
Inductancia	henry	H	Wb/A	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
Temperatura Celsius	grados Celsius	°C		K
Flujo luminoso	lumen	lm	cd sr	$cd^*\ sr^*$
Iluminación	lux	lx	lm/m^2	m^{-2} cd sr
Intensidad luminosa	candela	cd	lm/sr	

* El radián y el estereorradián no son consideradas como unidades de base.

Tabla 2.6. Magnitudes derivadas más usadas.

Definición	Magnitud	Unidad	Símbolo
$S = L^2$	Superficie	metro cuadrado	m^2
$V = L^3$	Volumen	metro cúbico	m^3
$d = m/V$	Densidad	kg/metro cúbico	kg/m^3
$v = s/t$	Velocidad	metro/segundo	m/s
$a = v / t$	Aceleración	metro/segundo cuadrado	m/s^2
$F = m\ a$	Fuerza	newton	$1\ N = 1\ kg\ m/s^2$
$p = F/S$	Presión	pascal	$I\ Pa = 1\ kg\ (m\ s^2)$
$T = F/ S$	Trabajo	joule	$1\ J = 1\ kg\ m^2/s^2$
$P = T/t$	Potencia	vatio (watt)	W

2.4 Múltiplos y submúltiplos de unidades

Para escribir números grandes se multiplican múltiplos de diez, de modo que cien es diez por diez, y se escribe 100; así, mil es diez por diez por diez, y se escribe 1 000; etcétera. El número de ceros que aparece en cada uno de estos números es igual al número de veces que se multiplican los dieces.

Todas las unidades del SI se derivan de unidades fundamentales; las cantidades mayores y más pequeñas se expresan agregando prefijos adecuados a la unidad fundamental, por ejemplo las distancias de las carreteras se expresan en kilómetro, que es exactamente 1 000 m (1×10^3 m).

Los prefijos fueron tomados del griego y del latín de acuerdo con las tablas 2.7a y 2.7b.

Tabla 2.7a. Prefijos básicos utilizados en el SI.

Español	Griego	Latín
Mil	**ch**ilioi	**m**ille
Cien	**h**ecatón	**c**entum
Diez	**d**eka	**d**ecem

Ahora bien, si se reservan los prefijos griegos para las unidades grandes y los latinos para las pequeñas, para el caso de medidas de longitud se tiene:

Tabla 2.7b. Continuación de los prefijos importantes.

Kilómetro*	equivale a	1 000	metros	10^3
Hectómetro		100		10^2
Decámetro		10		10^1
Metro		1		10^0
Decímetro		0,1		10^{-1}
Centímetro		0,01		10^{-2}
Milímetro		0,001		10^{-3}

* El sonido griego *ch* corresponde al sonido gutural de la *ch* alemana. Como los franceses, que inventaron el sistema métrico decimal, no tenían ningún sonido semejante en su idioma emplearon la **k** como sustituto más aproximado.

Al hacer que todos los submúltiplos varíen según potencias de diez, se hace muy fácil convertir una unidad en otra (debido a que nuestro sistema de numeración es decimal). Además, una vez memorizado los prefijos, servirán para cualquier tipo de medición.

De esta forma, si se menciona que un **poise** es una unidad de viscosidad, no importa cuán grande sea dicha unidad ni de qué manera esté relacionada con otro tipo de unidades y ni siquiera interesa saber con exactitud qué es la viscosidad. A pesar de no saber absolutamente nada del tema, uno sabe que un **centipoise** equivale a un céntimo de **poise**, que una **hectárea** es igual a **cien áreas**, que un **decibel** es un **décimo** de bel; e incluso que un "kilopesos" equivale a mil pesos.

En el sistema métrico decimal de 1795, los prefijos no sobrepasaron la marca de millar; como consecuencia, en forma original el sistema métrico sólo muestra prefijos que cubren nada más seis órdenes de magnitud. La unidad más grande, *kilo,* es un millón (10^6) de veces más grande que la unidad más pequeña, **mili**, y el exponente **6** es el que indica los órdenes de magnitud.

Seis órdenes de magnitud pueden ser suficientes para la vida diaria, pero, a medida que los instrumentos se desarrollaban, la ciencia requería expresar cantidades muy grandes y muy pequeñas, en casi todos los campos de la medición, por lo que no quedaba más remedio que extender el intervalo del sistema.

Así fue como se comenzaron a usar prefijos extraoficiales para las unidades que estaban por encima de **kilo** y por debajo de **mili** y, por supuesto, con ello se corría el riesgo de crear disidencias. En 1958, el Comité Internacional de Pesas y Medidas de París acordó establecer un conjunto más amplio de prefijos.

Para evitar una gran proliferación de estos prefijos, los factores varían en el orden de 10^{3n} (tres ordenes de magnitud), excepto para los valores más próximos a la unidad, donde se manejan otros prefijos que expresan relaciones de 10^{-2}, 10^{-1}, 10 y 10^2 de la unidad indicada. Cabe resaltar que no deben utilizarse prefijos compuestos, ya que éstos, como es lógico, no son absolutamente necesarios, aunque sí convenientes, porque evitan el manejo de valores numéricos desmesuradamente grandes o pequeños y muchas veces facilitan la apreciación cuantitativa de las magnitudes físicas. Cuando se manejan unidades del SI con prefijos en un cálculo numérico, pueden necesitarse factores de conversión para obtener el resultado final en la unidad que se desea, pero estos factores serán siempre potencias de diez.

A continuación se muestran los principales prefijos usados en el SI, junto con un par de los prefijos más antiguos, los cuales se han incluido por razones de continuidad (véase tabla 2.8).

Tabla 2.8. Ampliación y significados de prefijos usados en el SI.

Tamaño	Prefijo	Raíz griega
Billón (10^{12})	tera	teras ("monstruo")
Mil millones (10^9)	giga	gigas ("gigante")
Millón (10^6)	mega	megas ("grande")
Mil (10^3)	kilo	chilioi ("mil")
uno (10^0)		
Milésimo (10^{-3})	mili	mille (*latín*: "mil")
Millonésimo (10^{-6})	micro	mikros ("pequeño")
Milmillonésimo (10^{-9})	nano	nanos ("enano")
Billonésimo (10^{-12})	pico	pico ("pequeño")

En 1962 se agregaron los prefijos *fento,* que representa un milmillonésimo (10^{-15}) y *ato* que equivale a un trillonésimo (10^{-18}); ambos prefijos provienen de las palabras danesas femto ("quince") y atto ("dieciocho"). Así, se sabe que un **picómetro** es un billonésimo de metro, un **nanogramo** es un milmillonésimo de gramo y un **gigasegundo** representa mil millones de segundos (véase tabla 2.9).

Tabla 2.9. Sistema Internacional de unidades: prefijos utilizados actualmente.

Factor de equivalencia	Prefijo	Símbolo	Forma exponencial
1 000 000 000 000 000 000 000 000	yotta	Ψ	10^{24}
1 000 000 000 000 000 000 000	zetta	Z	10^{21}
1 000 000 000 000 000 000	exa	E	10^{18}
1 000 000 000 000 000	peta	Π	10^{15}
1 000 000 000 000	tera	T	10^{12}
1 000 000 000	giga	Γ	10^{9}
1 000 000	mega	M	10^{6}
1 000	kilo	κ	10^{3}
100	hecto	η	10^{2}
10	deka	δα	10^{1}
1	unidad		10^{0}
0,1	deci	*d*	10^{-1}
0,01	centi	*c*	10^{-2}
0,001	mili	*m*	10^{-3}
0,000 001	micro	μ	10^{-6}
0,000 000 001	nano	*n*	10^{-9}
0,000 000 000 001	pico	*p*	10^{-12}
0,000 000 000 000 001	femto	*f*	10^{-15}
0,000 000 000 000 000 001	atto	*a*	10^{-18}
0,000 000 000 000 000 000 001	zepto	*z*	10^{-21}
0,000 000 000 000 000 000 000 001	yocto	*y*	10^{-24}

2.5 Unidades que no son del SI

Las tablas 2.10 y 2.11 reúnen un grupo de unidades que pueden definirse con precisión en la forma habitual del SI, pero que no pertenecen formalmente a este sistema. Las unidades que aparecen en la primera de éstas (véase tabla 2.10) son múltiplos o fracciones decimales de unidades del SI y las de la segunda (véase tabla 2.11) no guardan relación decimal respecto a las unidades correspondientes del SI.

Con excepción de la atmósfera (que debe conservarse en física-química, porque a ésta se refieren los estados estándar o de referencia), las unidades que no pertenecen al SI ya no son necesarias y la mayor parte de las mismas deben considerarse en desuso.

Algunas unidades no pertenecientes al SI, como minuto, hora, grado, Celsius y, posiblemente, litro, han de conservarse, porque como es natural, están muy difundidas por el

uso cotidiano y general. El grado Celsius continuará empleándose, sin duda, en algunos campos de las ciencias físicas, como una unidad familiar para medir temperaturas termodinámicas, que excedan 273,15 K. Algunas ocasiones pueden convenir expresar los datos experimentales en unidades que no son del SI, en razón de los instrumentos de medida que todavía se utilizan. Sin embargo, las unidades que no son del SI en general deben evitarse cuando se registren los valores de las magnitudes físicas que se vayan calculando a partir de los datos experimentales.

Tabla 2.10. Unidades que no pertenecen al SI.

Magnitud física	Nombre de la unidad	Símbolo	Definición
Longitud	angstrom	Å*	10^{-10} m $=10^{-1}$ nm
Longitud	micra	μ[i]	10^{-6} m $= 1\ \mu m$
Longitud	milimicra	$m\mu$[i]	10^{-9} m $=$ nm
Volumen	litro	L	10^{-3} m^3 $=$ dm^3
Fuerza	dina	dyn	10^{-5} N
Energía	ergio	erg	10^{-7} J
Presión	bar	bar	10^5 N m^{-2}
Viscosidad dinámica	poise	P	10^{-1} kg m^{-1} s^{-1}
Concentración	molar	M	mol dm^{-3}
Flujo magnético	maxwell	M	10^{-8} Wb
Densidad del flujo magnético (inducción magnética)	gauss	G	10^{-4} T

* En vista de su utilidad respecto a las dimensiones moleculares, un gran número de científicos aboga por conservar el angstrom como unidad reconocida de longitud.

[i] μ significa 10^{-6} y no 10^{-6} m; $m\mu$ por la misma razón, significa 10^{-9} y no 10^{-9} m.

Tabla 2.11. Unidades no consistentes con el SI.

Magnitud física	Nombre de la unidad	Símbolo de la unidad	Definición
Energía	caloría termoquímica[+]	cal	4.184 J
Presión	Atmósfera	atm	$1{,}013\ 25 \times 10^5$ N m^{-2}
Presión	milímetros de mercurio	mmHg	133,322 39 N m^{-2}
Presión	Torr	Torr	$\frac{1{,}013\ 25 \times 10^5 \text{ N m}^{-2}}{760}$
Temperatura	grado Celsius[&]	°C	T(°C) = T(K) – 273,15

[+] A diferencia del joule, la caloría es una unidad ambigua si no se concreta con otras especificaciones; por ejemplo, 1 caloría internacional = 1,000 67 calorías termoquímicas.

[&] Celsius es la manera correcta de nombrar la unidad y no centígrado.

2.6 Conversión de unidades

El análisis dimensional es una técnica a través de la cual se determinan todas las dimensiones que se encuentran en las mismas unidades, para tal efecto se multiplica el número que se desea transformar por un factor de conversión.

Las unidades se manejan como números, y si una misma unidad se encuentra en el numerador y en el denominador éstas se cancelan. Los factores de conversión se utilizan para expresar la equivalencia de una magnitud en unidades diferentes (1 cm = 10 mm). Como el numerador y el denominador describen la misma cantidad, el factor es equivalente al número 1. Por tanto, multiplicar por este factor no cambia la cantidad medida, sólo cambian las unidades.

$$\text{Número de la unidad original}\left[\frac{\text{nueva unidad}}{\text{unidad original}}\right] = \text{nuevo número en la nueva unidad}\left(\ \right)$$

↑ factor de conversión ↑

Cantidad que se desea expresar en nuevas unidades

Cantidad expresada ahora en las nuevas unidades

o de otra manera,

$$\text{cantidad deseada} = \text{cantidad dada} \times \text{factor de conversión}$$

Cuando se multiplica la cantidad dada por el factor de conversión apropiado, algunas de las unidades se cancelan para dar el resultado deseado.

Es decir, para simplificar la conversión de una unidad a otra se usa la técnica denominada método de factor-unidad, la cual se fundamenta en el análisis dimensional. Con este enfoque, cualquier problema que requiera conversión de una unidad a otra se puede resolver de manera similar.

Ejemplo 1

Las páginas de un libro miden 25,3 cm de largo y 21,6 cm de acho. ¿Cuál es su longitud en metros y en milímetros?

Solución:

$$\text{Largo en metros (m)} = 25{,}3\ \text{cm}\left[\frac{1\ \text{m}}{100\ \text{cm}}\right] = 0{,}253\ \text{m}$$

$$\text{Largo en milímetros} = 25{,}3\ \text{cm}\left[\frac{10\ \text{mm}}{1\ \text{cm}}\right] = 253\ \text{mm}$$

En la realización de estos cálculos es necesario contar con herramientas que muestren las equivalencias entre unidades de medición (véase tabla 2.12).

Ejemplo 2

Las medidas de una tela son 28,5 cm de largo y 20,5 cm de acho. ¿Cuál es su área en metros?

Tabla 2.12. Equivalencias entre algunas unidades del SI*.

Masa			
1 kilogramo	1 000 g	2,205 lb	35,27 oz
1gramo	10 dg	100 cg	1 000 mg
1 tonelada	1 000 kg	2 205 lb	10^6 g
1 libra	454 g	16 oz	
1 gramo	$6{,}022 \times 10^{23}$ unidades de masa atómica		
1 unidad de masa atómica	$1{,}6605 \times 10^{-24}$ gramos		

Área			
1 m^2	10^4 cm^2	10,76 ft^2	1 550 in^2
1 cm^2	10^{-4} m^2	0,155 in^2	
1 ft^2	929 cm^2	144 in^2	
1 in^2	6,452 cm^2		

Volumen				
1 m^3	1 000 mL	35,31 ft^3	10^6 cm^3	
1 L	1 dm^3	0,001 m^3	1 000 cm^3	61,02 in^3
1 mL	1 cm^3	0,001 L		
1 ft^3	28,316 L	29,924 cuartos	7,481 gal	1 728 in^3
1 gal	3,84 L			

Longitud					
1 milla	5 280 ft		1,609 km		
1 yarda	36 in		0,914 4 m		
1 pulgada	2,54 cm				
1 metro	100 cm		39,37 in		3,281 ft
1 kilómetro	1 000 m	10^5 cm	1 094 yd	3 281 ft	0,621 5 millas
1 ft	30,48 cm		12 in		0,3048 m
1 angstrom	$1{,}0 \times 10^{-8}$ cm		0,10 nm		100 pm
	$1{,}0 \times 10^{-10}$ m		$3{,}937 \times 10^{-9}$ in		
1 in	2,54 cm				

Densidad				
1 g/cm^3	1 000 kg/m^3	1 g/mL	1 kg/L	62,43 lb/ft^3
1 lb/ft^3	16,02 kg/m^3		$1{,}6 \times 10^2$ g/mL	$1{,}6 \times 10^2$ g/cm^3
1 lb/in^3	27,68 g/cm^3			1 728 lb/ft^3

Energía				
1 cal	4,186 J	$1{,}163 \times 10^{-6}$ kw h	$3{,}969 \times 10^{-3}$ BTU	3,088 ft lb
1 BTU	252 cal	1 055 J	$2{,}93 \times 10^{-4}$ kw h	
1 lb ft	1,356 J	0,323 8 cal		
1 cal/min	Potencia	0,251 kw		

Tiempo			
1 año	12 meses	365 días	Las conversiones relacionadas con las jornadas, turnos y periodos laborales dependen de las condiciones particulares de cada problema
1 día	24 horas	1 440 minutos	
1 hora	60 minutos	3 600 segundos	
1 minuto	60 segundos		

* En el apéndice Factores de Conversión, al final del libro, se encuentran más equivalencias.

Solución:

$$\text{Largo en metros} = 28{,}5\,\text{cm}\left[\frac{1\,\text{m}}{100\,\text{cm}}\right] = 0{,}285\,\text{m}$$

(↑ factor de conversión ↑)

Cantidad que se desea expresar en nuevas unidades ↓ — Cantidad expresada ahora en las nuevas unidades ↓

$$\text{Ancho en metros} = 20{,}5\,\text{cm}\left[\frac{1\,\text{m}}{100\,\text{cm}}\right] = 0{,}205\,\text{m}$$

Cálculo del área:

Área = Largo × Ancho

Área = 0,285 m × 0,205 m = 0,508 m^2

Otra manera de obtenerlo es:

$$\text{Área} = 28{,}5\,\text{cm}\left[\frac{1\,\text{m}}{100\,\text{cm}}\right] \times 20{,}5\,\text{cm}\left[\frac{1\,\text{m}}{100\,\text{cm}}\right] = 0{,}508\,\text{m}^2$$

Ejemplo 3

Se desea saber a cuántas libras equivalen 120 kilogramos.

Solución:

$$\text{Peso en libras} = 120\ \text{kg}\left[\frac{2{,}205\ \text{lb}}{1\,\text{kg}}\right] = 264{,}6\ \text{lb}$$

Ejemplo 4

Se desea saber cuál es el valor del volumen en litros de una cisterna de las siguientes dimensiones: 4 m de ancho por 5 m de largo por 2 m de alto.

Solución:

$$\text{Volumen} = 4\ \text{m} \times 5\ \text{m} \times 2\ \text{m} = 40\ \text{m}^3$$

$$\text{Volumen en litros} = 40\,\text{m}^3\left[\frac{1\,000\ \text{L}}{1\ \text{m}^3}\right] = 40\,000\ \text{L}$$

Otra herramienta útil en la solución de problemas, en lo general y en lo particular de procesos industriales, es el uso de números exponenciales, para tal efecto existen dos buenas razones:

1. Para evitar escribir gran cantidad de ceros en números muy grandes o pequeños.
2. Proporcionar una manera de expresar información empleando cifras significativas con la mínima confusión.

La idea de los números exponenciales es simplificar las cantidades expresadas como múltiplos de las potencias de 10. Así, un número exponencial, como $6{,}02 \times 10^{23}$, consta de dos partes: un coeficiente (en este caso 6,02) y una potencia de 10 (en este caso 10^{23}).

El coeficiente es usualmente elegido para estar entre 1 y 10, el exponente en la potencia de 10 puede ser negativo o positivo. Un exponente positivo n significa multiplicar por 10 n veces (esto es, moviendo las decimales n lugares a la derecha) y un exponente negativo m significa dividir por 10 m veces (esto es, mover el punto decimal m veces hacia la izquierda).

La siguiente tabla lista las formas equivalentes de escribir algunos números sencillos

$1 \times 10^{-6} = 0{,}000\ 001$
$1 \times 10^{-5} = 0{,}000\ 01$
$1 \times 10^{-4} = 0{,}000\ 1$
$1 \times 10^{-3} = 0{,}001$
$1 \times 10^{-2} = 0{,}01$
$1 \times 10^{-1} = 0{,}1$
$1 \times 10^{0} = 1$
$1 \times 10^{1} = 10$
$1 \times 10^{2} = 100$
$1 \times 10^{3} = 1\ 000$
$1 \times 10^{4} = 10\ 000$
$1 \times 10^{5} = 100\ 000$
$1 \times 10^{6} = 1\ 000\ 000$

Potencias de 10 fraccionarias y decimales también son posibles, pero no pueden ser interpretados en términos de añadir o eliminar ceros o mover la coma decimal.

Una de las grandes ventajas del SI es que éste es un sistema coherente, característica que se resalta en los siguientes ejemplos.

Ejemplo 5

Partiendo de la fórmula física que expresa que la fuerza es igual a la masa por la aceleración ($f = ma$), sustituyendo las unidades de masa (kg) y aceleración (m/s^2) de acuerdo con dicha ecuación se obtiene la unidad de fuerza (f):

Solución:

$$1 \text{ newton} = 1 \text{ kg}(1 \text{ m/s}^2)$$

Siendo el trabajo que desarrolla una fuerza el producto de la fuerza por la distancia recorrida, la unidad de trabajo: el joule (J), se obtiene multiplicando la unidad de fuerza por la unidad de distancia.

$$1 \text{ joule} = 1 \text{ newton} \times 1 \text{ metro}$$

La potencia se define como el trabajo desarrollado en la unidad de tiempo. La unidad de potencia entonces es:

$$1 \text{ watt} = 1 \text{ joule}/1 \text{ segundo}$$

El potencial eléctrico o voltaje se define como la potencia dividida entre la intensidad de corriente; entonces, la unidad de potencial eléctrico se define así:

$$1 \text{ volt} = 1 \text{ watt}/1 \text{ ampere}$$

De esta misma forma, se combinan las demás unidades, tanto fundamentales como derivadas, por estar relacionadas de acuerdo con las leyes racionales de la física.

Ejemplo 6

Se tiene un cuerpo cuya masa es de 1 kilogramo, el cual se mueve a la velocidad de 1 metro por segundo. Se busca su energía cinética.

$$\text{Energía cinética} = \frac{m\,v^2}{2}$$

Solución:

Resolviendo en el sistema CGS absoluto:

masa = 1 000 gramos

velocidad = 100 cm seg^{-1}

energía cinética en ergs, $E_c = \dfrac{1\,000 \times 100^2}{2} = 5\ 000\ 000$ ergs

Resolviendo en el sistema MKS absoluto:

masa en kilogramos

velocidad en m seg^{-1}

energía en joules, $E_c = \dfrac{1 \times 1^2}{2} = 0{,}5$ joule

Al hacer los cálculos resulta más fácil trabajar con la cifra que se obtiene en el sistema MKS absoluto, que con otros sistemas.

2.7 Cifras significativas

Las cifras significativas son dígitos que expresan información que es razonablemente confiable. El número de cifras significativas es igual al número de dígitos escritos, incluyendo el último dígito, aun cuando el valor de éste sea incierto.

Para establecer el número de cifras significativas se hace uso del redondeo numérico, el cual consiste en descartar uno o más dígitos al extremo derecho del número y, si es necesario, ajustar el dígito del extremo derecho que se quede.

Existen notaciones usadas para referir la incertidumbre de una determinada medida, si dado el caso del registro de una pesada con un instrumento el cual indica 0,000 1 g de exactitud en la medición, puede indicarse que una determinada masa es 3,3056 ± 0,0001 g, donde el símbolo ± es la manera de expresar la incertidumbre o el grado de exactitud de un instrumento o de una medición. Por ejemplo, al medir una cierta distancia se obtuvo 297 ± 2 mm.

De este modo, se entiende que la medida de dicha magnitud está en alguna parte entre 295 mm y 299 mm. En realidad, la expresión anterior no significa que se está seguro de que el valor verdadero esté entre los límites indicados, sino que hay cierta probabilidad de que esté ahí.

Todos los dígitos, incluyendo la incertidumbre, se denominan cifras significativas, las cuales representan la precisión de una medición.

Al utilizar cantidades obtenidas en los cálculos, la precisión del resultado en las operaciones de multiplicación o división debe reportarse con el número de cifras significativas de la medida con el menor número de éstas. Cuando el resultado contiene más cifras que el número correcto de cifras significativas éste se debe redondear.

Las reglas que se usan para determinar y redondear cifras significativas son las siguientes:

- Todos los dígitos que no sean cero son significativos: 546 g (tres cifras significativas), 0,40 cm (dos cifras significativas).
- Los ceros entre dígitos diferentes de cero son significativos: 1 008 m (cuatro cifras significativas), 1,06 cm^3 (tres cifras significativas).
- Los ceros a la izquierda del primer dígito diferente de cero en un número no son significativas, sólo indican la posición de la coma decimal: 0,05 g (una cifra significativa); 0,006 1 (dos cifras significativas).
- Los ceros que están tanto al final de un número como a la derecha de la coma decimal, son significativos: 0,050 0 N (tres cifras significativas); 6,0 cm (dos cifras significativas).
- Si un número termina en ceros y no está a la derecha de un punto decimal, los ceros no son necesariamente significativos: 120 Ton (dos o tres cifras significativas); 10,500 lb (tres, cuatro o cinco cifras significativas).
- Si el dígito descartado de la extrema izquierda es más pequeño que 5, se descartan los dígitos y se sustituyen los dígitos descartados con el número de ceros necesarios, para mantener la magnitud del número redondeado. Ejemplo: la cifra 7,431 redondeada a dos cifras significativas es 7,4 y 7 431 redondeado a dos cifras significativas es 7 400.
- Si el dígito descartado de la extrema izquierda es mayor o igual a 5, se debe aumentar el último dígito retenido en 1. Sustituyendo los dígitos descartados con la cantidad de ceros necesarios para mantener la magnitud del número redondeado. Ejemplo: la cifra 93,56 redondeada a tres cifras significativas es 93,6 y para un valor de 9 356 redondeado a tres cifras significativas es 9 360.
- El uso de notación exponencial evita la ambigüedad potencial de que si los ceros al final del número son significativos o no; por ejemplo, una longitud de 10 300 cm se puede escribir con notación exponencial mostrando, tres, cuatro o cinco cifras significativas:

$1{,}03 \times 10^4$ cm	(tres cifras significativas)
$1{,}030 \times 10^4$ cm	(cuatro cifras significativas)
$1{,}0300 \times 10^4$ cm	(cinco cifras significativas)

- Si el dígito más a la izquierda a ser eliminado es mayor que 5, el número precedente se incrementa en 1; por ejemplo: 2,374 se redondea a 2,4.
- Si el dígito más a la izquierda a ser eliminado es menor que 5, el número precedente queda sin alteración; ejemplo: 7,248 se redondea a 7,2.
- Si el dígito más a la izquierda a ser eliminado es 5, no se cambia el número precedente si éste es par y se aumenta en 1 si es impar; ejemplo: 2,25 se redondea a 2,3 para un valor de 4,35 se redondea a 4,4.

2.8 Recomendaciones para la escritura de las unidades del SI

Junto con las definiciones de las unidades del SI se emitieron ciertas recomendaciones tendientes a unificar en forma universal la escritura de dichas unidades, sus símbolos y otros

conceptos relacionados. Se recomienda escribir las cantidades de cuatro dígitos sin separación alguna y eliminar la "coma" en los millares, aunque es aceptado una separación entre cantidades: 1 000, 1 348, 130 899, etcétera. Esta recomendación también es aplicable a los grupos de tres dígitos después de la coma decimal: 0,234 5, 0,435 671, etcétera.

La coma decimal, usada en Europa, o el punto decimal, usado en Estados Unidos de América, son aceptados, con las recomendaciones anteriormente citadas.

Los símbolos de las unidades no se deben escribir en plural, sino con la letra o las letras que lo representan (véase tabla 2.13); en cambio, si se escribe el nombre completo de la unidad sí se puede llevar a la forma plural según la regla del idioma español; escribiendo los nombres completos se les considera nombres comunes y, por tanto, se escriben en minúsculas.

Tabla 2.13.

Unidad dimensional	Notación correcta	Notación incorrecta
Kilogramo	kg	kgs
Metro	m	mts

Cuando el símbolo de un múltiplo o de un submúltiplo de una unidad lleva exponente, éste afecta no sólo a la parte del símbolo que designa la unidad, sino al conjunto del símbolo.

mm^2 significa $(mm)^2$, es el área que tiene un mm de lado.

Cabe resaltar que no se debe dejar espacio entre un prefijo y un símbolo:

mm y no m m cm y no c m dl y no d l

Si se combinan dos o más símbolos de unidades se recomiendan dejar un espacio entre ellos:

kW h; m kg

Se recomienda dejar un espacio entre la cifra que indica la medida y la unidad de medida:

53 kg; 28 mg

Cuando una unidad derivada se forme dividiendo una unidad por otra, se puede utilizar la barra horizontal u oblicua o potencias negativas, nunca debe introducirse en una misma línea más de una barra oblicua, debiéndose utilizar en estos casos potencias negativas o paréntesis.

A continuación se presenta un ejemplo de expresiones sinónimas:

N/m, $\frac{N}{m}$, $N \cdot m^{-1}$ (unidades de tensión superficial)

m/s^2 o $m \cdot s^{-2}$ (unidades de aceleración)

$W/m \cdot k$ o $W\,m^{-1}K^{-1}$ (unidades de conductividad térmica)

En éstas se admiten los prefijos compuestos formados por la yuxtaposición de varios prefijos. Por ejemplo, no se admiten 1 $\mu\mu$F ni 1 m μg; sino que se debe escribir 1 pF (picofaradio) y 1 ng (nanogramo).

Asimismo, no se debe poner punto al final de un símbolo como si se tratará de una abreviatura, excepto cuando termina una frase:

25 cm 8,43 m 72,2 A

Todos los nombres de las unidades, aunque lleven el nombre de un científico, se escriben con inicial minúscula y los símbolos de las unidades que corresponden al nombre de un científico se escriben con mayúscula:

celsius °C, volt V, ampere A, coulomb C

El símbolo ºC para los grados Celsius, es precedido por un espacio cuando se expresa el valor de la temperatura Celsius:

T = 23,4ºC y no T = 23,4ºC o T = 23,4ºC

No se deben mezclar nombres completos con símbolos en unidades compuestas:

kg m y no kilogramos m; A h y no ampere h.

La IX *CGPM* (1948) recomendó para la escritura de números que se agrupen las cifras de tres en tres a partir de la coma, tanto hacia la derecha como hacia la izquierda, separando cada grupo por un espacio y nunca por puntos. Ejemplo: el valor en centímetros de la longitud de onda de la radiación emitida por el átomo de criptón 86 debe escribirse 16 507,637 3 y nunca debe escribirse 16.507,6373.

La XIII Conferencia General de Pesas y Medidas de 1968 ha recomendado que las potencias de diez se expresen en $10^{\pm 3n}$ siendo n un número entero. Así, la constante de Avogadro se expresará: $N = 602 \times 10^{21}$ moléculas mol^{-1} en vez de $N = 6{,}02 \times 10^{23}$ moléculas mol^{-1}; la carga del electrón se expresará: $\boldsymbol{e} = 160 \times 10^{-21}$ coulombs, vez de $\boldsymbol{e} = 1.6 \times 10^{-19}$ coulombs.

Se recomienda que el valor numérico que representa una medida esté comprendido entre uno y mil, de esta manera no debe decirse: "la frecuencia de los ultrasonidos que es superior a 20 000 Hz, se debe indicar como superior a 20 K Hz".

En general, las reglas para la escritura de los símbolos en el SI son:

- Los símbolos de las unidades del SI, a excepción del ohm **Ω**, se expresan en caracteres romanos, en general, con minúsculas.
- Las unidades derivadas de nombres propios se expresan con su letra inicial en mayúscula.
- Los símbolos no van seguidos de punto, ni toman la "s" para el plural.
- Cuando el símbolo de un múltiplo o submúltiplo de una unidad lleva exponente, ésta afecta no sólo a la parte del símbolo que designa la unidad, sino al conjunto del símbolo.
- El símbolo de la unidad sigue al símbolo del prefijo (sin espacio).
- El producto de los símbolos de dos o más unidades se indica de preferencia por medio de un punto como símbolo de multiplicación.
- Cuando una unidad derivada sea el cociente de otras dos, se puede utilizar la barra oblicua (/), la barra horizontal o bien potencias negativas para evitar el denominador.
- En una misma línea no se debe introducir más de una barra oblicua, a menos que se añadan paréntesis, a fin de evitar toda ambigüedad. En los casos complejos pueden utilizarse paréntesis o potencias negativas.
- Los nombres de las unidades debidos a nombres propios deben escribirse con idéntica ortografía que el nombre de éstos, pero con minúscula inicial. No obstante, serán igualmente aceptables sus denominaciones castellanizadas de uso habitual, siempre que estén reconocidas por la Real Academia de la Lengua Española.
- Los nombres de las unidades toman una "s" en el plural, excepto las que terminan en *s, x* o *z*.
- En los números, la coma se utiliza sólo para separar la parte entera del decimal. Para facilitar la lectura, los números pueden estar divididos en grupos de tres cifras; estos

grupos no se separan por puntos ni comas. Las separaciones en grupos no se utilizan para los números de cuatro cifras que designan un año.

- Para las unidades del SI derivadas, que se expresan como productos o cocientes, para indicar división, se utiliza la preposición "por" entre los nombres de las unidades y para indicar multiplicación no se utiliza ninguna palabra.

2.9 Metodología para resolver problemas de conversión de unidades

Al usar unidades dimensionales en la resolución de problemas, es recomendable seguir los pasos que a continuación se describen:

1. Leer el problema.
2. Analizar el problema.
3. Anotar los datos del problema (generales y particulares).
4. Efectuar conversiones de unidades.
5. Obtener las respuestas a cada inciso.

2.10 Aplicación de la metodología para resolver problemas de conversión de unidades

Los pasos descritos en la sección anterior se aplicarán al siguiente ejercicio referente a una industria productora de champú.

En la planta productiva de una industria dedicada a la fabricación de champú se procesan 537 lb/h de producto con una densidad de 0,944 g/cm^3.

Determine:

a) La cantidad de galones procesados anualmente, considerando que la industria trabaja dos turnos de 8 horas por día, cinco días por semana, cuatro semanas por mes, 12 meses al año.

b) ¿Cuántas botellas de 260 mL se requieren comprar cada seis meses? Considere que cada botella se llena al 90% de su capacidad.

c) Si cada botella tiene un valor de $2,50, ¿cuál será la inversión mensual, bimestral y anual por este concepto?

Lectura del problema

En este punto se observa que se proporcionan datos acerca del producto elaborado, la producción obtenida, la jornada laboral establecida, la capacidad del recipiente y su costo. Cada inciso está relacionado con la producción realizada por hora de trabajo; asimismo, se deben efectuar algunas conversiones; al respecto se puede usar la técnica conocida como regla de tres (uso de proporciones) o la conocida como conversión en línea (en la mayoría de los problemas en que intervienen relaciones, existen cantidades dimensionales que es necesario cancelar o que tienen equivalencias entre ellas). Este último es un método que depende de la anulación de unidades dimensionales que aparecen tanto en el numerador como en el denominador.

Análisis del problema

La frase: "en una industria productora de champú se procesan 537 lb/h de producto", indica la sustancia y la masa con la cual trabaja la empresa. La relación de materia procesada está descrita como un gasto másico (cantidad de masa respecto al tiempo):

$$\text{Gasto másico} = \text{Gm} = \frac{\text{masa}}{\text{tiempo}} = \frac{\text{libra}}{\text{hora}}$$

esto se entiende como la masa procesada por cada hora de producción, por lo que para conocerla en forma diaria, semanal, etc., es necesario calcular la jornada laboral con la conversión correspondiente.

Un dato adicional es la densidad, que es una propiedad que relaciona la masa y el volumen del producto, esto corresponde a obtener las siguientes expresiones:

$$V = \frac{m}{\rho} \ldots\ldots\ldots (1a)$$

$$\text{Densidad } (\rho) = \frac{\text{masa } (m)}{\text{volumen } (V)} \ldots\ldots\ldots (1) \text{ por tanto se tiene}$$

$$m = \rho\ V \ldots\ldots (1b)$$

Estas relaciones serán utilizadas para llevar a cabo las conversiones correspondientes para resolver correctamente los incisos contenidos en el problema.

La pregunta incluida en el inciso a) involucra la variable expresada en volumen (galones), y por tanto debe ser utilizada la relación (*1a*) para obtener ese dato. Siguiendo con la lectura del problema, la pregunta implica el cálculo del volumen (relación con la densidad) en un determinado tiempo (cantidad de días laborables por año); también es necesario obtener equivalencias para la masa y el volumen, incluidas en la relación de la densidad. Entonces, para resolver este inciso se expresan las cantidades de días laborables por año (incluye las siguientes conversiones de tiempo):

1 turno = 8 horas
1 día = 2 turnos
1 semana = 5 días
1 mes = 4 semanas
1 año = 12 meses

y de masa y volumen:

1 libra = 454 g
1 gal = 3,84 L
1 L = 1 000 mL
1 mL = 1 cm^3

Para el inciso b) se requiere obtener la producción (por seis meses) y obtener el número de botellas; para el primer cálculo, se aprovecha la respuesta obtenida en el inciso a), y para la segunda hay que considerar que el llenado se efectúa al 90% de la capacidad de las botellas.

Finalmente, para el inciso c), ya calculado el número de botellas en b), se realiza un cociente entre seis meses de trabajo para obtener la cantidad mensual de botellas utilizadas, esta cantidad multiplicada por el precio unitario de cada botella indica el costo total por mes (multiplicado por 2 es bimestral, por 6 es semestral y por 12 es anual).

Anotar los datos del problema

En este punto se escriben las referencias obtenidas en los pasos anteriores, resumiendo los datos proporcionados en el problema:

a) Producto: champú

Producción: Gasto másico: 537 $\frac{\text{lb}}{\text{h}}$

Densidad del champú: $0,944\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

Galones por año:

1 turno = 8 horas
1 día = 2 turnos
1 semana = 5 días
1 año = 12 meses

b) Número de botellas por 6 meses: $\frac{\text{botellas}}{6 \text{ meses}}$

Una botella se llena al 90% de su capacidad

Capacidad por botella: 260 mL

c) Precio por botella: $2,50

Inversión mensual: $\frac{\$}{\text{mes}}$

Inversión bimestral: $\frac{\$}{2 \text{ meses}}$

Inversión anual: $\frac{\$}{\text{año}}$

La lista de datos para cada inciso, proporciona las incógnitas a resolver, las conversiones y la secuencia de cálculos a realizar.

Efectuar conversiones de unidades

En este punto se usan conversiones que sean fácilmente recordables, ya que es más fácil recordar que 1 L es igual a 1 000 mL, que 1 000 L son 10^6 cm^3. Así, se inician los cálculos en conversión en línea para los incisos:

a)

$$537 \ \frac{\text{lb}}{\text{h}}\left|454\frac{\text{g}}{\text{lb}}\right. = 243\ 798\frac{\text{g}}{\text{h}}$$

$$243\ 798\frac{\text{g}}{\text{h}}\left|\frac{\text{cm}^3}{0,944\ \text{g}}\right|1\frac{\text{mL}}{\text{cm}^3}\left|1\frac{\text{L}}{1\ 000\ \text{mL}}\right|1\frac{\text{gal}}{3,84\ \text{L}} = 67,255\frac{\text{gal}}{\text{h}}$$

y para las conversiones que involucran tiempo.

$$67{,}255\,\frac{\text{gal}}{\text{h}}\left|\frac{8\text{ h}}{1\text{ turno}}\right|\frac{2\text{ turnos}}{1\text{ día}}\left|\frac{5\text{ días}}{1\text{ semana}}\right|\frac{4\text{ semanas}}{1\text{ mes}}\left|\frac{12\text{ meses}}{1\text{ año}}\right.=258\,260{,}59\,\frac{\text{gal}}{\text{año}}$$

b) Utilizando los datos anteriores se obtiene:

$$258\,260{,}59\,\frac{\text{gal}}{\text{año}}\left|\frac{1\text{ año}}{12\text{ meses}}\right|\frac{3{,}84\,\text{L}}{1\text{ gal}}\left|\frac{1\,000\text{ mL}}{1\text{ L}}\right|\frac{6\text{ meses}}{}=490\,860\,339\,\frac{\text{mL}}{6\text{ meses}}$$

Como cada botella contiene 260 mL de champú, con un llenado al 90% de su capacidad se procede de la siguiente manera:

$260\,\text{mL}\left|\frac{90\,\%}{100\%}\right.=234\text{ mL}$ de champú en cada botella, por lo que al usar los datos anteriores se obtiene:

$$495\,860\,339\,\frac{\text{mL}}{6\text{ meses}}\left|\frac{1\text{ botella}}{234\text{ mL}}\right.=2\,119\,061\,\frac{\text{botellas}}{6\text{ meses}}$$

c) Continuando con los cálculos:

$$2\,119\,061\,\frac{\text{botellas}}{6\text{ meses}}\left|\frac{1\text{ mes}}{}\right|\frac{\$2{,}50}{\text{botella}}=\$\,5\,297\,652{,}50\text{ por mes}$$

$$\$\,5\,297\,652{,}50\text{ por mes}\left|\frac{2\text{ meses}}{1\text{ bimestre}}\right.=\$\,10\,595\,305{,}00\text{ por bimestre}$$

$$\$\,5\,297\,652{,}50\text{ por mes}\left|\frac{12\text{ meses}}{1\text{ año}}\right.=\$\,63\,571\,830899\text{ por año}$$

Obtener las respuestas de cada inciso

Las respuestas se pueden indicar en cada una de las conversiones de los incisos correspondientes o creando una lista de respuestas como se muestra a continuación:

a) 258 260, 59 gal/año

b) 2 119 061 botellas/6 meses

c) $ 5 297 652,50 /mes

$10 595 305/bimestre

$ 63 571 830,99/año

De esta manera, el problema está completamente resuelto.

2.11 Actividad propuesta

A. Para cada una de las siguientes magnitudes escriba el nombre de su unidad dimensional correspondiente en el SI y localícela en la sopa de letras anexa.

1. Longitud _____
2. Masa _____
3. Tiempo _____
4. Intensidad de corriente eléctrica _____
5. Temperatura termodinámica _____
6. Cantidad de sustancia _____
7. Intensidad luminosa _____
8. Ángulo plano _____
9. Ángulo sólido _____
10. Frecuencia _____
11. Fuerza _____
12. Presión _____
13. Energía _____
14. Potencia _____
15. Potencial eléctrico _____
16. Diferencia de potencial _____
17. Capacitancia _____
18. Resistencia eléctrica _____
19. Conductancia _____
20. Flujo magnético _____
21. Densidad de flujo magnético _____
22. Inductancia _____
23. Temperatura cotidiana _____
24. Flujo luminoso _____
25. Iluminación _____

B. Para cada una de las siguientes unidades dimensionales escriba las magnitudes correspondientes y localícelas en la sopa de letras anexa.

1. Weber _____ magnético
2. Lumen, flujo _____
3. Siemens _____
4. Kelvin _____ termodinámica
5. Segundo _____
6. Pascal _____
7. Radián _____
8. Newton _____
9. Henry _____

10. Lux _____

11. Telsa _____ de flujo magnético

12. Joule _____

13. Joule, cantidad de _____

14. Potencia _____

15. Hertz _____

U	V	O	L	T	N	I	N	D	U	C	T	A	N	C	I	A	Q	L	T
N	D	S	U	E	A	F	A	R	A	D	M	E	T	A	L	E	S	L	C
R	A	D	X	S	L	E	M	I	U	S	A	L	U	M	I	N	O	S	O
M	D	I	C	L	I	U	P	A	S	C	A	L	K	E	L	V	O	J	N
O	E	M	C	A	N	D	E	L	A	T	E	M	P	A	R	T	U	I	D
L	U	M	E	N	D	O	R	O	H	E	R	T	Z	I	P	L	S	T	U
X	E	U	L	N	I	H	E	N	R	Y	I	R	E	K	F	L	O	E	C
E	S	I	S	I	L	M	E	I	R	N	E	H	E	L	U	O	J	M	T
S	D	S	I	V	O	N	F	U	E	U	L	L	I	T	Z	B	J	P	A
T	E	L	U	L	D	S	E	L	F	J	F	O	J	O	L	A	C	E	N
E	N	O	S	E	G	U	N	D	O	S	M	I	L	L	A	S	I	R	C
R	S	N	I	K	O	L	A	R	K	I	L	O	G	R	A	M	O	A	I
O	I	A	S	A	R	O	R	E	B	E	W	A	R	P	R	E	S	T	A
R	D	K	G	S	C	O	U	L	O	M	B	F	W	R	A	A	I	U	T
R	A	D	I	A	N	S	E	G	U	I	S	R	A	E	D	T	D	R	E
A	D	E	A	S	N	O	T	W	E	N	E	E	T	S	R	O	L	A	C
D	T	S	N	T	G	R	A	D	O	S	T	E	T	I	E	M	P	O	E
I	E	M	F	R	E	C	U	E	N	C	I	A	K	O	A	L	A	C	D
A	N	G	U	L	O	P	L	A	N	O	T	U	E	N	E	R	G	I	A
N	O	I	C	A	N	I	M	U	L	I	M	A	G	N	E	T	I	C	O

2.12 Problemas

Resuelva correctamente los siguientes problemas, siguiendo la metodología propuesta.

Con la siguiente información conteste lo que se le pide:

Una fábrica que produce pulpa de frutas tiene el siguiente plan de producción:

Tabla 2.13.

Producto (pulpa)	Consumo materia prima	Funcionamiento	Envases utilizados
Piña	500 kg/h	95 días /año 1 turno de 8 h/día	Recipiente de vidrio de 750 g
Durazno Densidad = 1,8 g/cm^3	900 lb/ min	250 días/año 1 turno de 8 h/día	Recipientes de diámetro = 2,76 in altura = 0,39 ft

El producto terminado se obtiene en un 75% respecto a la cantidad de materia prima utilizada y la temperatura del proceso es de 110 ºC. Con base al plan de producción, calcule:

1. a) El producto elaborado en Ton/h de piña y durazno.
   b) El producto elaborado en kg/año de piña y durazno.
2. La cantidad de envases/año. Para el durazno efectúe el cálculo considerando el contenido en cm^3.
3. Exprese la temperatura del proceso en ºF.

Con la siguiente información resuelva lo que se le pide:

Una empresa desea adquirir un generador de vapor para su proceso y tiene las siguientes opciones:

Tabla 2.14.

Tipo de generador de vapor	Combustible	Consumo	Capacidad calorífica	Costo del combustible	Densidad
1	gas	1,3 lb/h	11 650 kcal/kg	1,55 $/lb	1,2 g/L
2	gasolina	0,8 m^3/turno	42,3 BTU/g	15 $/gal	0,85 g/cm^3
3	diesel	1 350 L/día	42,49 cal/g	90 $/ft^3	0,91 g/cm^3

Nota: La empresa trabaja únicamente un turno de 8 horas por día.

Determine:

4. La cantidad de energía en forma de calor que genera cada equipo en 3 horas de trabajo. Exprese sus resultados en BTU (considere que calor = masa × capacidad calorífica).
5. Si se requieren 1,55 × 10^6 kcal en el proceso, ¿cuál sería la opción más adecuada?
6. Según los cálculos anteriores, ¿cuál sería la mejor opción a elegir?

Con la siguiente información resuelva lo que se le pide:

Una empresa que fabrica empaques automotrices trabaja 7 horas efectivas cada día (un turno) y durante la operación presenta los siguientes consumos de energía con esta información determine:

Tabla 2.15.

Energético o energía	Consumo	Costo
Gasolina	10 gal/semestre	130 $/ft^3
Gas	5 kg/día	2,50 $/lb
Electricidad	10 kW h/día	0,003 $/BTU

7. Costo de operación de la fábrica durante 15 días hábiles.
8. Si la gasolina tiene un poder calorífico de 11,83 kcal/cm^3 y el gas de 10,30 kcal/g, ¿cuál será la cantidad en BTU utilizado durante cinco días de trabajo por concepto de utilizar gasolina, gas y electricidad.
9. En una empresa se tienen los siguientes consumos por concepto de energía y energéticos. La empresa trabaja 8 horas diarias y consume en promedio 10 kW h/día de energía eléctrica, su sistema de calentamiento trabaja mediante la combustión de un gas que proporciona 11,76 kcal/h por cada gramo que se quema, utilizando un promedio de 0,25 lb/h de gas. También se utiliza combustible en promedio de 1 lb/h, cuya densidad es de 1,1 g/mL con poder calorífico de 1 193,45 BTU.

Si los costos promedio por concepto de energía y energético son de $ 0,20/kcal, determine el costo total por concepto de energía y energéticos para cada semana de trabajo (6 días).

10. Proporcione las dimensiones para la $N_R = \dfrac{D\rho v}{\mu}$ donde N_R = Número de Reynold D = diámetro, ρ = densidad, v = velocidad y μ = viscosidad *cP* (centiPoise).
11. ¿Cuánta energía potencial en ft lb_f tiene un tambor de 100 lb suspendido 10 ft sobre la superficie de la Tierra con referencia a dicha superficie?
12. Cien libras de agua fluyen por una tubería a razón de 10 ft/s, ¿cuánta energía cinética tiene el agua en ft lb_f?
13. Convierta 130 °C a:
    i) K
    ii) °F
    iii) R
14. La conductividad térmica del aluminio a 32 °F es 117 BTU/h ft^2 °F, calcule el valor equivalente a 0 °C en términos de BTU/h ft^2 K.
15. La capacidad calorífica del H_2SO_4 dada en un manual, tiene las unidades J/gmol °C y está dada por la relación $c_p = 139{,}10 + 1{,}56 \times 10^{-1}\,T$, donde T se expresa en °C. Modifique la fórmula de modo que la expresión resultante tenga asociadas las unidades BTU/lbmol R.
16. Un cubo de hierro mide 2 cm por lado y tiene una masa de 62,9 g. Calcule su densidad en kg/m^3.
17. Pasar los siguientes datos de unidades a condiciones normales de presión y temperatura: 15 kg/cm^3, 70 °F (considere que CNPT implican que P = 1 atm y T = 0 °C).
18. La torre Eiffel tiene 984 pies de altura, exprese esta unidad en:
    i) m
    ii) cm
    iii) yd

19. ¿Cuál es la dimensión del lado de un cubo cuyo volumen es de 3 375 cm^3?
20. ¿Cuál es el volumen en galones de un tanque de dimensiones: largo = 2 m, ancho = 0,50 yd, y alto = 5 in?
21. Un estudiante hizo tres mediciones de peso de un objeto: 19,17 oz, 9,15 g y 18,4 lb. ¿Cuál es el promedio en peso del objeto en mg?
22. La densidad del alcohol es de 0,8 g/mL. ¿Cuál es el peso de 5 galones de esta sustancia?
23. Calcule la densidad de un bloque de madera en g/cm^3, el cual pesa 750 lb y tiene las dimensiones de 2,5 in, 0,10 m por 10 yd.
24. La capacidad calorífica a presión constante del agua a 200 °F es de 10,8 BTU/lbmol R. Calcule el c_p en kcal/kgmol K.
25. El valor de la constante R de los gases ideales es 1 545 lb_f ft^3/ft^2 lbmol R, exprese el valor en atm ft^3/kgmol K.
26. Una ecuación simplificada para la transmisión de calor de un tubo de aire es $Q = h\ A\ \Delta T$, donde h es el coeficiente de transferencia de calor ($h = 0{,}269\ G^{0,6}/D^{0,4}$) en BTU/h ft^2 °F, A es el área, Q es la cantidad de calor en BTU/h, ΔT es la diferencia de temperaturas en °F, G es la velocidad másica (1 lb/h ft^2) y D es diámetro en ft.
    a) En caso de expresar h en cal/min cm^2 °C, ¿cuál sería la nueva constante de la ecuación en vez de 0,026?
    b) Si G y D fueran a utilizarse con las unidades $G' = g/min\ cm^2$, $h' = cal/min\ cm^2$ °C y $D' = cm$, ¿cuál sería la constante alfa $h = alfa\ G^{0,6}/\ D^{0,4}$?
27. Una unidad muy empleada para medir presiones es el bar (1 $dina/cm^2$), ¿cuál será la presión en la Ciudad de México en dicha unidad?
28. De la ecuación $F_m = qvB$ donde B (fuerza magnética) está en dinas, 1 dina = 10^{-5} N, q (carga) en uem, 1 uem = 10 C, y v (velocidad) en cm/s, se obtiene la unidad conocida como gauss (dina s/uem cm). Obtenga la equivalencia entre una tesla (T) y un gauss.
29. La densidad del aluminio metálico es de 2,7 g cm^{-3}. Sabiendo que una mol ($6{,}022 \times 10^{23}$ átomos/mol) de átomos tiene una masa de 26,91815 g (peso atómico):
    a) Calcule el volumen que ocupa cada átomo de aluminio.
    b) Obtenga el radio de una esfera con ese volumen en cm, m y Å.
30. Si un avión viaja al doble de la velocidad del sonido (1 100 ft/s), ¿cuál es su velocidad en millas por hora y en km/s?

2.13 Tema de actualidad

El sistema métrico aquí y ahora

Ciencia y tecnología en Michoacán
Por: Óscar González
Lunes, 11 de junio de 2007

En 1857, México adoptó el Sistema Métrico Decimal como sistema de pesas y medidas, pero 150 años después muchos funcionarios, periodistas y hasta algunos ingenieros y técnicos, desconocen sus convenciones y unidades. Aquí les mostramos un ejemplo.

Luego de muchas convenciones internacionales, el Sistema Métrico ahora se denomina Sistema Internacional de Unidades (SI). En México lo establece como el único legal y de uso obligatorio la Norma Oficial Mexicana NOM-008-SCFI-1993. Es el Sistema General de Unidades de Medida, según lo dispone el artículo 5 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización.

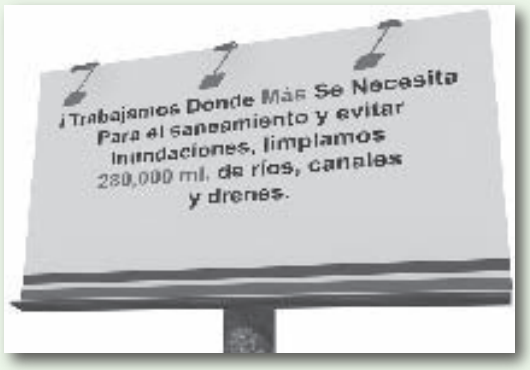


Figura 2.1 *Anuncio donde se evidencia la omisión de los lineamientos establecidos por el SI*

A pesar de tener tanto tiempo vigente, los puntos básicos del Sistema Internacional son ignorados por muchos funcionarios, periodistas y comunicadores, y aun por profesionales de la ingeniería. Las convenciones contables administrativas (como el uso de la coma para separar enteros de más de tres cifras), han tenido más difusión y autoridad que la norma del SI. Como una muestra de muchos casos en que se desconoce la norma (SI), un anuncio gigante en las afueras de Zamora, Michoacán, proclama que las autoridades han limpiado "280,000 ml. de ríos, canales y drenes". Conforme al SI —la norma es muy clara: la coma (,) sólo debe emplearse para separar decimales— se han limpiado 280 ml (media botella de refresco) de [agua de] ríos, canales y drenes. Pero, aunque los tres ceros valieran, y fueran 280 000, la unidad ml (sin punto, como todas las unidades del SI) indica mililitros (el volumen llegaría a 280 litros, como el de un tinaco chico). Más allá del humor, es bastante alarmante el desconocimiento de esa información indispensable acerca del Sistema Internacional vigente desde hace un siglo y medio, y de la norma legal mexicana.

En la internet encontramos la información necesaria. Por ejemplo, se puede descargar un documento completo del Centro Nacional de Metrología sobre el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Otros sitios con documentos sobre el SI:

- Documentos en el Bureau International des Poids et Mesures.
- Sistema Internacional en Norma Oficial Mexicana NOM-008-SCFI-2002, puede ser consultada en línea en el sitio de la DGN.

Por: Óscar González

¿Realmente tienen importancia las unidades de medida?

Jueves, 16 de agosto de 2007

El 23 de septiembre de 1999, la sonda espacial *Mars Climate*, enviada por la NASA para mantenerse en órbita marciana y estudiar el clima de ese planeta se estrelló en Marte y quedó completamente destruida. Según fuentes de la NASA, el desastre fue debido a un error en la conversión al Sistema Internacional de Unidades (SI) de los datos que se habían suministrado al ordenador de a bordo.

La sonda espacial *Mars Climate Observer* fue construida con el fin de convertirse en un satélite del planeta Marte y así poder estudiar la atmósfera y la superficie del planeta rojo. Además, debía proporcionar información y servir de estación de comunicaciones para apoyar la aproximación y el "aterrizaje" en Marte de la misión *Mars Polar Lander*. Para todo ello, la sonda *Mars Climate* fue lanzada con un cono global que se valora en unos 125 millones de dólares.

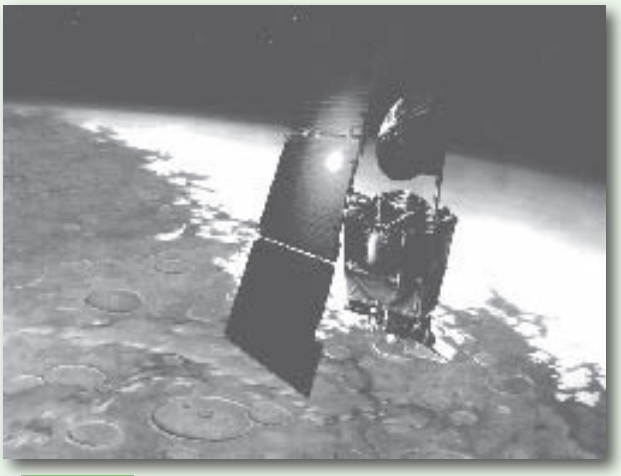


Figura 2.2 *Imagen del Mars Climate (cortesía de la NASA).*

¿Por qué ha ocurrido el desastre? Según los datos que ha proporcionado la NASA, en la construcción, la programación de los sistemas de navegación y el lanzamiento de la sonda espacial participaron varias empresas. En concreto la Lockheed Martin Astronautics de Denver fue la empresa encargada de diseñar y construir la sonda espacial, mientras que la Jet Propulsion Laboratory de Pasadena fue la responsable de programar los sistemas de navegación de la sonda. Pero resulta que los dos laboratorios de estas empresas no trabajan de la misma manera, el primero de ellos realiza sus medidas y proporciona sus datos con el sistema anglosajón de unidades (pies, millas, libras, ...), mientras que el segundo utiliza el Sistema Internacional de Unidades (metros, kilómetros, kilogramos, ...). Así, parece que el primero de ellos realizó los cálculos correctamente utilizando el sistema anglosajón y lo envío al segundo, pero los datos que proporcionó iban sin especificar las unidades de medida utilizadas (igrave error!), de tal forma que el segundo laboratorio utilizó los datos numéricos que recibió pero los interpretó como si estuvieran medidos en unidades del Sistema Internacional. El resultado fue que los ordenadores de la nave realizaron los cálculos de aproximación a Marte de una forma errónea, por lo que la nave quedó en una órbita equivocada que provocó la caída sobre el planeta y su destrucción al chocar con la atmósfera marciana.

Vía: *El rincón de la Ciencia*

2.14 Bibliografía

Collieu, A. M. y P., D. J, *Propiedades Mecánicas y Térmicas de los Materiales*, Reverté, Madrid, 1988.

Dirección General de Normas, *Sistema Internacional de Unidades*, México, Economía, S. D., 2006.

Fogiel, M., *The Chemistry Problem Solver,* Research and Education Association, New Jersey, 2002.

García, T. G., *Generalidades sobre las Medidas,* Limusa, México, 1996.

Hayden, H. W., Moffat, W. G., Wolf, J., *Propiedades Mecánicas,* Limusa, México, 1980.

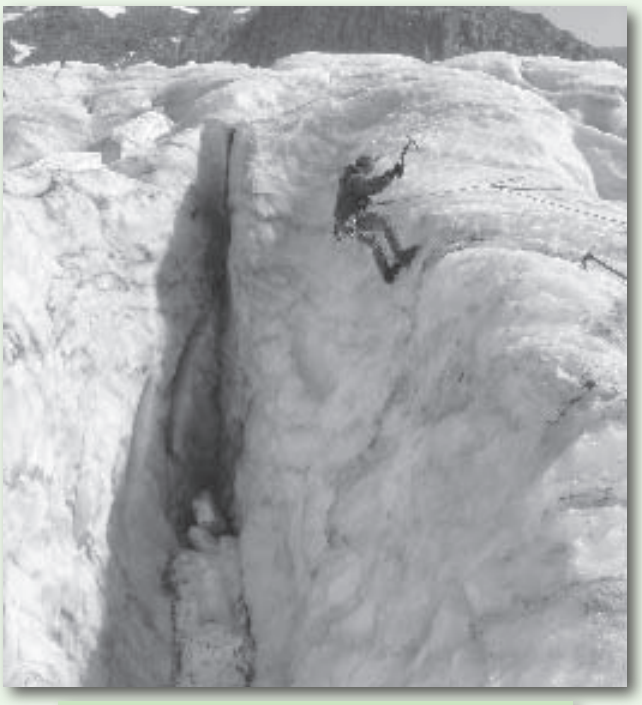
Metrología, C. N., *El Sistema Internacional de Unidades*, Querétaro, México, 2001.

Williams, T., *Historia de la Tecnología,* Editorial Siglo XXI, México, 1987.

Capítulo

3

Conceptos básicos usados en los procesos industriales y en la mezcla de gas sin reacción



Calentamiento global: científicos descubren nuevas fracturas en capa de hielo del Ártico (*Jupiter Images Corporation*)

3.1 Conceptos básicos

En esta sección se definirán conceptos básicos importantes que se utilizarán con regularidad en los capítulos sucesivos, los cuales servirán para establecer convenciones sobre las propiedades físicas comunes, su conveniente comprensión y su aplicación en la resolución de los problemas planteados más adelante.

En este capítulo se observará la aplicación de algunos de los principales conceptos básicos y su metodología correspondiente; mientras que en capítulos posteriores se comprobará su aplicación general. Algunos de los conceptos que se tratarán son los siguientes:

- Temperatura.
- Densidad.
- Peso específico y peso relativo.
- Volumen específico.
- Mol.
- Concentración.
- Presión.
- Gasto volumétrico.
- Gasto másico.

3.2 Temperatura y escalas de temperaturas

En general, se puede definir a la temperatura como una medida de la energía calorífica contenida en los cuerpos; en el desarrollo de la definición y la comprensión del concepto de temperatura, es importante recalcar la influencia que han tenido las propiedades de la materia como artífices en la elaboración de los instrumentos de medición, entre los que se pueden mencionar: los termómetros de expansión de mercurio, los termopares y los pirómetros. Como sucede a menudo, los estudios de muchos investigadores dieron la pauta a los trabajos que originaron la medición y el concepto de temperatura (véase tabla 3.1).

Derivadas de estos estudios, se reconocen cuatro escalas principales de medición de temperaturas: Celsius (°C), Fahrenheit (°F), Kelvin (K) y Rankine (°R); las dos primeras se definen con base en las propiedades de una sustancia de referencia y las dos últimas con base en las propiedades termodinámicas de la materia (véase tabla 3.2).

La relación lineal entre las escalas de temperaturas Celsius, Fahrenheit y Kelvin es evidente (véase figura 3.1).

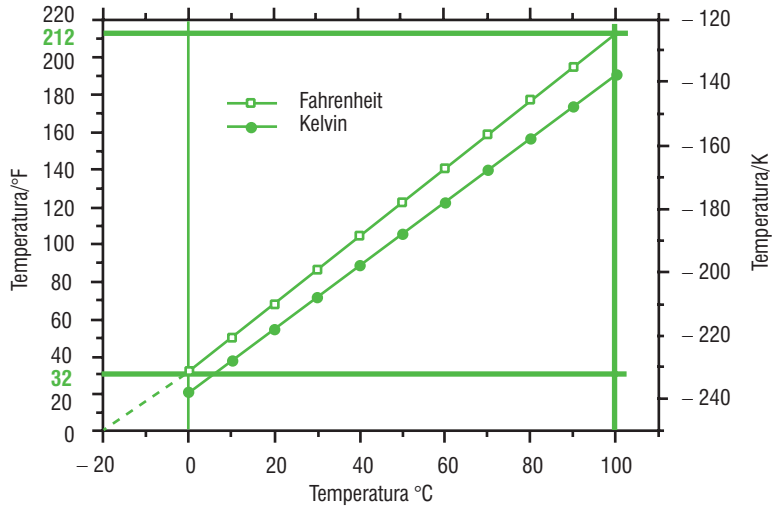


Figura 3.1 *Relación lineal entre las escalas de temperatura Fahrenheit, Celsius y Kelvin.*

Tabla 3.1. Desarrollo histórico de la medición de temperaturas.

Año	Inventor u organismo	Propiedad física utilizada
170	Galeno	Ebullición del agua
1610	Galileo	Termoscopio, variación de una columna de aire respecto a un tubo conteniendo un líquido
1641	Ferdinand II	Termómetro sellado, utiliza líquido (alcohol), en lugar de aire
1664	Hook	Escala en función del volumen de un líquido coloreado (alcohol)
1689	Amontons	Termómetro de aire, incluye mercurio en lugar del agua
1702	Ole Roemer	Dos puntos fijos, nieve o hielo comprimido y el punto de ebullición del agua
1724	Fahrenheit	Mercurio como líquido termométrico, tomando como referencia los puntos de ebullición y congelamiento del agua
1745	Linneo de Upsala	Primera escala centígrada, punto de ebullición del agua (0 ºC) y de congelamiento (100 ºC)
1742	Celsius	Punto de ebullición del agua (100 ºC) y de congelamiento (0 ºC)
1780	Charles	Estudio de la expansión de los gases
1826	Seebek	Estudios de pares metálicos con la temperatura
1848	Thomson	Establece el valor de la temperatura termodinámica (–273,16 ºC)
1871	Siemens	Estudios sobre la resistencia metálica y su influencia con la temperatura
1887	Chappuis	Termómetros de gas con presión o volumen constante usando hidrógeno, nitrógeno y bióxido de carbono como medios termométricos
1933	Comité Internacional de Pesas y Medidas	Establecimiento de la escala Kelvin
1948		El grado centígrado fue reemplazado por el grado Celsius
1968	Escala internacional de temperaturas prácticas	Referencias primarias para la medición de temperatura
1990	Comité Internacional de Pesas y Medidas	Establecimiento de estándares para las escalas de temperaturas

Tabla 3.2. Escalas de medición de temperaturas y puntos de referencia.

Escala de temperatura	Sistema de unidades	Punto de referencia	
		Mezcla de hielo y agua pura	Agua en ebullición*
Celsius (ºC)	Internacional (SI)	0 ºC	100 ºC
Kelvin (K)		273 K	373 K
Fahrenheit (ºF)	Americano de ingeniería (FPS)	32 ºF	212 ºF
Rankine (°R)		491.6 °R	671.6 °R

* Presión = 1 atm

El análisis entre las escalas de temperatura indica las siguientes relaciones:

0 °C = 273 K

273 K = 491,6R $\qquad \dfrac{491{,}6\,R}{180 \text{ partes}} = \dfrac{273}{100 \text{ partes}}$

100 °C = 373 K

373 = 671,6R $\qquad \dfrac{671{,}6}{180 \text{ partes}} = \dfrac{373}{100 \text{ partes}}$

A partir de las expresiones anteriores, es posible derivar una serie de fórmulas que permiten efectuar las conversiones entre una y otra escala de temperatura (véase tabla 3.3).

Tabla 3.3. Relaciones entre escalas de temperatura.

Conversión		Fórmula
De grados	A grados	
Celsius	Kelvin	K = °C + 273
Kelvin	Celsius	°C = K – 273
Celsius	Fahrenheit	°F = 9/5 °C + 32 °F = 1,8 °C + 32
Fahrenheit	Celsius	°C = 5/9 (°F – 32) °C = (°F – 32)/1,8
Rankine	Fahrenheit	°F = R – 459,6
Rankine	Celsius	°C = (R – 491,6)/1,8
Fahrenheit	Rankine	°R = 460 – °F

Ejemplo 1

Aplicando las fórmulas para expresar las diferentes escalas de temperatura, observe la resolución al siguiente ejercicio:

La temperatura corporal promedio de un adulto es de 37 °C, calcular su equivalencia en °F y °R con las fórmulas correspondientes:

Solución:

Fórmula: °F = 1,8 °C + 32, entonces: °F = 1,8 (37 °C) + 32 = 98,6 °F

Fórmula: °R = 460 – °F, entonces °R = 460 – 98,6 °F = 361,4 °R

3.3 Densidad

La relación entre la masa por unidad de volumen se expresa a través de la **densidad**, ésta es una propiedad intensiva (es decir, una propiedad que no depende de la cantidad de masa) característica de la materia, ya que permite identificar distintas sustancias; la masa y el volumen, en cambio, son propiedades generales o extensivas (es decir, que éstas dependen de la

cantidad de materia). La densidad puede calcularse de forma directa midiendo, de manera independiente, la masa y el volumen de una muestra y empleando la siguiente relación:

$$\text{Densidad} = \frac{\text{masa}}{\text{Volumen}} \qquad \therefore \qquad \rho = \frac{m}{V}$$

De esta forma, un objeto pequeño y pesado, como una piedra o un trozo de plomo, es más denso que un objeto grande y liviano, como un corcho o una cantidad determinada de espuma. Algunos ejemplos de unidades de densidad son: kg/m^3, lb/ft^3, g/cm^3, g/gal, lb/ft^3, g/L. Esta propiedad es conocida también como densidad absoluta, para diferenciarla de la densidad relativa o aparente que indica el cociente entre la densidad de la sustancia y la de una sustancia de referencia, generalmente agua o aire; la densidad relativa es una magnitud adimensional.

La unidad de medida $\frac{kg}{m^3}$ es muy poco usada, ya que es demasiado pequeña; para el agua a 1 atm y 4 °C, por ejemplo, 1 kg ocupa un volumen de 1 L, es decir 0,001 m^3, y la densidad será igual a:

$$\text{densidad}_{H_2O} = \frac{1\ kg}{1\ L} = \frac{1\ kg}{0{,}001\ m^3} = 1000\ \frac{kg}{m^3}$$

La mayoría de las sustancias líquidas tiene densidades similares a las del agua, por lo que, de usar esta unidad, se estarían empleando números muy grandes; para evitarlo, suele emplearse otra unidad de medida: el gramo por centímetro $\frac{g}{cm^3}$ de esta forma, la densidad del agua a 1 atm y 4 °C será (véase figura 3.2):

$$\text{densidad}_{H_2O} = \frac{1\ kg}{1\ L} = \frac{1000\ g}{1\ dm^3} = \frac{1000\ g}{1000\ cm^3} = 1\ \frac{g}{cm^3}$$

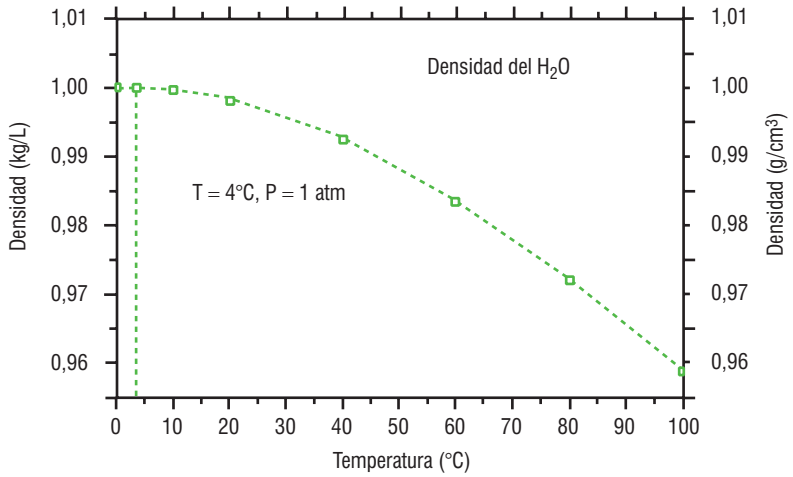


Figura 3.2 *Comportamiento de la densidad del agua con respecto a la temperatura.*

Los valores de la densidad en $\frac{g}{cm^3}$ son mucho más pequeños y fáciles de usar; además, para pasar de una unidad a otra basta con multiplicar o dividir por mil.

La densidad de los líquidos y la densidad de los sólidos no cambian significativamente con la presión, pero sí con la temperatura y la composición; asimismo, la densidad varía desde valores pequeños para los gases hasta valores grandes para los sólidos, como se puede apreciar en la figura 3.3.

Algunos elementos son, por naturaleza, muy densos. Una de las demostraciones de este concepto es la de un objeto menos denso flotando en un líquido más denso, esto sucede cuando determinados objetos son colocados dentro de un envase con mercurio, ya que este elemento es un metal líquido a temperatura ambiente (el cual es muy denso; de hecho, es más denso que el plomo), y algunos objetos metálicos como un tenedor, monedas e inclusive balas, pueden flotar en éste.

Para un material homogéneo, la fórmula $\frac{\text{masa}}{\text{volumen}}$ puede aplicarse en general. En cambio, para el caso de un objeto heterogéneo, dicha fórmula tiene el problema de que la densidad de las distintas partes del objeto son diferentes, entonces, se puede medir la "densidad media", aplicando la $\frac{\text{masa}}{\text{volumen}}$ a todo el objeto, o la "densidad puntual", que será distinta en cada punto del objeto. En esta variante, la fórmula se aplica a cada porción del objeto que sea homogénea, es decir, a cada fase.

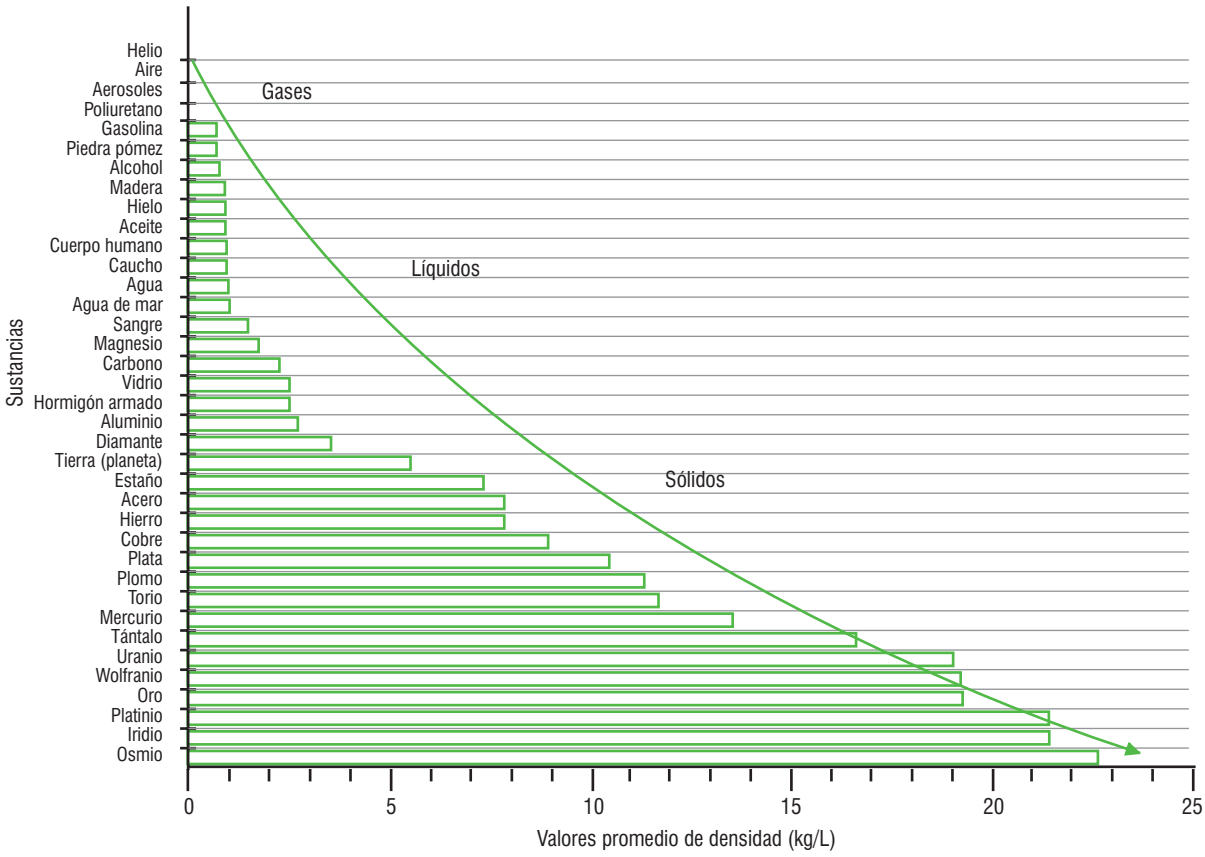


Figura 3.3 *Comportamiento de la densidad de algunas sustancias en los tres estados de agregación.*

Por ejemplo, si se considera la densidad en cada punto, un vaso con agua es un objeto con dos fases: ya que la densidad es distinta en el agua y en el vidrio. La densidad media, en cambio, es una sola para todo el objeto; para el caso del vaso con agua ésta es intermedia entre la densidad del agua y la del vidrio.

La densidad media de un material no es una propiedad intrínseca y depende de la forma en la cual el material haya sido tratado: si está en granos o bien en polvo ocupará más espacio que si se encuentra en una forma compacta.

Para observar la periodicidad de los valores de la densidad de los elementos, éstos deben considerarse en un mismo estado físico. En cada periodo, las densidades comienzan con valores pequeños, correspondientes a los metales alcalinos, que aumentan hacia el centro del periodo, alcanzando los valores máximos en los grupos 8, 9 y 10, y luego descienden, con alguna irregularidad, hacia los grupos 17 y 18, aun sin llegar a la pequeñez que presentaban en los elementos del primer grupo, los valores más altos de la densidad corresponden a los elementos de transición (véase figura 3.4).

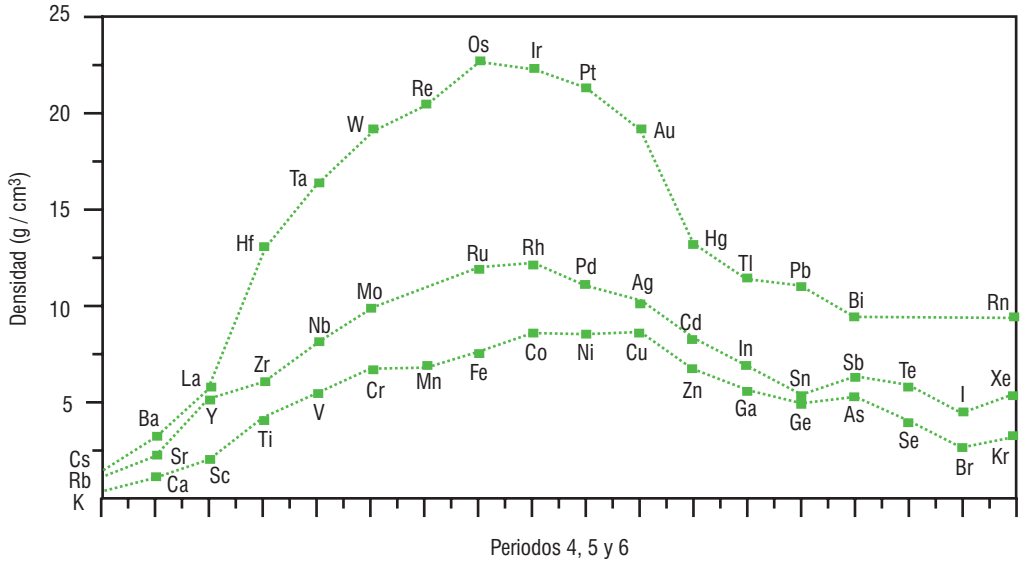


Figura 3.4 *Curvas de los valores de las densidades de los periodos 4, 5 y 6 de la tabla periódica larga (Kr, Xe y Rn se consideran sólidos).*

En general, la densidad de un material varía al cambiar la presión o la temperatura, lo cual se puede demostrar utilizando la termodinámica, puesto que al aumentar la presión debe aumentar la densidad de cualquier material estable. En cambio, si se aumenta la temperatura por lo regular decrece la densidad de los materiales.

Por otro lado, la densidad de los gases es fuertemente afectada por la presión y la temperatura. Para explicar esta variación, la ley de los gases ideales describe matemáticamente la relación entre estas tres magnitudes:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{P\,PM}{R\,T}$$

donde R es la constante universal de los gases ideales, P es la presión del gas, PM es su peso molecular y T es la temperatura absoluta (más adelante se tratará este concepto).

3.4 Peso específico y peso específico relativo

El peso específico de una sustancia (*Pe*) es el peso por unidad de volumen, éste se obtiene dividiendo un peso conocido de la sustancia entre el volumen que ocupa:

$$Pe = \frac{p}{V}$$

donde p es peso y V es volumen. Las unidades en el SI es el N/m^3.

El peso específico y la densidad son, evidentemente, magnitudes distintas, como se ha podido comparar por las definiciones que se citaron anteriormente, pero entre éstas hay una relación estrecha. Como se recordará, el peso de un cuerpo es igual a su masa por la aceleración de la gravedad:

$$P = m \cdot g$$

pues bien, sustituyendo esta expresión en la definición del peso específico y recordando que la densidad es la $\frac{\text{masa}}{\text{volumen}}$ queda:

$$Pe = \frac{\text{peso}}{\text{volumen}} = \frac{\text{masa} \times \text{gravedad}}{\text{volumen}} = \text{densidad} \times \text{gravedad}$$

Como se ha mencionado, la unidad clásica de densidad $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$ tiene la ventaja de proporcionar valores pequeños y fáciles de utilizar, lo mismo puede decirse $\frac{kp}{cm^3}$ como unidad de peso específico, con la ventaja de que numéricamente los valores de peso específico en $\frac{kp}{cm^3}$ coinciden con los de la densidad expresada $\frac{g}{cm^3}$.

El kp o kilopondio es el peso del prototipo kilogramo patrón en Postdam (Alemania), punto de la Tierra en que por convenio la aceleración de la gravedad tiene el valor normal ($g = 9{,}812\ ms^{-2}$).

El peso específico relativo (*Per*) es el cociente de dos densidades: la de la sustancia de interés *A* y la de una sustancia de referencia, cada una de las cuales tiene sus unidades asociadas:

$$Per = \text{peso específico relativo} = \frac{\left(g / cm^3\right)_A}{\left(g / cm^3\right)\text{ref}}$$

Cabe hacer notar que el peso específico relativo es equivalente a la densidad relativa definida anteriormente.

La sustancia de referencia, en el caso de los líquidos y los sólidos, normalmente es el agua. Así, el peso específico relativo es el cociente entre la densidad de la sustancia en cuestión y la densidad del agua. Para el caso de los gases, con frecuencia se toma como referencia el aire, para ser más precisos al referirse al peso específico relativo, se debe indicar la temperatura a la que se mide cada una de las densidades, tal como se muestra a continuación:

$$Per = 0{,}73\ \frac{20\ ^\circ C}{4\ ^\circ C}$$

lo anterior se puede interpretar como sigue: el peso específico relativo cuando la solución está a 20 °C y la sustancia de referencia (agua) está a 4 °C es de 0,73. Como es conocido, la densidad del agua a 4 °C es muy cercana a 1,0000 g/cm^3, por lo que los valores numéricos de la densidad y del peso específico relativo en el SI son prácticamente iguales.

En la industria petrolera, el peso específico relativo de los productos del petróleo suele informarse en términos de una escala de hidrómetro llamada °API. Para expresar la densidad de los hidrocarburos líquidos, calculada de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\text{grados API} = \frac{141{,}5}{\text{densidad relativa}} - 131{,}5$$

La densidad relativa de la fórmula corresponde al cociente de la densidad del líquido, y la densidad del agua, medidas, ambas, a una temperatura de 60 °F.

3.5 Volumen específico

El volumen específico de un compuesto es el recíproco de la densidad, es decir, el volumen por unidad de masa o cantidad de material a una temperatura dada, generalmente 21 °C o 70 °F. En el caso de los gases, el volumen es afectado de manera importante por la temperatura y la presión.

Las unidades de volumen específico se enuncian en unidades de volumen por unidades de masa: $\frac{m^3}{kg}, \frac{ft^3}{lb}$, su expresión matemática está dada por:

$$Ve = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}$$

3.6 Concepto de mol

Anteriormente, el mol (en algunos países llamado "la mol") se definía como el peso molecular de una sustancia expresado en gramos. En la actualidad, y aunque esto no es obvio en la forma de expresar la unidad, se aplica el término a una magnitud que contenga $6{,}023 \times 10^{23}$ (número de Avogadro) de las unidades consideradas y por eso se puede hablar de un mol de átomos, de iones, de radicales, de electrones. Así pues, cuando se emplea el mol, deben especificarse las entidades elementales empleadas, las cuales pueden ser átomos, moléculas, iones, electrones, otras partículas o grupos especificados de tales partículas.

El Comité Internacional de Pesas y Medidas propuso en 1969, al aprobar al mol como unidad de cantidad de masa, la siguiente definición de mol:

> *…la cantidad de una sustancia que contiene tantas entidades elementales como átomos hay en 0,012 kg de carbono 12.*

Las entidades pueden ser átomos, moléculas, iones u otras partículas.

En el Sistema Internacional de unidades (SI), un mol se compone de $6{,}023 \times 10^{23}$ moléculas, aunque, por conveniencia en los cálculos, se pueden utilizar otras especificaciones como el kg mol (kilomol o kmol, compuesto por 1 000 moles), la libra mol (lb mol, compuesta por $6{,}023 \times 10^{23} \times 453{,}6$ moléculas), y así sucesivamente.

Si se quiere convertir el número de moles en masa, se utiliza el peso atómico o molecular, que es la masa de un mol:

$$\text{mol} = \frac{\text{masa en gramos}}{\text{peso molecular}}$$

$$\text{lb} = \frac{\text{masa en libras}}{\text{peso molecular}}$$

otra manera de expresarse es:

$$\text{masa en gramos} = (\text{peso molecular})\ (\text{mol})$$

$$\text{masa en libras} = (\text{peso molecular})\ (\text{lb mol})$$

Se pueden realizar cálculos en términos de toneladas mol, kilogramos mol u otras unidades correspondientes si se definen de manera análoga, aunque no sean unidades estándar.

Los valores de los pesos moleculares (masas moleculares relativas) se derivan de las tablas de pesos atómicos, los cuales se basan en una escala arbitraria de las masas relativas de los elementos.

3.7 Concentración

La concentración es definida como la cantidad de un soluto en una cantidad especificada de disolvente, o de disolución, en una mezcla de dos o más componentes:

$$\text{Concentración} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} = \left[\frac{\text{mol}}{\text{L}}\right] = M$$

Muchos procesos industriales son efectuados en solución, ya que así es fácil medir volúmenes con exactitud, y cuando se disuelve un peso conocido de una sustancia en un volumen dado de solución, una fracción medida del volumen total contendrá la correspondiente fracción de la sustancia.

Las soluciones que contienen un número conocido de moles de sustancia por unidad de volumen pueden mezclarse en volúmenes, de tal manera que se dé la razón adecuada de moles requerida por la reacción química o proceso. La concentración es una propiedad intensiva de una mezcla que se asemeja a la densidad, debido a que ambas relacionan la masa y el volumen y, en consecuencia, se expresan en unidad de masa por unidad de volumen; por ejemplo g/L, lb/ft^3, kg/m^3, etcétera. Sin embargo, la densidad de una solución indica la masa de ésta contenida en una unidad de volumen, en tanto que la concentración indica que la masa de un componente de la solución está presente por unidad de volumen.

Ejemplo:

Una solución acuosa de hidrógeno de sodio cuya concentración es de 500 g/L tiene una densidad de 1,47 kg/L. Estas propiedades indican que 1 L de solución contiene 500 g de NaOH, y que 1 L de solución pesa 1,47 kg. La diferencia entre la masa de la solución y la masa de NaOH es la masa de agua.

NaOH		500 g	
+ Agua	+	970 g	
Solución		1 470 g	1,47 kg = 1 470 g

3.8 Presión

La presión es una referencia de la acción de una fuerza sobre la unidad de superficie, y el pascal (*Pa*) es la unidad resultante de utilizar las unidades prescritas en el Sistema Internacional para la fuerza (newton) y la superficie (m^2). En la siguiente relación se muestra la ecuación y sus unidades dimensionales:

$$\text{presión (Pa)} = \frac{\text{fuerza (N)}}{\text{superficie (m}^2\text{)}}$$

pero también se puede expresar en bar, atmósferas, kilogramos por centímetro cuadrado y psi (libras fuerza por pulgada cuadrada).

Como el pascal es una unidad muy pequeña, también se emplean el kilopascal (1 k Pa = 10^2 bar), el megapascal (1 M Pa = 10 bar) y el gigapascal (1 G Pa = 10 000 bar); por su parte, en la industria también se utiliza el bar (1 bar = 10^5 Pa = 1,02 kg_f/cm^2).

En una empresa cuando alguien dice que la presión de un neumático es de "2 kilos", se está refiriendo a la unidad kp/cm^2 ($kp = kg_f$), la cual equivale a 98 000 Pa.

Un concepto importante es la presión atmosférica, que es el peso de la capa de aire que actúa sobre todos los cuerpos que se encuentran en la Tierra, ésta es numéricamente igual al peso de una columna de aire que tiene como base la unidad de superficie y como altura la de la atmósfera. Para medir la presión atmosférica, Torricelli empleó un tubo largo cerrado por uno de sus extremos, lo llenó de mercurio y le dio la vuelta sobre una vasija de mercurio. El mercurio descendió hasta una altura $h = 0{,}76$ m a nivel del mar, dado que el extremo cerrado del tubo se encuentra casi al vacío ($P = 0$), y sabiendo que la densidad del mercurio es 13,55 g/cm^3 o 13 550 kg/m^3, puede determinarse el valor de la presión atmosférica, a nivel del mar o a alturas próximas a éste. El valor de la presión es cercano a 14,7 $lb/pulg^2$ (101,35 k Pa), disminuyendo estos valores con la altitud.

El tubo del barómetro es cilíndrico; si la base o la sección circular mide 1 cm^2, el volumen del mercurio contenido en el tubo será:

$$\text{Volumen}_{\text{cilindro}} = \text{área del barómetro} \times \text{altura} = 1\ \text{cm}^2 \times 76\ \text{cm} = 76\ \text{cm}^3,$$

y como cada cm^3 de mercurio pesa 13,6 g se tiene:

$$\text{masa del mercurio} = 76\ \text{cm}^3 \times 13{,}6\ \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 1\,033{,}6\ \text{g}$$

(que equivale a 1 kg aproximadamente).

La primera unidad que se empleó para medir la presión atmosférica fue el milímetro de mercurio (mm Hg), en razón de que en la experiencia de Torricelli la presión barométrica está directamente relacionada con la altura de la columna de mercurio dentro del tubo. El peso de la columna de mercurio permite equilibrar la presión ejercida por la atmósfera. A nivel del mar se tiene una presión de 1 atmósfera, que es equivalente a 760 mm Hg.

El dispositivo ideado por Torricelli para medir la presión atmosférica se conoce como barómetro (que se deriva de las palabras griegas *baros*: presión y *metron*: medida).

En este caso, la fuerza se correspondería con el peso (mg) de la columna de mercurio, por lo que se puede indicar con la siguiente ecuación:

$$\text{Presión} = \frac{\text{masa} \times \text{gravedad}}{\text{superficie}}$$

al expresarse la masa como el producto de la densidad por el volumen; si se sustituye se tiene:

$$\text{Presión} = \frac{\text{densidad} \times \text{volumen} \times \text{gravedad}}{\text{superficie}}$$

y dado que el volumen es el producto de la superficie de la base por la altura, se obtiene:

$$\text{Presión} = \frac{\text{densidad} \times \text{volumen} \times \text{altura} \times \text{gravedad}}{\text{superficie}}$$

y simplificando

$$\text{Presión} = \text{densidad} \times \text{gravedad} \times \text{altura},$$

que nos permite calcular la presión en función de la densidad del líquido contenido en el tubo, la intensidad del campo gravitatorio y la altura de la columna. Algunas veces se utiliza una columna de agua, en lugar de la del mercurio, para efectuar cálculos de presión; como 1 cm^3 de agua pesa 1 g, o sea 13,6 veces menos que el mercurio, para obtener el mismo peso que el de la columna barométrica de mercurio se necesitará, por tanto, una columna 13,6 veces mayor, o sea: 76 cm × 13,6 = 1 033 cm ≈ 10 m.

La expresión deducida anteriormente permite calcular la presión ejercida por un fluido en reposo debido a su peso. Esta presión, denominada presión hidrostática, provoca una fuerza (F) perpendicular a las paredes del recipiente que contiene el fluido o a las paredes del objeto sumergido en el mismo. La presión hidrostática sólo depende de la densidad del fluido y de la profundidad o altura, debido a que la aceleración de la gravedad (g) se puede considerar constante e igual a 9,8 m/s^2 en cualquier parte de la Tierra.

Como la densidad de los gases es muy pequeña, la presión hidrostática es inapreciable para pequeñas alturas de gas; en cambio, es muy importante en los líquidos, entre mayor sea su densidad mayor será la presión hidrostática que ejercen. La densidad del mercurio es 13,6 veces mayor que la del agua, por eso, si llenamos dos recipientes iguales con agua y con mercurio, respectivamente, la presión en el fondo será 13,6 veces mayor en el recipiente que contiene mercurio.

La presión manométrica se mide por medio de un instrumento que mide la diferencia entre la presión que es desconocida y la presión atmosférica existente, si el valor absoluto de la presión es constante y la presión atmosférica aumenta, la presión manométrica disminuye; esta diferencia generalmente es pequeña, así que en las mediciones de presiones muy elevadas, dicha diferencia es insignificante. Es evidente que el valor absoluto de la presión puede obtenerse adicionando el valor real de la presión atmosférica a la lectura del manómetro (véase figura 3.5).

Cuando la presión desconocida es superior a la atmosférica, la presión manométrica es positiva. Sin embargo, para presiones inferiores a la atmosférica la presión manométrica sería negativa. Para evitar manejar presiones manométricas negativas se introduce el concepto de vacío.

Las presiones de vacío se miden mediante los mismos tipos de instrumentos con que se miden las presiones superiores a la atmosférica, es decir, por diferencia entre el valor desconocido y la presión atmosférica existente; los valores que corresponden al vacío aumentan al acercarse al cero absoluto y, por lo general, se expresan en centímetros de mercurio (cm Hg) o metros de agua (m H_2O) de vacío.

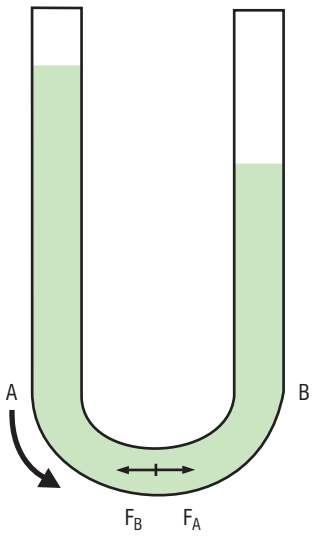


Figura 3.5 *Al ser mayor la altura del líquido en la rama izquierda, la presión pA en el fondo del tubo A es mayor que la presión pB en el fondo del tubo B, con lo cual la porción de líquido señalada (y cualquier otra porción de líquido) está sometida a una fuerza neta que la empuja hacia la derecha.*

La presión absoluta (P_{abs}) se define como la presión de un fluido medido con referencia al vacío perfecto o al cero absoluto. La presión absoluta es cero únicamente cuando no existe choque entre las moléculas, lo que indica que la proporción de moléculas en estado gaseoso o la velocidad molecular es muy pequeña. Este término se creó debido a que la presión atmosférica varía con la altitud, y muchas veces los diseños de los instrumentos se hacen en otros países, a diferentes altitudes sobre el nivel del mar, por lo que un término absoluto unifica criterios. La relación matemática que la define es:

$$\text{Presión absoluta} = \text{presión manométrica} + \text{presión atmosférica}$$

$$P_{abs} = P_{man} + P_{atm}$$

La presión suele medirse en atmósferas (atm); en el Sistema Internacional de unidades (SI), la presión se expresa en newton por metro cuadrado; un newton por metro cuadrado es un pascal (Pa). La atmósfera se define como 101,325 Pa, y equivale a 760 mm Hg en un barómetro convencional (véase tabla 3.4).

Tabla 3.4. Cuadro de equivalencias dimensionales.

Unidad	Equivalencia	Transformación de "x" unidades
1 atmósfera	760 mm Hg = 76 cm Hg	$x \text{ atm} \times \frac{760 \text{ mm Hg}}{1 \text{ atm}} = 760\ x \text{ mm Hg}$
	1,03 kp/cm^2	$x \text{ atm} \times \frac{1{,}03 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2}}{1 \text{ atm}} = 1{,}03\ x \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2}$
	101 300 Pa	$x \text{ atm} \times \frac{101\,300 \text{ Pa}}{1 \text{ atm}} = 101\,300\ x \text{ Pa}$

Las variaciones de la presión atmosférica se traducen siempre por la altura en las ramas del barómetro (subidas y descensos) de la columna de mercurio; cuando éste no indica ninguna diferencia particular entre las ramas, se entiende que la medición se ha hecho a nivel del mar o a presión atmosférica, ya que, de acuerdo con la fórmula anterior, la presión absoluta se convierte en la presión atmosférica del lugar. A medida que aumenta la altitud del lugar donde se toma la medición, la columna barométrica desciende, pues la capa de aire disminuye y, por tanto, su peso o presión es cada vez menor. Para lugares próximos al nivel del mar, se puede calcular el descenso barométrico en 1 mm por cada 10,5 m de ascenso; por ejemplo, la presión en la ciudad de México (2 240 m) es de 585 mm Hg, mientras que a nivel del mar es de 760 mmHg.

3.9 Viscosidad

Los **gases** y los **líquidos** tienen una propiedad conocida como viscosidad, la cual se puede definir como la **resistencia** a fluir, debido a los efectos combinados de la cohesión y la adherencia. La viscosidad se produce por el efecto de corte o deslizamiento resultante del **movimiento** de una capa de fluido respecto a otro, y es completamente distinta de la atracción molecular. Se puede considerar que la viscosidad es causada por la fricción interna de las moléculas, ésta se presenta tanto en gases ideales como en líquidos y gases reales. La viscosidad de la miel es mayor que la del agua.

Los líquidos presentan mucha menor tendencia al flujo que los gases y, en consecuencia, tienen coeficientes de viscosidad mucho más altos. Los coeficientes de viscosidad de los gases aumentan con la temperatura, en tanto que los de la mayoría de los líquidos disminuyen. Asimismo, se ha visto que los coeficientes de viscosidad de gases a presiones moderadas son esencialmente independientes de la presión; pero en el caso de los líquidos, el aumento en la presión produce un incremento de viscosidad.

La mayoría de los métodos empleados para la medición de la viscosidad de los líquidos se basa en las ecuaciones de Poiseuille o de Stokes. La ecuación de Poiseuille para el coeficiente de viscosidad de líquidos es:

$$\eta = \frac{\pi P r^4 t}{8LV}$$

donde:

η es la viscosidad,

V es el volumen del líquido,

t es el tiempo en el que fluye a través de un tubo capilar,

r es el radio,

L es la longitud y

P es la presión en dinas por centímetro cuadrado o tensión superficial.

El tiempo de flujo de los líquidos se mide, y puesto que las presiones son proporcionales a las densidades de los líquidos, éste se puede escribir como:

$$\left| \frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{\rho_1 t_1}{\rho_2 t_2} \right|$$

Las mediciones son realizadas en un viscosímetro de Ostwald. Una cantidad definida de líquido se introduce en el viscosímetro sumergido en un termostato y luego se hace pasar por succión al bulbo **B**, hasta que el nivel del líquido esté sobre una marca **a.** El líquido se deja escurrir el tiempo necesario para que su nivel descienda hasta una marca **b** y se mide con un cronómetro. El viscosímetro se limpia, luego se añade el líquido de referencia y se repite la operación. Con este procedimiento se obtienen t_1 y t_2, y la viscosidad del líquido se calcula con la ecuación anterior, éste es uno de los métodos más comunes usados en laboratorio.

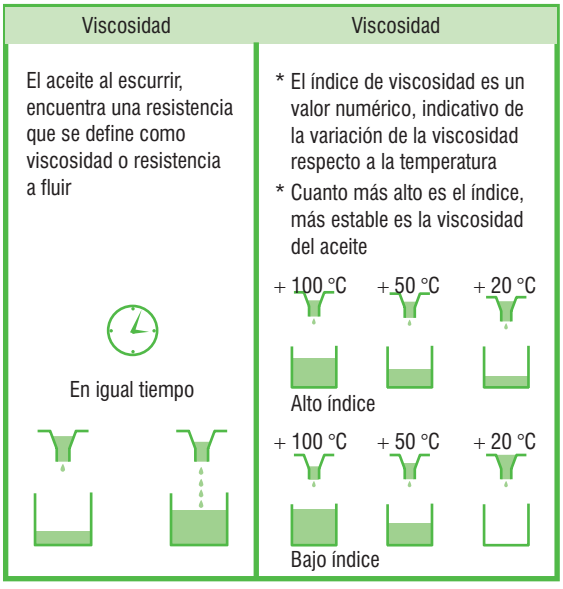


Figura 3.6 *Modelo de cómo se mide la viscosidad en un líquido.*

Los métodos de medición de la viscosidad de un flujo difieren dependiendo del flujo que se mide. Por ejemplo, un método empleado para medir la viscosidad de la pintura es tomando el tiempo del flujo de ésta a través de un embudo en forma de vaso; el tiempo que toma a la pintura fluir a través del embudo se relaciona con la viscosidad de la pintura (véase figura 3.6).

La viscosidad es importante en las pinturas, ya que las pistolas rociadoras de pintura requieren un grado de viscosidad específico para operar correctamente. Si la pintura está muy espesa, toma mucho tiempo en fluir hacia el embudo y de modo correspondiente resistirá el flujo a través de la boquilla de rocío.

Si la pintura es poco espesa, ésta fluye a través del embudo demasiado rápido y no proporcionará una cobertura de pintura adecuada. La medición de la viscosidad por medio de este método simple permite ajustar el valor de esta propiedad para obtener el acabado deseado.

Otro ejemplo similar al de la pintura es el método utilizado para medir la viscosidad del lubricante del motor, en el que se registra el tiempo que toma dicho lubricante en fluir a través de un pequeño tubo capilar (véase figura 3.7).

El efecto de la temperatura sobre la viscosidad de un líquido es notablemente diferente del efecto sobre un gas; mientras que en este último el coeficiente aumenta con la temperatura, las viscosidades de los líquidos disminuyen generalmente de manera marcada al elevarse la temperatura.

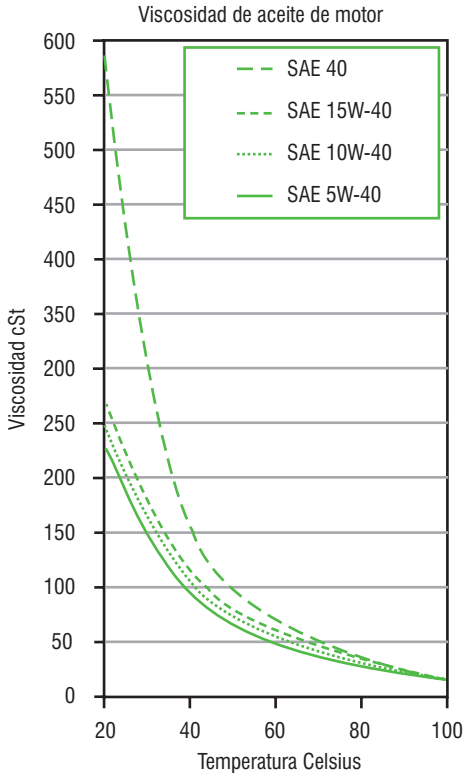


Figura 3.7 *Gráfica de la viscosidad de los aceites de motor y su cambio con la temperatura.*

3.10 Presión de vapor

La presión de vapor, o más comúnmente llamada presión de saturación, es la **presión a una temperatura dada, donde una sustancia en la fase líquida y su vapor se encuentran en equilibrio dinámico**; su valor es independiente de las cantidades de líquido y vapor presentes mientras existan ambas.

Este fenómeno también lo presentan los sólidos cuando un sólido pasa al estado gaseoso sin pasar por el estado líquido (proceso denominado "sublimación", o el proceso inverso llamado "deposición", en el cual también se produce una presión de vapor). En la situación de equilibrio líquido-vapor las fases reciben la denominación de líquido saturado y vapor saturado.

Esta propiedad posee una relación inversamente proporcional con las fuerzas de atracción intermoleculares, debido a que cuanto mayor sea la atracción entre éstas, mayor será la energía requerida (ya sea en forma de calor u otra manifestación) para vencerlas y producir el cambio de estado.

Un líquido no tiene que ser calentado a su punto de ebullición antes de que pueda convertirse en un gas. El agua, por ejemplo, se evapora de un envase abierto a la temperatura ambiente (20 °C), aunque su punto de ebullición es 100 °C.

Podemos explicar esto con el diagrama que se observa en la figura 3.8. La temperatura de un sistema depende de la energía cinética media de sus partículas.

A temperaturas muy por debajo del punto de ebullición, algunas de las partículas se mueven tan rápidamente que pueden escaparse del líquido. Cuando sucede esto, la energía cinética media del líquido disminuye. En consecuencia, el líquido debe estar más **frío**. Por tanto, absorbe energía de sus alrededores hasta que vuelve al equilibrio térmico. Pero tan pronto como suceda esto, algunas de las molécu-

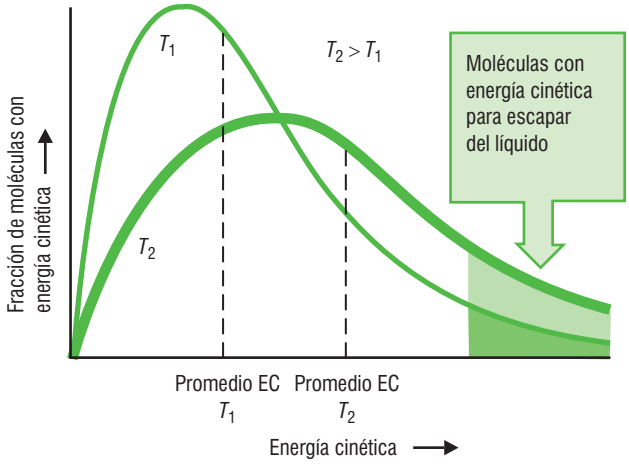


Figura 3.8 *Energía cinética y presión de vapor.*

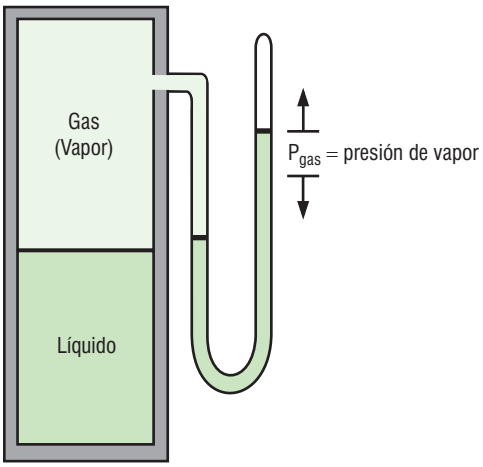


Figura 3.9 *La presión del vapor de un líquido es literalmente la presión del gas (o del vapor) que recoge sobre el líquido en un envase cerrado a una temperatura dada.*

las de agua logran tener nuevamente bastante energía para escaparse del líquido. Así, en un envase abierto, este proceso continúa hasta que toda el agua se evapora.

En un envase cerrado, algunas de las moléculas se escapan de la superficie del líquido para formar un gas, como se muestra en la figura 3.9. La tasa a la cual el líquido se evapora para formar un gas llega a ser finalmente igual a la tasa a la cual el gas se condensa para formar líquido. En este punto, se dice que el sistema está en equilibrio. El espacio sobre el líquido se satura con el vapor de agua, y así no se evapora más agua.

A la presión del vapor de agua en un envase cerrado en equilibrio se le llama presión de vapor. La teoría cinética molecular sugiere que la presión de vapor de un líquido depende de su temperatura. La figura 3.10 muestra la fracción de moléculas que poseen una energía cinética determinada, la fracción de las moléculas que tienen bastante energía para escaparse del líquido aumenta con la temperatura del líquido. En consecuencia, la presión de vapor de un líquido también aumenta con la temperatura. La figura 3.10 muestra que la relación entre la presión de vapor y la temperatura no es lineal. La presión del vapor del agua se incrementa más rápidamente que la temperatura del sistema.

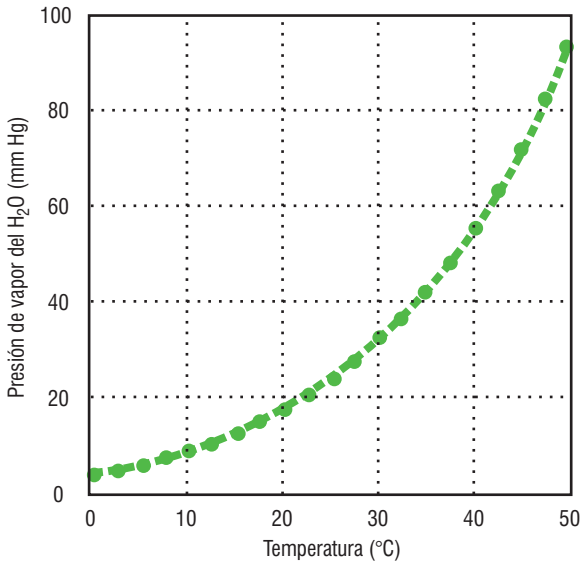


Figura 3.10 *Presión de vapor del agua.*

Imaginemos un tubo de cristal en el cual se ha realizado el vacío y que se mantiene a una temperatura constante; si introducimos una cierta cantidad de líquido en su interior, éste se evaporará rápidamente al principio hasta que se alcance el equilibrio entre ambas fases.

A medida que la cantidad de vapor aumenta y, por tanto, la presión en el interior del tubo se va incrementando, también se incrementa la velocidad de condensación, hasta que transcurrido un cierto tiempo ambas velocidades, la de evaporación y la de condensación, se igualan. Llegados a este punto, se habrá alcanzado la presión máxima posible en el tubo

(presión de vapor o de saturación) que no podrá superarse salvo que se incremente la temperatura, con lo que se obtendría vapor sobrecalentado.

El **equilibrio dinámico** se alcanzará más rápidamente cuanto mayor sea la superficie de contacto entre el líquido y el vapor, pues así se favorece la evaporación del líquido; del mismo modo que un charco de agua extenso, pero de poca profundidad, se seca más rápido que uno más pequeño pero de mayor profundidad que contenga igual cantidad de agua. Sin embargo, el equilibrio se alcanza en ambos casos a la misma presión.

El factor más importante que determina el valor de la presión de saturación es la propia naturaleza del líquido. Así, en general, entre líquidos de naturaleza similar, la presión de vapor a una temperatura dada es tanto menor cuanto mayor es el **peso molecular** del líquido.

Para sustancias inflamables, explosivas o tóxicas esta propiedad es importante, ya que gracias a ésta se determina el **índice de peligrosidad** de una sustancia (Ip), el cual está determinado por el cociente entre la **presión de vapor** de la sustancia y su **concentración máxima permitida** (CMP) en condiciones estándares (25 °C y 1 atm). La presión de vapor permite analizar la viabilidad del uso de una sustancia para actividades determinadas, debido a que indica la probabilidad de que la misma se volatilice.

3.11 Entalpía de vaporización

Los sólidos y los líquidos presentan una tendencia a pasar hacia la fase gaseosa en forma de vapor, generando una presión, a la que se le conoce como presión de vapor.

Esta tendencia aumenta al incrementar la temperatura. Así, en ocasiones, al calentar una sustancia, ésta empieza a desprender vapores que se ponen de manifiesto por su olor. Si este calentamiento ocurre en recipientes cerrados, el aumento de presión puede ser tan grande que explote el recipiente que los contiene.

En cambio, al calentar el líquido en un recipiente abierto, es posible observar cómo los vapores que se desprenden de la superficie del líquido, se condensan al contacto con el aire frío, permitiendo su observación.

Si se continúa con el calentamiento, se llega a un punto donde la presión de vapor del líquido iguala a la presión ambiental (presión barométrica) y el líquido empieza a desprender burbujas (punto de ebullición), burbujas cada vez más grandes; sin embargo, la temperatura del líquido no aumenta a pesar de que se siga suministrando energía.

Toda la energía que se suministra en el punto de ebullición se ocupa para la transformación del líquido en vapor. A esta energía se le conoce como calor de vaporización, la cual depende de la cantidad de sustancia evaporada.

Si la cantidad de sustancia se expresa en masa (gramos), el **calor latente de vaporización (λ)** se define como la cantidad de calor necesario para evaporar un gramo de sustancia.

Si la cantidad de sustancia se expresa en moles, se trata de otra cantidad equivalente, la **entalpía de vaporización molar (ΔH_{vap})**, que es la cantidad de calor necesario para evaporar **un mol** de sustancia. El calor latente de vaporización y su equivalente, la entalpía de vaporización, son característicos de cada sustancia.

La entalpía de vaporización, o calor latente de vaporización, es la cantidad de energía necesaria para que la unidad de masa (kilogramo, mol, etc.) de un elemento que se encuentre en equilibrio con su propio vapor a una presión de una atmósfera pase completamente al estado gaseoso.

La evaporación del agua es un ejemplo de cambio de fase de líquido a vapor. Los potenciales químicos de las fases α (líquido) y β (vapor) son funciones de la temperatura, T, y la presión, P, y tienen el mismo valor:

$$\mu_{\alpha}(T, P) = \mu_{\beta}(T, P)$$

A partir de esta igualdad y empleando relaciones termodinámicas, se obtiene la ecuación de Clausius-Clapeyron.

Suponiendo que la fase vapor es un gas ideal y que el volumen molar del líquido es despreciable comparado con el volumen molar de gas, se llega a la denominada ecuación de Clausius-Clapeyron, la cual proporciona la presión de vapor del agua, P_v, en función de la temperatura, T, suponiendo, además, que la entalpía de vaporización, representada como ΔH_{vap}, es independiente de la temperatura (al menos en un determinado intervalo):

$$\ln P_v = -\frac{\Delta H_{vap}}{RT} + C$$

donde C es una constante.

3.12 Por ciento y fracción peso de una mezcla

Para expresar el por ciento en peso de una mezcla, se emplea el concepto de concentración de una solución (véase capítulo 10, Soluciones), la cual expresa las cantidades relativas de soluto y disolvente presentes. Entonces, el por ciento en peso de una mezcla indica la masa de un componente en relación con la masa total de la mezcla referida a 100 partes:

$$\text{Por ciento en peso de la sustancia } i = \frac{\text{masa de la sustancia } i\ (m_i)}{\text{masa total } (m_T)} \times 100$$

$$\%\ \text{peso}_i = \frac{m_i}{m_T} \times 100\%$$

donde la masa total (m_T) es la suma de todas las masas de las sustancias presentes en la mezcla:

$$m_T = \sum_{i=1}^{n} m_i = m_1 + m_2 + m_3 + \ldots + m_n$$

Aquí, i y n representan a cada una de las sustancias presentes y el número total de sustancias en la mezcla, respectivamente.

La masa de la sustancia i se obtiene de

$$\text{masa de una sustancia} = \text{masa total} \times \frac{\text{por ciento en peso de la sustancia}}{100}$$

Ejemplo 2

Calcular el por ciento en peso de NaCl y H_2O, si se disuelven 19 g de esta sal en suficiente cantidad de agua para preparar 175 g de solución.

Solución:

masa de la sal (NaCl) = 19 g

masa total de la solución = 175 g

la masa del H_2O se puede calcular despejándola de la siguiente expresión

masa total = masa de NaCl + masa de H_2O

masa de H_2O = masa total − masa de NaCl

$= 175\ g - 19\ g$

$= 156\ g$

$$\%\ \text{peso de NaCl} = \frac{19\ g}{175\ g} \times 100\ \% = 10{,}86\ \%$$

$$\%\ \text{peso de } H_2O = \frac{156\ g}{175\ g} \times 100\ \% = 89{,}14\ \%$$

Una forma de simplificar los cálculos del por ciento en peso es el uso de la fracción peso que relaciona a la masa de una determinada sustancia dividida entre la masa total de todas las sustancias, entonces la definición matemática es de la siguiente manera:

$$\text{fracción peso de una sustancia} = \frac{\text{masa de la sustancia}}{\text{masa total}}$$

$$\bar{x}_i = \frac{m_i}{m_T}$$

Con la relación de por ciento en peso y la correspondiente a la fracción peso se obtiene

$$\%\ \text{peso } i = \frac{m_i}{m_T} 100 = \bar{x}_i \times 100$$

Ejemplo 3

Calcule las fracciones, el por ciento en peso y la masa total cuando se tiene una mezcla de 20 g de oxígeno, 50 g de nitrógeno y 6 g de hidrógeno.

Solución:

$$m_T = \sum m_i = m_{O_2} + m_{N_2} + m_{H_2}$$

$$= 20\ g + 50\ g + 6\ g = 76\ g$$

$$\bar{x}_{O_2} = \frac{m_{O_2}}{m_T} = \frac{20\ g}{76\ g} = 0{,}2632$$

$$\bar{x}_{N_2} = \frac{m_{N_2}}{m_T} = \frac{50\ g}{76\ g} = 0{,}6579$$

$$\bar{x}_{O_2} = \frac{m_{H_2}}{m_T} = \frac{6\ g}{76\ g} = 0{,}0789$$

$$\%\ \text{peso } O_2 = \bar{x}_{O_2} \times 100 = 0{,}2632 \times 100 = 26{,}32\%$$

$$\%\ \text{peso } N_2 = \bar{x}_{N_2} \times 100 = 0{,}6579 \times 100 = 65{,}79\%$$

$$\%\ \text{peso } H_2 = \bar{x}_{H_2} \times 100 = 0{,}0789 \times 100 = 7{,}89\%$$

Los resultados anteriores indican que hay 26,32 g de O_2, 65,79 g de N_2 y 7,89 g de H_2 por cada 100 g de mezcla, por lo que se tiene la siguiente expresión

$$\sum \%\ \text{peso}_i \text{ en una mezcla} = 100\ \%\ \text{peso}$$

esto es, la suma de los porcentajes en peso de todos los componentes es igual a 100, y es una expresión con dimensiones de por ciento, en este caso de peso.

En el caso particular del ejemplo anterior se tiene:

$$\sum \%\ \text{peso} = \%\ \text{peso}_{O_2} + \%\ \text{peso}_{N_2} + \%\ \text{peso}_{H_2}$$

$$\sum \%\ \text{peso}_i = 26,32 + 65,79 + 7,89 = 100\ \%\ \text{peso}$$

Cumpliéndose así la igualdad; de igual modo, la suma de todas las fracciones de una mezcla es igual a 1.

$$\sum \bar{x}_i = \bar{x}_{O_2} + \bar{x}_{N_2} + \bar{x}_{H_2} = 1$$

$$\sum \bar{x}_i = 0,2632 + 0,6579 + 0,0789 = 1,00$$

Tabla 3.5. Forma recomendada para la agrupación de datos de sustancias en una mezcla.

Sustancia	m_i	$\bar{x}_i$ (m_i/m_T)	% peso $(\bar{x}_i \times 100)$
O_2	20	0,2632	26,32
N_2	50	0,7569	75,69
H_2	6	0,0709	7,09
Total	76	1,00	100,00

La aplicación de fórmulas, expresiones y sus resultados es sencilla cuando se tienen pocos componentes; sin embargo, cuando aumenta la cantidad de sustancias en una mezcla, es recomendable la construcción de tablas que contengan los atributos más importantes para realizar de forma práctica el cálculo de las propiedades requeridas, como se muestra en la tabla 3.5, donde se emplean los datos del problema anterior.

En la tabla 3.5 se presentan los datos de manera ordenada, disponibles y con las expresiones para cada relación usada.

3.13 Fracción y por ciento en mol de una mezcla

La **fracción mol** o **molar** es la cantidad de moles de una sustancia específica dividida entre el número total de moles presente, esta definición se cumple para todos los estados de agregación de la materia.

La expresión matemática para efectuar su cálculo es:

$$\text{fracción molar de una sustancia } (x)_i = \frac{\text{moles de la sustancia } (n_i)}{\text{moles totales } (n_T)}$$

aquí

$$n_T = \sum n_i = n_1 + n_2 + n_3 + \ldots\ldots\ldots + n_m$$

con

$$\text{moles } i = \frac{\text{masa } i}{\text{peso molecular } i}$$

$$n_i = \frac{m_i}{PM_i}$$

Para reportar el porcentaje molar, sólo debe multiplicarse por 100, o sea

$$\text{porcentaje molar de una sustancia} = \frac{\text{moles de la sustancia}}{\text{moles totales}} \times 100$$

$$\%\ \text{mol} = \frac{n_i}{n_T} \times 100 = x_i \times 100$$

$$\sum \text{fracción mol} = \frac{\text{mol } A}{\text{moles totales}} + \frac{\text{mol } B}{\text{moles totales}} + \frac{\text{mol } C}{\text{moles total}} + \ldots + \frac{\text{mol } n}{\text{moles totales}} = 1$$

$$\sum x_i = \frac{n_A}{n_T} + \frac{n_B}{n_T} + \frac{n_C}{n_T} + \ldots + \frac{n_m}{n_T} = x_A + x_B + x_C + \ldots + x_m = 1$$

$$\sum x_i = 1 \qquad \frac{m_A}{PM_A} = n_A \qquad \sum n_i \neq 1$$

Recordemos que:

$$\text{masa total} = \sum m_i$$

$$\text{masa total} = \text{masa } A + \text{masa } B + \ldots + \text{masa } n$$

$$m_T = m_A + m_B + \ldots + m_n$$

Para obtener el peso molecular de la sustancia (PM) se requiere conocer la fórmula química del compuesto y emplear la relación:

$$PM_i = \sum \text{número de átomos} \times \text{peso atómico de cada elemento.}$$

Ejemplo 4

Calcular el peso molecular del O_2.

$$PM_{O_2} = (2)(16) = 32 \text{ g / mol}$$

Ejemplo 5

Determinar el número de moles de 80 g de $CuSO_4$.

Solución:

Conociendo la relación $n_i = \frac{m_i}{PM_i}$ se calcula el peso molecular de la sustancia.

Elemento	Número de átomos	Peso atómico	Total
Cobre	1	63,5	63,5
Azufre	1	32	32
Oxígeno	4	16	64
		Peso molecular	159,5 g/mol

Así, se tiene que

$$n_{CuSO_4} = \frac{m_{CuSO_4}}{PM_{CuSO_4}} = \frac{80\ g}{159,5\ g/mol} = 0,5\ mol$$

Para el problema de la mezcla de gas de 20 g de oxígeno, 50 g de nitrógeno y 6 g de hidrógeno se requiere calcular el por ciento en mol de los componentes; entonces, siguiendo la metodología propuesta se tienen los siguientes pasos a seguir:

1. Determinar el peso molecular de cada uno de los componentes:

   $PM_{O_2} = (2)(16) = 32$ g/mol

   $PM_{N_2} = (2)(14) = 28$ g/mol

   $PM_{H_2} = (2)(1) = 2$ g/mol

2. Calcular el número de moles para cada sustancia:

$$n_{O_2} = \frac{m_{O_2}}{PM_{O_2}} = \frac{20\ g}{32\ g/mol} = 0,6250\ mol$$

$$n_{N_2} = \frac{m_{N_2}}{PM_{N_2}} = \frac{50\ g}{28\ g/mol} = 1,7857\ mol$$

$$n_{H_2} = \frac{m_{H_2}}{PM_{H_2}} = \frac{6\ g}{2\ g/mol} = 3\ mol$$

3. Establecer el número de moles totales de la mezcla:

$$n_T = n_{O_2} + n_{N_2} + n_{H_2} = 0,6250\ mol + 1,7857\ mol + 3\ mol = 5,4107\ mol$$

4. Determinar las fracciones mol de cada componente:

$$x_{O_2} = \frac{n_{O_2}}{n_T} = \frac{0,6250\ mol}{5,107\ mol} = 0,1155$$

$$x_{N_2} = \frac{n_{N_2}}{n_T} = \frac{1,7857\ mol}{5,4107\ mol} = 0,3300$$

$$x_{H_2} = \frac{n_{H_2}}{n_T} = \frac{3\ mol}{5.4107\ mol} = 0,5545$$

$$\sum x_i = x_{O_2} + x_{N_2} + x_{H_2} = 0,1155 + 0,3300 + 0,5545 = 1$$

5. Establecer el por ciento en mol para cada componente:

   $\%\ mol_{O_2} = x_{O_2} \times 100 = 0,1155 \times 100 = 11,55\%$

   $\%\ mol_{N_2} = x_{N_2} \times 100 = 0,3300 \times 100 = 33,00\%$

   $\%\ mol_{H_2} = x_{H_2} \times 100 = 0,5545 \times 100 = 55,45\%$

   $\%\ mol_{O_2} + \%\ mol_{N_2} + \%\ mol_{H_2} = 11,55\% + 33,00\% + 55,45\% = 100\%$

La serie de cálculos descrita arriba contiene una gran cantidad de información, con lo cual se sugiere colocar los datos en una tabla para simplificar los cálculos y facilitar las respuestas al problema planteado.

Por ejemplo, si las preguntas al problema fueran:

a) ¿Cuántos moles de O_2 hay en la mezcla?

Respuesta: 0,625 mol de O_2.

b) ¿Cuál es el por ciento peso de N_2 en la mezcla?

Respuesta: 75,69% peso de N_2.

c) Determinar la cantidad en moles de la mezcla.

Respuesta: moles totales igual a 5,4107 moles.

d) ¿Cuál es la composición de cada uno de los componentes en por ciento mol?

Respuesta: El contenido de la tabla sería:

Sustancia	m_i (g)	$\bar{x}_i \left(\frac{m_i}{m_T}\right)$	% peso ($\bar{x}_i \times 100$)	PM_i (g/mol)	$n_i \left(\frac{m_i}{PM_i}\right)$	$x_i \left(\frac{n_i}{n_T}\right)$	% mol ($x_i \times 100$)
O_2	20	0,2632	26,32	32	0,6250	0,1155	11,55
N_2	50	0,6579	65,79	28	1,7857	0,3300	33,00
H_2	6	0,0789	7,89	2	3,000	0,5545	55,45
Total	76	1,000	100,00		5,4107	1,000	100,00

Como se puede observar, la tabla anterior proporciona orden, mayor claridad y rapidez de cálculo para resolver el problema.

3.14 Por ciento y fracción volumen de una mezcla

El por ciento en volumen es la cantidad de volumen de una sustancia específica dividida entre el volumen total de la mezcla; esta definición se aplica a líquidos y gases.

La expresión matemática para efectuar su cálculo es:

$$\text{Por ciento en volumen}_i = \frac{\text{volumen de la sustancia}_i}{\text{volumen total}} \times 100\%$$

$$\%\ \text{volumen}_i = \frac{V_i}{V_T} \times 100\%$$

$$\text{volumen total } (V_T) = \sum V_i = \text{volumen}_1 + \text{volumen}_2 + \text{volumen}_3 + \ldots + \text{volumen}_n$$

En el por ciento en volumen se cumplen las mismas reglas que se tienen para el por ciento en peso y mol, con la diferencia de que éste sólo es aplicable para mezclas de gases y de líquidos. Para obtener el por ciento en volumen, sólo hay que multiplicar la fracción volumen o la fracción mol por 100:

$$\%\ \text{volumen}_i = \frac{V_i}{V_T} \times 100\% = x_i \times 100\%$$

La fracción volumen representada por x_i es la relación entre el volumen de cada componente y su volumen total:

$$x_i = \frac{V_i}{V_T}$$

Recordando que para las mezclas de gases ideales la fracción mol es igual a la fracción volumen, entonces se tiene que:

$$x_i = \frac{n_i}{n_T} = \frac{V_i}{V_T}$$

de la misma manera, el por ciento en mol y el por ciento en volumen para gases ideales son iguales:

$$\%\ \text{mol}_i = \%\ \text{volumen}_i = x_i \times 100\%$$

Para el problema de la mezcla de gas de 20 g de oxígeno, 50 g de nitrógeno y 6 g de hidrógeno se requiere calcular el por ciento en volumen, así como el volumen de cada componente, para esto es necesario indicar que el volumen del contenedor es igual a 25 L.

Para obtener estos datos, se deberá utilizar la tabla elaborada, sólo que agregando una columna para el por ciento en volumen y para el volumen parcial que se obtiene despejando de la siguiente manera:

$$V_i = x_i \times V_T$$

Sustancia	n_i (mol)	$x_i = \left(\frac{n_i}{n_T}\right)$	% vol = ($x_i \times 100$)	$V_i = x_i \times V_T$ (L)
O_2	0,6250	0,1155	11,55	2,89
N_2	1,7857	0,3300	33,0	8,25
H_2	3,00	0,5545	55,45	13,86
Total	5,4107	1,000	100,00	25,00

Como se pudo comprobar, la obtención de los datos fue muy fácil y práctica.

3.15 Por ciento y fracción presión de una mezcla

El por ciento en presión es la presión parcial de una sustancia específica dividida entre la presión total presente. Esta definición se cumple para todos los gases.

La expresión matemática para efectuar su cálculo es:

$$\text{Por ciento en presión}_i = \frac{\text{presión parcial de la sustancia}_i}{\text{presión total}} \times 100\%$$

$$\%\ \text{presión}_i = \frac{P_i}{P_T} \times 100\%$$

$$\text{Presión total } (P_T) = \sum P_i = \text{presión}_1 + \text{presión}_2 + \text{presión}_3 + \ldots + \text{presión}_n$$

la presión parcial de un gas en una mezcla es la presión que éste ejercería si ocupara él solo el mismo volumen a la misma temperatura de la mezcla.

En el por ciento en presión se cumplen las mismas reglas que se tienen para el porcentaje en peso, mol y volumen, con la diferencia de que sólo es aplicable para mezclas de gases ideales. Para obtener el por ciento en presión, sólo hay que multiplicar la fracción presión o fracción mol por 100:

$$\text{Por ciento en presión}_i = \frac{P_i}{P_T} \times 100\% = x_i \times 100\%$$

La fracción presión representada por x_i es la relación entre la presión de cada componente y su presión total:

$$x_i = \frac{P_i}{P_T}$$

Recordando que para las mezclas de gases ideales, la fracción mol es igual a la fracción presión, entonces se tiene que:

$$x_i = \frac{n_i}{n_T} = \frac{P_i}{P_T}$$

de la misma manera, el porcentaje mol y el por ciento en presión de mezclas de gases ideales son iguales:

$$\%\ \text{mol}_i = \%\ \text{presión}_i = x_i \times 100\%$$

Para los gases ideales, en particular, la relación de las fracciones molares, de volumen y de presión son:

$$x_i = \frac{n_i}{n_T} = \frac{V_i}{V_T} = \frac{P_i}{P_T}$$

de tal forma que si se conoce la fracción mol, también se conocen las fracciones presión y volumen y por ende su porcentaje:

$$\%\ \text{presión} = x_i \times 100\%$$
$$\%\ \text{volumen} = x_i \times 100\%$$
$$\%\ \text{mol} = x_i \times 100\%$$

Por tanto, para gases ideales, % presión = % volumen = % mol = $x_i \times 100$.

Para el problema de la mezcla de gas de 20 g de oxígeno, 50 g de nitrógeno y 6 g de hidrógeno, ahora se requiere calcular el por ciento en presión, así como la presión de cada componente, para esto es necesario indicar que la presión total del sistema es igual a 1,5 atm.

Para obtener estos datos se utilizará la tabla elaborada, sólo que es necesario agregar una columna para el por ciento en presión y para la presión parcial, la cual se obtiene despejando de la siguiente manera:

$$P_i = x_i \times P_T$$

Sustancia	n_i (mol)	$x_i \left(\frac{n_i}{n_T}\right)$	% Presión ($x_i \times 100$)	$P_i = x_i \times P_T$ (atm)
O_2	0,6250	0,1155	11,55	0,1733
N_2	1,7857	0,3300	33,00	0,4950
H_2	3,000	0,5545	55,45	0,8318
Total	5,4107	1,000	100,00	1,50

Como se pudo observar, obtener estos datos fue de una forma muy fácil y práctica.

3.16 Gasto volumétrico y gasto másico

La relación que existe entre la masa, o el volumen de una sustancia, en función del tiempo, puede escribirse como:

$$G_{m_i} = \frac{m_i}{\theta} \qquad G_{Vi} = \frac{V_i}{\theta}$$

donde G_{m_i} y G_{V_i} representan los gastos másico y volumétrico del componente *i*, respectivamente; m_i y V_i son la masa y el volumen del componente *i*, θ es el tiempo. De esta manera, se tienen también las siguientes expresiones para el gasto másico y volumétrico para una mezcla:

$$G_m = \frac{m_T}{\theta} \qquad G_V = \frac{V_T}{\theta}$$

donde m_T y V_T son la masa y volumen total de la mezcla, respectivamente.

Ejemplo 6

Se alimentan 40 kg/h de una mezcla gaseosa a un reactor por medio de una tubería.

Determine:

a) El gasto másico en kg por minuto.

b) La masa en gramos que se alimenta al reactor por segundo.

Solución:

La masa de la mezcla es igual a 40 kg y el tiempo en que pasa por la tubería al reactor es una hora, entonces:

a) $$Gm = \frac{40\ \text{kg}}{\text{h}} \times \frac{1\ \text{h}}{60\ \text{min}} = 0{,}66 \frac{\text{kg}}{\text{min}}$$

b) $$Gm = \frac{40\ \text{kg}}{\text{h}} \times \frac{1\ \text{h}}{60\ \text{min}} \times \frac{1\ \text{min}}{60\ \text{s}} \times \frac{1\,000\ \text{g}}{1\ \text{kg}} = 11 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

3.17 Problemas

1. En una industria productora de champú se procesan 1735 lb/hora de producto con una densidad de 0,944 g/cm^3. Determine:

a) ¿Cuántos galones se procesan al año considerando 254 días laborables al año y dos turnos de trabajo por día, uno de 8 horas y uno de 6 horas?

b) ¿Cuántas botellas se requieren anualmente si cada recipiente tiene un volumen de 355 mL y se llenan al 95% de su capacidad?

c) La industria en cuestión tiene una requisición de 740 000 botellas para entregar en un mes, ¿logrará dicha producción? Considere que la planta productora trabaja 21 días al mes. En caso contrario, ¿qué haría usted para cumplir con lo solicitado por el cliente?

2. Una planta productora de puré de tomate (densidad = 1,5 kg/L) procesa 1,5 toneladas/hora de tomate, con un aprovechamiento de 85% en peso (el restante 15% corresponde a la piel y a las semillas del tomate). El plan de trabajo de la planta es de dos turnos de 8 horas cada uno y 5 días laborables a la semana. El producto final se envasa en recipientes de 8 cm de diámetro y 12 cm de altura, y se llena a 90% de su capacidad, una vez enlatado, el producto debe pasteurizarse a una temperatura entre 90 °C y 92 °C. Determine:

a) ¿Qué cantidad en masa de puré de tomate se obtendrá en una semana de trabajo?

b) ¿Cuántos envases se requerirán para envasar el producto obtenido en un mes, considere cuatro semanas por mes?

c) ¿Qué cantidad de desperdicio se genera en un día de trabajo?

d) El laboratorio de control de calidad reporta que el equipo de pasteurización se halla trabajando a una temperatura de 205 °F. Demuestre si cubre la especificación deseada y qué haría usted en caso de algún error.

3. Un limpiador de tuberías contiene 5 lb de agua y 6 lb de hidróxido de sodio (NaOH). Determine:

a) ¿Cuál es la composición de los compuestos que integran el limpiador en por ciento en peso?

b) Si se tienen en el almacén 17 850 kg de NaOH, ¿qué cantidad de limpiador podría elaborarse y cuánta agua se requeriría?

c) ¿Cuántos recipientes de un galón podrán llenarse al 90% de su capacidad si la densidad de la solución de NaOH es 1,25 g/cm^3?

4. Una fábrica que produce puré de durazno tiene la siguiente programación de producción:

Turno	Jornada/día	Semana	Operadores u operarios
1°	7 – 14 horas	lunes a sábado	2
2°	16 – 20 horas	lunes a viernes	1

Por cada kilogramo de fruta se generan 750 g de pulpa cada 6 segundos por cada operario. Los envases utilizados para el producto tienen una capacidad de 400 mL, llenados al 92,5% de su capacidad; la densidad del puré es 1,8 g/cm^3. Con base en esta información, determine (llenando los espacios en blanco de la tabla siguiente):

a) kg materia prima/día.

b) kg pulpa/día.

c) % peso fruta aprovechada.

d) % peso fruta no aprovechada.

kg materia prima/día	kg pulpa/día	% peso fruta aprovechada	% peso fruta no aprovechada

e) Si el fabricante tiene un pedido de 80 000 envases/semana, demuestre con cálculos si se satisface la demanda.

f) Si no cubre el pedido, ¿qué haría para cumplirlo?

5. En el proceso de industrialización de la naranja se obtienen los siguientes rendimientos por cada 100 kg de fruta:

Jugo	Cáscara	Pulpa	Huesos	Funcionamiento
47,65 kg	39,62 kg	6,39 kg	6,34 kg	2 turnos de 8 horas cada uno; 200 días/año

Nota: El laboratorio de control de calidad reporta que la densidad del jugo de naranja es de 1,05 g/mL.

Con base en los datos de la tabla, determine:

a) Si se procesan 2 toneladas/hora de fruta, ¿qué volumen de jugo se obtendría en 1 hora y en un año?

b) ¿Cuál es la cantidad en libras de cada subproducto que se genera en un día?

c) ¿Qué cantidad se gastó en la compra de la materia prima en dos turnos, si una caja de naranja de 44 lbs cuesta $ 12,00?

d) ¿Cuál es el costo de la naranja por kg?

e) El jugo se pasteuriza a 70 °C, exprese esta temperatura en °F y K.

6. En una industria se obtienen 500 toneladas/día de cloruro de plomo ($PbCl_3$); para el proceso de obtención se utilizan 577,34 toneladas de nitrato de plomo ($Pb(NO_3)_2$) en grado analítico y 131,3 toneladas de ácido clorhídrico (HCl). Determine:

a) El costo del $Pb(NO_3)_2$ y del HCl utilizados, si el primero cuesta $228,00/kg y el segundo $24,57/L; la densidad del HCl es 1,18 kg/L.

b) Si el turno de trabajo es de 8 horas/día y la empresa trabaja seis días de la semana, cuatro semanas al mes y 10 meses al año, ¿qué cantidad de $Pb(NO_3)_2$ se requiere para una producción anual?

c) ¿Cuál sería la inversión total anual de producción?

7. Se secan por aspersión 1 500 ft^3 de solución de café soluble, la cual contiene 25% en peso de sólidos (la solución tiene una densidad de 0,95 g/mL). El aire entra al secador a una temperatura de 45 °F. Con base en estos datos, conteste lo siguiente:

a) ¿Cuál es la masa de alimentación en unidades del sistema mks?

b) ¿Qué cantidad de sólidos contiene el café soluble antes del secado expresado en libras?

c) ¿Qué cantidad de agua contiene el café soluble antes del secado expresado en unidades del sistema cgs?

d) Transforme la temperatura a unidades del sistema mks.

8. Una planta industrializadora de leche evaporada ha determinado que las pérdidas (por sustitución de piezas dañadas) se valuaron en $2 848,00/año si la tubería carece de recubrimiento, siendo menor esta pérdida si ésta se recubre con una capa de 2 pulgadas de óxido de magnesio. La tubería de acero estándar mide 105 ft de longitud y 4 pulgadas de diámetro. Si el costo de instalación del aislamiento es de $ 18,95 por cada 0,875 m^2 de tubería. Determine:

a) ¿Cuál será el costo de revestir 12,780 pulgadas de tubería?

b) ¿Cuál sería el ahorro anual que tendría la planta si toda la tubería se recubriera de óxido de magnesio?

c) ¿Cuál es el grosor y el volumen de la capa de óxido de magnesio en el sistema internacional?

9. Una empresa productora de aceite lubricante para motores tiene un almacén para producto terminado que mide 18 m de largo, 26,5 ft de ancho y 138 pulgadas de alto. En el almacén hay cajas, las cuales ocupan 75% de la capacidad del almacén; cada caja contiene 24 botes de aceite SAE-40 listo para usarse, cada bote mide 0,09 m de diámetro y 7 pulgadas de altura y contiene aceite al 90% de su capacidad. El gerente desea saber:

a) ¿Cuántas cajas hay en el almacén?

b) ¿Cuántos litros y cuántos galones de aceite hay en el almacén?

c) ¿Cuántos camiones de carga de 12 m^3 de capacidad se requieren para enviar toda la producción a Querétaro?

d) Elabore un informe para el gerente, en el cual se incluya la respuesta correcta a cada pregunta, con los resultados finales correspondientes.

10. El patio de almacenamiento de un ingenio azucarero tiene las siguientes dimensiones: 131,23 ft de largo y 1181,10 pulgadas de ancho; mientras que su capacidad de almacenamiento es de 25 toneladas de caña/día, 7 días a la semana.

Al procesar la caña se obtiene la melaza como un subproducto. Se reporta como dato técnico que por cada tonelada de caña se obtienen 23,78 kg de melaza (densidad = 1,44 kg/L). La melaza se envía a tanques de almacenamiento con una capacidad de 254 550 galones. Determine:

a) Área del patio de almacenamiento.

b) Volumen de melaza obtenida si se procesará toda la materia prima en un mes.

c) ¿Cuántos tanques se requieren para almacenar el subproducto al procesar toda la materia prima en un año?

d) En el ingenio se utilizan tres evaporadores, el último de ellos debe funcionar en un rango de temperatura que va de 134,60 °F a 138,20 °F. Si se reporta que la temperatura de funcionamiento es de 318 °C, indique si el equipo está operando correctamente; en caso contrario, ¿qué haría para solucionar el problema?

11. Con base en el plan de producción siguiente, conteste lo que se le pide:

Producto	Consumo de materia prima	Funcionamiento	Envases utilizados
Pulpa de piña densidad = 1,7 g/mL	3 toneladas/hora	95 días/año 2 turnos de 8 horas/día	Recipientes de vidrio de ½ kg llenos al 92% peso
Pulpa de durazno densidad = 1,8 g/cm^3	900 lb/hora	47 días/año 1 turno de 8 horas/día	Recipientes llenos al 92% peso diámetro = 2,76 pulgadas y altura = 0,39 ft

Para calcular la cantidad de producto terminado se considera que se obtiene un 65% de aprovechamiento respecto a la cantidad inicial de materia prima utilizada. La temperatura del proceso es de 110 °C. Considere que la densidad del agua = 1 g/mL.

a) Producto elaborado en gal/hora de piña y durazno.

b) Producto elaborado en kg/año de piña y durazno.

c) Cantidad de envases utilizados anualmente en ambos procesos. En el caso de la pulpa de durazno efectúe su cálculo considerando el contenido en cm^3.

d) Producto elaborado con base en el proceso en unidades del sistema fps.

e) Si en el proceso de fabricación de pulpa de durazno se consumen 25 000 L/hora de agua; ¿cuántos metros cúbicos de agua se consumen anualmente y cuál es su costo si el metro cúbico de agua cuesta $3,00?

12. En una industria productora de crema facial líquida se procesan 2375 lb/hora de producto con una densidad de 1,144 g/cm^3. Con base en estos datos determine:

a) ¿Cuántos galones se procesarán al año considerando 1 turno de 8 horas y 1 turno de 6 horas por día y 300 días laborables al año?

b) ¿Cuántas botellas se requieren anualmente si cada recipiente tiene un volumen de 485 mL y se llenan al 95% de su capacidad?

c) La industria tiene una requisición de 775 320 botellas para entregar en un mes, ¿logrará esta producción? Considere que la industria trabaja 25 días al mes. En caso contrario, ¿qué haría usted para cumplir con lo solicitado por los clientes?

13. Determine cuál será el costo de preparar las siguientes soluciones de azúcar y agua:

a) 800 g de una solución al 20% peso de azúcar.

b) Si se dispone de 550 g de azúcar para obtener una solución al 35% peso de azúcar.

c) Si se dispone de 950 g de agua para preparar una solución al 15% peso de azúcar.

Nota: Considere que 1 kg de azúcar cuesta $4,85 y que 1,5 L de agua cuesta $8,00 (densidad de agua = 0,9986 g/cm^3).

14. La composición porcentual de un fertilizante para planta de ornato es:

Óxido de fósforo (P_2O_5)	14,3% peso
Sulfato de amonio ($(NH_4)_2SO_4$)	78,0% peso
Cloruro de potasio (KCl)	5,5% peso
Humedad (H_2O)	el resto

a) ¿Qué cantidad de fertilizante podría prepararse con 200 kg de sulfato de amonio?

b) ¿Qué cantidades se requieren de los otros materiales?

c) Si la tercera parte de esta producción se va a envasar en presentaciones de sobres de 150 g cada uno y el resto en presentación de bolsas de 750 g, ¿cuántos sobres y cuántas bolsas se requieren para tal operación?

15. Una industria desea fabricar 8 500 jabones de 150 g cada uno; la composición y su costo es el siguiente:

Compuesto	Composición	Costo
Aceite de coco	80% peso	$20,55/kg
Emolientes	15% peso	$10,00/100 g
Perfume	3% peso	$14,50/100 g
Colorante	2% peso	$3,30/100 g

a) ¿Qué cantidades de cada ingrediente se requieren para la fabricación de un jabón?

b) ¿Cuánto se requiere de cada ingrediente para satisfacer la producción total de jabones (exprese sus resultados en kg).

c) Según el costo de las materias primas, ¿en cuánto sale la producción de cada jabón?

d) Si el fabricante tiene que pagar $0,05 por cada envoltura, de mano de obra 8% del costo del jabón y por servicios otro 7%, ¿cuál será el costo global de esta producción?

e) Si el precio de venta de cada jabón es de $8,40, indique si es competitivo o no. Si éste se vende al mismo costo, ¿cuánto se gana en términos de porcentaje?

f) ¿Qué haría usted como administrador industrial para lograr que su producto sea más competitivo que los demás?

16. La leche fresca tiene la siguiente composición porcentual:

Agua	87,3% peso
Grasa	3,7% peso
Proteínas	3,5% peso
Carbohidratos y minerales	5,5% peso

La densidad de la leche fresca es de 1,2 kg/L. En el proceso de industrialización de la leche, ésta se somete a un descremado total, el producto que se obtiene de dicho proceso se concentra para obtener leche con 27% en peso de sólidos. Posteriormente, se elimina el agua hasta que el producto contenga 3% peso de humedad. El producto se envasa en recipientes de 450 g.

Para una alimentación de 4500 L/h de leche. Determine:

a) ¿Cuántos envases se requieren para un turno de trabajo de 8 horas diarias?

b) ¿Qué cantidad de una mezcla de helado se fabricaría en un mes (considere que un mes tiene 28 días laborables), si el helado comercial contiene los siguientes porcentajes?

grasa de leche	12,0% peso
azúcar	15,0% peso
estabilizador	0,2% peso
emulsionante	0,3% peso
otros aditivos	11,0% peso
agua	el porcentaje restante

c) ¿Cuánto se agregaría de cada uno de los componentes para obtener la mezcla deseada?

17. Las plantas procesadoras de ganado tienen una capacidad instalada de sacrificio de 385 467 cabezas de ganado, de las cuales el 4,7% corresponde a ganado porcino. Cada cabeza de ganado porcino beneficiada pesa aproximadamente 74 kg y de ésta se destina en promedio 45% a la producción de jamón. Determine:

a) ¿Cuánto jamón se producirá de la industrialización y qué cantidad de materias primas se requieren de curantes y otros materiales, considerando que por cada kilogramo de jamón se requieren las siguientes cantidades?

sal común	0,013 kg
azúcar	0,001 kg
proteína de soya	0,020 kg
cura premier	0,080 kg
glutamato monosódico	0,002 kg

b) ¿Cuál es el por ciento en peso del total de condimentos y el de la carne para 1 kg de jamón?

18. Una empresa produce pan de caja en dos presentaciones: paquetes chicos con 17 rebanadas y paquetes grandes con 27 rebanadas (el peso de cada rebanada es de 25 g). En su formulación usa las siguientes materias primas:

salvado	7,70% peso
azúcar	6,50% peso
sal	1,75% peso
harina integral	10,00% peso
manteca vegetal	1,50% peso
conservadores	25,75% peso
harina refinada	45,30% peso
aceite vegetal	1,50% peso

En el almacén de la planta productora se tienen sólo 750 kg de harina refinada, 500 kg de harina integral y 210 kg de azúcar. Si se tiene una demanda de 5000 paquetes chicos y 4800 paquetes grandes, determine:

a) ¿Cuál es la cantidad de materia prima faltante que se tendría que comprar para elaborar el total del producto demandado?

b) ¿Cuál es la masa de la mezcla obtenida?

c) ¿Qué porcentaje de la producción corresponde a paquetes chicos y cuál a paquetes grandes?

d) Si la empresa decide destinar 60% de su producción a paquetes chicos y el resto a paquetes grandes, ¿cuántos paquetes de cada presentación se producirían?

19. Un pequeño negocio naturista ha logrado comercializar con éxito su ensalada "Fruti-Light", la cual se prepara de acuerdo a la siguiente composición (considere que la ensalada preparada para una persona pesa en promedio 1,55 lb y que diariamente se preparan alrededor de 55 ensaladas individuales):

Fruta	% peso	Precio promedio de compra
Pera	22	$1,20/100 g
Melón	10	$5,00/kg
Papaya	15	$3,00/kg
Manzana	32	$6,80/lb
Nuez	3	$0,05/g
Yogurt	9	$15,00/kg
Miel	7	$0,35/10 g
Granola	2	$18,20/lb

a) Determine la cantidad en kg que se consume de materia prima durante cinco días de trabajo.

b) El dueño del negocio considera que 55 ensaladas al día es una buena venta, pero por esta venta no tiene utilidades. Tiene dos teorías:

i) el precio de venta de $20,00 por cada pieza es muy bajo.

ii) el encargado está robándole dinero.

¿cuál será la verdadera razón? Fundamente su respuesta con cálculos.

20. En la elaboración de jalea de fresa, la producción contempla primero el lavado y el desinfectado de la fruta, eliminando la corola y la basura que pudiera tener, obteniéndose 55% en peso de fresa utilizable; posteriormente, se agrega el azúcar, la pectina, el ácido cítrico y una pizca de sal, se mezcla y se calienta hasta ebullición con la finalidad de obtener una mezcla espesa y pesada que se vacía en moldes y se refrigera.

Si la composición en por ciento en peso de la jalea de fresa y el costo de las materias primas es el siguiente:

Ingrediente	% peso	Costo
Fresa	50,00	$5,00/kg
Azúcar	40,00	$6,50/kg
Ácido cítrico	9,80	$20,00/100 g
Pectina	0,15	$10,00/25 g
Sal	0,05	$0,05/500 g

a) Elabore un diagrama de bloques indicando las operaciones unitarias involucradas en el proceso.

b) Elabore un diagrama de símbolos indicando cada operación unitaria del inciso anterior.

c) Si se desean fabricar 50 recipientes de jalea de fresa de 450 g cada uno, ¿qué cantidad de cada materia prima se necesita?

d) ¿Cuál es el costo de cada materia prima y de cada recipiente de jalea de fresa?

e) ¿Cuál es el costo de toda la producción si consideramos que 40% del costo de la fresa equivale a los costos de producción?

f) Indique qué otros costos, a parte de la materia prima, se deben considerar en la producción.

g) Realice el balance total y los balances parciales en este proceso.

21. Una fábrica que produce refrescos de cola emplea un jarabe concentrado que tiene la siguiente formulación:

a) Solución de azúcar al 65,78% peso de azúcar 1 000 kg

b) Extracto de cola 8 000 g

c) Solución de ácido fosfórico que contiene:

- Ácido fosfórico 1 000 g
- Agua 3 000 g

d) Cafeína 2 000 g

e) Color caramelo 4 500 g

El jarabe tiene una densidad de 1,5 g/cm^3. Para producir el refresco, este jarabe debe disolverse en agua carbonatada; para eso se colocan en cada botella 153,85 cm^3 de jarabe. Determine:

a) ¿Cuál es la composición porcentual del jarabe concentrado?

b) ¿Cuál es el costo de preparar la solución de azúcar, si la materia prima (el azúcar) cuesta $5,00/kg y el agua cuesta $6,00/m^3 (la densidad del agua es de 0,998 g/mL)?

c) ¿Cuál es la composición porcentual de la solución del ácido fosfórico?

d) Si 80% del jarabe se destina al envasado y el resto se almacena en un silo, ¿cuántos envases se consumirían?

22. En la industria del petróleo, por cada barril de petróleo crudo súper ligero que se somete a destilación fraccionada, sólo 86% de éste se condensa de acuerdo con sus diferentes puntos de ebullición; así, se separa en las siguientes fracciones:

- Gas natural 34,2% peso
- Gasolina 21,5% peso
- Nafta 12,0% peso
- Queroseno 10,0% peso
- Combustóleo 15,6% peso
- Otros compuestos El resto

La densidad del petróleo crudo es 0,83 kg/L; un barril equivale a 159 L y el tipo de cambio del dólar al cual se vende es de $10,30/dólar, la jornada de extracción es de seis días a la semana. Con base en los datos anteriores, determine:

a) Si se cuenta con 50×10^3 barriles/día, ¿qué cantidad de cada fracción se obtendrá? Exprese sus resultados en toneladas.

b) Si México vende cada barril de este petróleo en un dólar y paga 30% de arancel, ¿cuánto ganará por la venta de 10 000 barriles/diarios y cuánto por semana?

c) De la cantidad de gas natural obtenido sólo 20% se destina a uso doméstico y el resto a la obtención de otros productos industriales, ¿cuál es la masa que se distribuye? Exprese sus resultados en kg.

23. Para la fabricación de refrescos de cola se prepara un jarabe concentrado con la siguiente formulación:

- Extracto de cola 1 200,00 kg
- Solución azucarada (71,34% peso de azúcar) 1 500,00 g
- Solución de ácido fosfórico (29% peso de ácido) 6,00 kg
- Cafeína 3,00 kg
- Color caramelo 6,75 kg

Al jarabe se le inyecta CO_2 para obtener el refresco. Cada botella se llena con 485,30 cm^3 de jarabe (densidad del jarabe = 1,5 g/mL).

La jornada laboral es de dos turnos de 8 horas cada uno, 6 días a la semana y 11 meses al año.

Determine:

a) La composición porcentual del jarabe concentrado.

b) La cantidad de agua que llevan las soluciones de la fórmula.

c) ¿Cuántos envases se van a llenar por año si sólo 85% del jarabe es envasado y el resto se almacena?

24. Para la fabricación de pólvora se requiere carbón (C), azufre (S) y nitrato de potasio (KNO_3) en proporciones de 10, 15 y 75% en peso, respectivamente; estas sustancias se muelen finamente y se mezclan con cuidado para obtener el producto final.

Determine:

a) ¿Qué cantidad de cada materia prima se necesitaría para producir 4 toneladas/día?

b) ¿Qué equipo propondría para la molienda de cada una de las materias primas y qué equipo para el mezclado?

c) El costo de cada materia prima por día y el total por 6 meses de producción si los costos son los siguientes: carbón $0,80/lb; azufre $1,85/lb; nitrato de potasio $3,20 lb.

Considere que la jornada de trabajo es de 365 días al año.

P.A. C:12 S:32 N:14 K:39 O:16

25. Una empresa que produce gajos de mandarina en almíbar alimenta al proceso 180 kg/h de fruta entera, para lo cual ésta se selecciona, registrándose una pérdida de 3% de fruta que está en mal estado. La fruta de calidad se envía al pelado, proceso en el cual se elimina 18% en peso de cáscara con respecto al peso de la fruta seleccionada. Por último, ésta se desgaja y se mezcla con el jarabe. La mezcla se envasa en frascos de 500 g. La composición del contenido de cada envase es de 50% peso de gajos y 50% peso de jarabe. El jarabe que se utiliza en el envasado de la fruta tiene la siguiente composición porcentual:

Ingredientes	% peso	Costo
Azúcar refinada	50,00	$7,00/kg
Agua	24,97	$0,80/L
Glucosa	20,00	$7,61/kg
Citrato de sodio	3,00	$0,60/kg
Ácido cítrico	2,00	$ 0,50/kg
Benzoato de sodio	0,03	$0,65/kg

Los frascos se colocan en cajas y cada una contiene 18 frascos. Determine:

a) La cantidad de materia prima que se requiere para preparar el jarabe, para la producción de 1 hora.

b) El costo del jarabe para la producción de 1 hora (densidad del agua 0,998 g/mL).

c) Cantidad de frascos utilizados para la producción de 1 hora.

d) Cajas utilizadas para la producción en 1 minuto.

e) Cantidad en kg de la fruta en mal estado y de cáscara separada en 1 hora.

f) Costo de la mandarina en una hora de trabajo si el precio es de $2,85/kg.

g) Realice el balance total del proceso.

h) En una etapa del proceso, la fruta se escalda con una solución de hidróxido de sodio al 1% peso. Para toda la producción se requieren 150 L de solución de NaOH (densidad = 1,02 kg / L). Si en el almacén se dispone de 250 L de solución de NaOH al 15% peso y de toda el agua necesaria, ¿alcanzarán los materiales para escaldar toda la fruta?

26. Para efectuar un proceso industrial, se requiere diariamente de 136 lb de HCl reactivo puro, para satisfacer esta necesidad se tienen tres soluciones:

HCl al 83% peso $1,40 /kg

HCl al 25% peso $0,47 /kg

HCl al 40% peso $ 0,75 /kg

Determine con cuál solución resultaría más económico efectuar el proceso y con cuál sería más costoso.

27. Al efectuarse una reacción química se obtuvieron como productos los siguientes gases, con su respectiva composición en % peso, con un flujo de 257 kg/h.

Compuesto	% peso
N_2	36
CO_2	28
O_2	16
H_2O	20

Esta mezcla se envía a una columna de adsorción donde 90% de la humedad se separa. Posteriormente, la mezcla gaseosa resultante se introduce a una columna de absorción donde se separa 76% del CO_2. Por último, se mezcla la corriente gaseosa de la absorción con una corriente de 620 kg/h de aire, cuya composición es de 21% peso de O_2 y 79% peso de N_2.

Determine:

a) La composición de la mezcla gaseosa después del mezclado en % peso.

b) Las cantidades separadas en cada equipo.

c) Realice los balances parciales y el balance total.

d) Elabore el diagrama de bloques y símbolos para todo el proceso.

28. Una empresa productora de salchicha tiene una producción de 200 toneladas anualmente. La producción se distribuye en diferentes presentaciones de acuerdo con los siguientes datos:

Tipo de producto	% peso	Peso unitario
Salchicha tipo Viena	48	50 g
Salchichón	12	125 g
Salchicha tipo Frankfort	10	80 g
Salchicha cóctel	30	15 g

Se propone manejar paquetes de 20 piezas para los tipos viena y frankfort, 50 piezas para el tipo cóctel y 10 piezas para el salchichón.

Determine:

a) ¿Cuántos paquetes de cada tipo se producirían por año, considerando la cantidad de producción que se destina a cada presentación?

b) Si se incrementa la demanda anual en un 30% para la salchicha tipo viena, ¿cuánto más se tendría que producir para cubrir dicha demanda?

c) ¿Cuántos paquetes más de salchicha tipo viena se obtendrían?

d) ¿Cuál sería el nuevo porcentaje de distribución de la producción para los diferentes tipos de salchicha?

Nota: Trabaje sus datos en kg.

29. En una procesadora de alimentos se preparan diferentes tipos de productos enlatados, uno de ellos es el cóctel de frutas que tiene la siguiente composición:

Fruta	% peso	Costo
Durazno	30,00	$20,00/kg
Pera	30,00	$12,00/kg
Piña	20,00	$3,50/kg
Albaricoque	15,00	$9,00/kg
Uvas sin semilla	2,50	$21,00/kg
Cerezas	2,50	$30,00/250 g

El durazno, la piña y el albaricoque se preparan con un escaldado en una solución de sosa al 6% peso para eliminar la epidermis y se cortan en cubitos de 8 mm. Las cerezas y las uvas se enlatan enteras. Los envases se llenan con 70% de la mezcla de fruta y 30% de jarabe de 35 Brix, el cual se prepara agregando 537 g de azúcar por cada litro de jarabe; la densidad de éste es de 1,54 g/mL. Las latas tienen una capacidad de 850 g y un espacio de vacío de 10%. El costo del azúcar es de $6,00/kg.

a) Para una producción de 5 000 latas/día determine la cantidad de fruta requerida en kg.

b) ¿Cuánta solución de sosa se debe preparar si en un litro se escaldan 3 kg de fruta?

c) ¿Cuánto jarabe (L) se requerirá preparar?

d) ¿Qué cantidad de azúcar y agua se necesita para preparar el jarabe?

e) Determine el costo unitario y diga si es competitivo o no, si se quiere obtener una ganancia de 35% y el costo de venta de la competencia es de $11,50.

3.18 Tema de actualidad

La industria automotriz y los plásticos

En la carrera de la innovación continua

Por: Mónica Conde

3 de agosto de 2005

La industria automotriz encara un entorno que está imponiendo altos costos fijos, condiciones laborales restrictivas y, por cuestiones de competencia y cambios de regulación en aspectos ambientales, un permanente desarrollo de nuevas tecnologías.

Figura 3.11

PARA LOS PROVEEDORES DE COMPONENTES PLÁSTICOS, la industria automotriz es una mina de oportunidades por la insaciable necesidad de soluciones que permitan reducir los costos. Cada vez más, los plásticos ocupan un lugar destacado en los transportes y, en particular, en el sector automotriz. Un vehículo promedio consta hoy en día de cerca de 190 kg de plásticos, es decir, aproximadamente 13% de su peso total. De hecho, el proceso por desarrollar y transformar infinidad de piezas aún está en pleno auge, y hace falta recorrer mucho camino antes de cambiar con equivalentes de plástico cada forma y detalle.

Panorama mundial

La industria automotriz es la tercera actividad manufacturera más grande del mundo y es un sector que ha revolucionado cada esquina del mercado; la tecnología, el gusto de los consumidores, el ahorro de energéticos y la seguridad de los viajeros, sin dejar de lado la protección a la ecología.

Se estima que en el ámbito mundial existen en uso más de 500 millones de automóviles para pasajeros y a fines de 2004, la producción automotriz había crecido 5,6%, alcanzando una producción de 64 millones de autos nuevos al año. Basta saber que la capacidad total es cercana a los 80 millones de vehículos.

La producción de automóviles demanda un consumo de materiales de casi 90 millones de toneladas, de las cuales 12 millones son plásticos.

De acuerdo con datos de la Organización Internacional de Constructores de Automóviles (OICA), Asia-Oceanía es la región que hace una mayor aportación en el ensamble y la fabricación de vehículos con 23,9 millones de unidades y ostenta el mayor crecimiento (9%) de las cinco regiones continentales. Le sigue Europa con 20,8 millones y un crecimiento de 4% con respecto al año 2003; el tercero en la lista es América con 18,8 millones de unidades y un crecimiento de 3%, y finalmente África con 378 mil unidades producidas.

En cuanto a países productores, México está en el lugar 10 con 1,6 millones de unidades, apenas atrás de Brasil, país que produjo 2,2 millones de unidades.

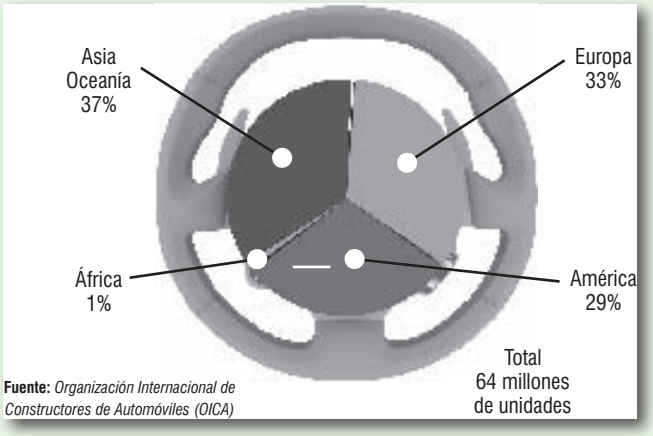


Figura 3.12 *Producción mundial de automóviles por continente.*

Al otro lado del mundo, la industria automotriz se reactivó. Estadísticas publicadas por la Asociación China de Fabricantes de Automóviles sostienen que los distribuidores chinos vendieron en los seis primeros meses de este año 2,79 millones de vehículos en China, un crecimiento de 9,35% con respecto al mismo periodo del año anterior.

Según los analistas, las buenas cifras de ventas, que contrastan con el estancamiento del sector en el año 2004, son fruto de la estabilidad de los precios en la primera mitad de este año.

También la industria automotriz alemana ve con optimismo el año 2005 debido a que la producción de autos volverá a superar la marca de los 5 millones de autos producidos en el país, por octavo año consecutivo.

Actualmente, México dirige aproximadamente 85% del total de las exportaciones hacia su principal socio comercial: Estados Unidos de América, con lo que se refleja la magnitud de la dependencia económica que existe hacia ese país.

La industria de autopartes ha mantenido niveles de crecimiento de 10% anual, en promedio, durante los últimos diez años. En 2004, el crecimiento fue de 19,5% con respecto a 2003. Asimismo, ha igualado las exportaciones de la industria terminal.

Características del sector automotriz en México

Este sector está integrado por 14 empresas ensambladoras o industria terminal y más de mil empresas fabricantes de autopartes, de las cuales alrededor de 100 están involucradas directamente con la transformación de plásticos.

El sector de autopartes está conformado por todas aquellas empresas establecidas en el territorio mexicano que fabrican partes y componentes de equipo original y de refacción para el mercado nacional y el de exportación. Esta última incluye a la industria maquiladora que, de acuerdo con datos de Bancomext, actualmente tiene registradas 609 empresas con inversión extranjera.

Figura 3.13 *Un vehículo promedio suma alrededor de 190 kg de plástico.*

La industria está considerada como una de las más complejas debido a:

- La combinación de aproximadamente 15 mil piezas de componentes y la gran variedad de materia prima utilizada (acero, plástico, fierro fundido y vidrio, entre otros).
- El alto volumen de producción, ya que la escala mínima de un modelo suele ser superior a las 100 mil unidades.
- Altos estándares de calidad que no sólo certifican el producto final, sino el proceso productivo, las prácticas laborales, las especificaciones técnicas y el manejo de procesos de producción y logística.

Los principales requerimientos de la industria automotriz son:

- Economía.
- Reducción de costos.
- Reducción de márgenes.
- Reducción de tiempos de ciclo.
- Regulaciones ambientales cada vez más estrictas por consumo de energía y reciclaje.

En consecuencia, los fabricantes de autos tienen que aligerar los vehículos para reducir el consumo y la emisión de contaminantes, mejorar la calidad y extender los niveles de garantía; aumentar la funcionalidad, reducir el desarrollo de ciclos para renovar más rápidamente y diversificar los modelos, disminuir costos al optimizar el diseño y tiempos de manufactura y facilitar el reciclaje para el fin de la vida útil de un vehículo.

Es aquí donde los plásticos y los *composites* ofrecen un incomparable conjunto de propiedades que pueden apoyar a la mayoría de estos requerimientos.

Los proveedores

"Tier 1" suministran a los fabricantes originales (OEMs —Original Equipment Manufactures), diversos componentes, unidades y módulos diseñados en metal, plástico y otros materiales, para la industria automotriz, que deben cumplir con entregas perfectas; es decir, no menos de 98 o 99% de las veces. Los mejores proveedores están enfocados en la excelencia del proceso y desarrollan tecnología, además de buscar la mejora de procesos para reducir al mínimo los gastos.

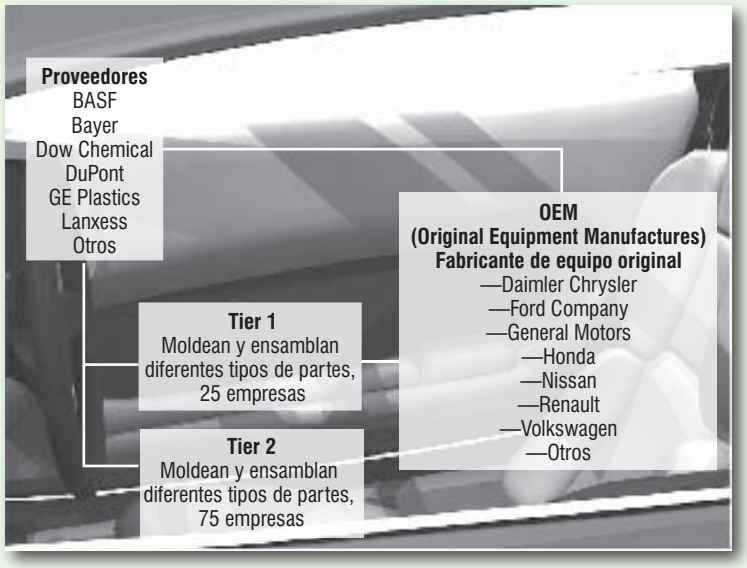


Figura 3.14 *Cadena de suministros de plástico para la industria automotriz en México.*

También tienen que concentrarse en la integración de proveedores arriba y abajo de la cadena de suministro. Por ejemplo, un OEM revelará totalmente la información de orden de pedido y exigencias de inventario a un Tier 1, de manera que éste revelará dicha información a su proveedor Tier 2. Asimismo, las empresas Tier 1 colaboran estrechamente en el desarrollo de productos con las OEMs, incluyendo a los diferentes proveedores, compartiendo actividades de diseño y selección de materiales.

Industria transparente

La industria automotriz es un caso poco común, en realidad es difícil encontrar otras cadenas de suministro que funcionen con la misma resolución y grado de intercambio de información. Desde luego, toda esta estructura es una espada de doble filo, ya que la perfección tiene un precio por los gastos de tecnología que involucran, así que es importante alcanzar el equilibrio entre conservar clientes y lograr utilidades.

En México, según datos de la INA, existen 14 fabricantes de vehículos como Daimler Chrysler, Ford Motor, General Motors, Honda, Nissan, Renault y Volkswagen, todos de origen extranjero. En lo que respecta a los fabricantes de autopartes se estima que suman 1000 las empresas activas en el mercado mexicano, de las cuales 655 son de origen extranjero y 345, nacionales. Asimismo, 355 se tienen registradas como Tier 1 o proveedores de primer nivel.

La industria automotriz está ubicada principalmente en el Distrito Federal y Estado de México, 32,5%; Coahuila, 9,4%; Puebla, 9,0%; Nuevo León, 8,7%; Tamaulipas, 6,6%; Querétaro, 6,2%; Chihuahua, 5,4%; Baja California, 4,8%; Jalisco, 3,8%; San Luis Potosí, 3,0%; Sonora, 2,8%; en otros estados se completa el 7,8% restante.

Particularmente, en la industria del plástico se estima que son 100 las empresas que moldean plásticos, de las cuales 25 pertenecen al grupo de las de primer nivel (Tier 1).

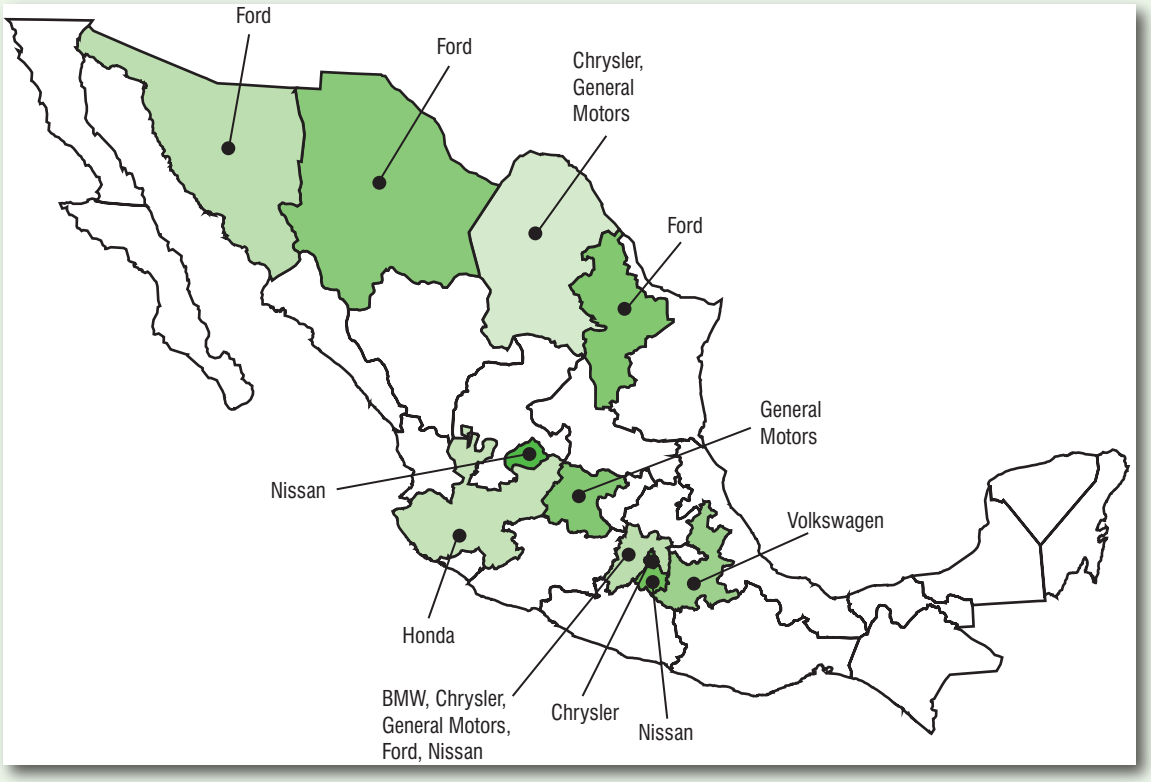


Figura 3.15 *Localización de empresas armadoras de automóviles.*

Entre los plásticos que se utilizan en la industria automotriz se incluye al PVC para diversos recubrimientos interiores y perfilería, los compuestos fenólicos para balatas y algunas piezas del interior del motor, así como algunos otros compuestos termofijos.

Cada firma cuenta con especificaciones individuales y decide qué plástico y proceso va a utilizar, en función, obviamente, del costo, la seguridad, la apariencia, el lujo, la originalidad, la tecnología y el volumen de producción, entre otros factores.

3.19 Bibliografía

Geankoplis, *Procesos de transporte y operaciones unitarias*, CECSA, México, 2004.

Green W., Perry R.H., *Perry´s Chemical Engineers´ Handbook*, 7a edition, McGraw-Hill, New York, 2006.

Capítulo

4

Mezcla de gas sin reacción con balance de masa

El esmog es una mezcla de gases y las fosas nasales tienen la función de separar los gases permitiendo sólo la entrada de O_2 a los pulmones. *(Jupiter Images Corporation)*

4.1 Propiedades de los gases ideales

Los gases carecen no sólo de forma, sino de volumen, dado que donde exista espacio libre, allí irán las moléculas inestables del gas y éste se expandirá hasta llenar en su totalidad cualquier recipiente. Los gases tienen bajas densidades, son altamente compresibles si ocupan un volumen bastante grande, no tienen rigidez y poseen viscosidades muy bajas (en la figura 4.1 se muestra la distribución instantánea de las moléculas de un volumen pequeño de gas); las moléculas se encuentran separadas, generalmente a gran distancia entre sí, comparada con su diámetro, y no existe ninguna regularidad en sus disposiciones en el espacio.

Con el incremento de la temperatura, todos los cuerpos se dilatan debido a que el mayor movimiento de sus moléculas los obliga a ocupar más espacio; en los sólidos y los líquidos, que son prácticamente incompresibles, las variaciones de volumen son evidentes, pero los gases son muy elásticos; si el recipiente que los contiene es rígido, sólo se aprecia un aumento de presión, puesto que el gas no tiene posibilidad de dilatarse.

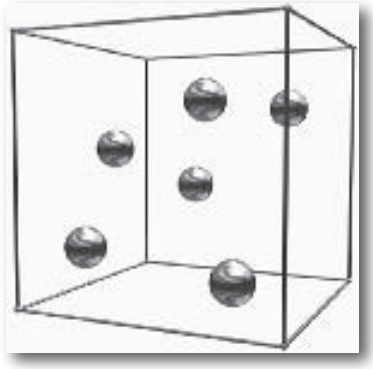


Figura 4.1 *Moléculas en un volumen de gas a temperatura ambiente, un cubo de aproximadamente 20 Å, a una presión de cerca de 20 atmósferas (las moléculas se representan como simples esferas).*

Dadas las posiciones de dos o tres moléculas, no es posible predecir con cierta precisión dónde se hallará una respecto de otra, aunque la experiencia indica que están en colisión continua entre sí y con las paredes que las contienen.

De modo experimental, se sabe que las moléculas individuales de un gas se mueven a velocidades enormes y, como son incontables, por pequeño que sea el volumen que ocupan estas diminutas y numerosas moléculas, no es posible medir la velocidad o el número de colisiones por segundo de manera individual; sin embargo, se ha calculado que las moléculas de un gas se mueven a una velocidad media comparable con la del sonido, o sea del orden de 10^4 cm/s.

Ocasionalmente, se pueden encontrar dos o tres moléculas muy próximas, con sus nubes de electrones traslapadas, de manera que quedan unidas unas con otras; estos conglomerados se producen a altas presiones, pero su tiempo de vida suele ser corto.

La baja densidad se puede explicar porque el número de moléculas por unidad de volumen es relativamente pequeño, mientras que la alta compresibilidad se debe a que la distancia promedio entre las moléculas se puede alterar dentro de límites muy amplios.

Por su parte, la falta de rigidez se explica por el hecho de que las moléculas son capaces de adoptar cualquier configuración con la misma facilidad; además, las moléculas pueden recorrer grandes distancias (en relación con su diámetro) sin encontrarse una con la otra, de manera que existe poca resistencia a cualquier clase de movimiento, lo que explica la baja viscosidad.

Existen gases muy livianos como el hidrógeno, el cual pesa menos de un centésimo de lo que pesa el aire, y gases muy pesados como el radón (descubierto por F. E. Dorn en el año 1900), el cual pesa unas diez veces más que el aire.

De hecho, una de las primeras aplicaciones prácticas de los gases fue el uso de los globos aerostáticos con hidrógeno y aire caliente (véase figura 4.2).

Otra aplicación importante en la actualidad es la conexión a Internet mediante globos aerostáticos. Los globos de hidrógeno ya comienzan a usarse tanto como una alternativa de conexión a la red como para dar cobertura a los teléfonos y radios móviles.

Figura 4.2 *Una de las aplicaciones inmediatas en el proceso de calentamiento de los gases es en los globos aerostáticos, creados por los hermanos Montgolfier en 1783.*
(Jupiter Images Corporation)

El principio en el cual se basaron los primeros viajes aéreos radica en el hecho de que cuando un gas se calienta sus moléculas se agitan y tienden a separarse, entonces la masa gaseosa ocupa un volumen mayor y, por ende, su peso específico (peso por unidad de volumen) disminuye.

De aquí que el aire caliente sea más liviano que el frío y tienda a ascender, hecho fundamental en **meteorología**.

4.2 Teoría cinética molecular

En un intento por comprender por qué la relación $\frac{PV}{T}$ (V es el volumen molar). Para diferenciarlo del volumen total, $\frac{P\hat{V}}{T}$ es constante para todos los gases a presiones relativamente bajas, los científicos crearon el modelo de gas ideal, que cumple estrictamente con las leyes enunciadas por Boyle, Charles, Gay Lussac y el principio de Avogadro. El estudio formulado mediante el planteamiento matemático derivado de los promedios de las propiedades de un gas a nivel molecular, el cual posee una extraordinaria exactitud, se conoce como **teoría cinética molecular**, cuyo fundamento inicial se debe a Daniel Bernoulli en 1738 y a Maxwell y Boltzmann entre 1860 y 1870. De dichos trabajos se producen las siguientes suposiciones y postulados básicos:

- Los gases se componen de pequeñas partículas esféricas llamadas moléculas y la distancia promedio entre éstas es tan grande que el volumen real que ocupan es despreciable comparado con el vacío encontrado entre las mismas.
- No existen fuerzas de atracción o de repulsión entre las partículas que forman un gas, y se puede considerar que se comportan como masas muy pequeñas.
- Las moléculas gaseosas se mueven a altas velocidades, en forma recta, desordenada y continua.
- Los gases ejercen una presión continua sobre las paredes del recipiente que los contienen debido a los choques de las moléculas con las paredes de éste.

- Los choques moleculares son perfectamente elásticos (no hay cambio de energía).
- No se toman en cuenta las interacciones de atracción y de repulsión molecular.
- La energía cinética media de la traslación de una molécula es directamente proporcional a la temperatura absoluta del gas.

4.3 Ley general de los gases

Se han desarrollado leyes empíricas para los gases que relacionan las variables P (presión), V (volumen) y T (temperatura absoluta) con base en resultados derivados de experiencias en el laboratorio. Estas variables no son independientes entre sí, sino que cada una de ellas está siempre en función de las otras (por ejemplo, la temperatura depende de la presión y del volumen, así como de la masa del sistema). Para que un gas se pueda considerar ideal ha de cumplir las dos condiciones ideales:

1. Que el volumen de sus partículas sea nulo.
2. Que no existan fuerzas de atracción o repulsión entre ellas.

Si se relacionan las variables mencionadas anteriormente se obtiene la ecuación del gas ideal:

De acuerdo con el principio de Avogadro, se sabe que el volumen es proporcional a la cantidad de materia de estudio, por lo que:

$$V \alpha n$$

por tanto,

$$V = k\, n$$

Por otro lado, la ley de Boyle y Mariotte establece que el volumen es inversamente proporcional a la presión siempre que la temperatura permanezca constante, por lo que:

$$V \alpha \frac{1}{P}$$

por tanto,

$$V k' \frac{1}{P}$$

Por último, de acuerdo con la ley de Charles y de Gay Lussac, el volumen es proporcional a la temperatura siempre que la presión permanezca constante en el sistema; este postulado se puede expresar de la siguiente manera:

$$V \alpha \frac{P}{T}$$

por tanto,

$$V = k'' \frac{P}{T}$$

donde k, k' y k'' son constantes de proporcionalidad en las que están englobadas la cantidad de sustancia expresada en moles (n) y la constante general del estado gaseoso R, de tal manera que al unir cada una de las expresiones anteriores llegamos a la siguiente ecuación:

$$R = \frac{PV}{nT} = \frac{1\,\text{atm}\ 22,4\,\text{L}}{1\,\text{mol}\ 273\,\text{K}} = 0,082\,\frac{\text{L atm}}{\text{mol K}}$$

donde la expresión más conocida y empleada es la siguiente:

$$PV = nRT$$

El valor de R puede hallarse sabiendo que un mol de gas ocupa 22,4 L a 1 atm y 273 K:

$$R = \frac{PV}{nT} = \frac{1\,\text{atm}\ 22,4\,\text{L}}{1\,\text{mol}\ 273\,\text{K}} = 0,082\,\frac{\text{L atm}}{\text{mol K}}$$

La ecuación anterior resulta muy útil cuando se expresa en forma de proporcionalidad, entre las variables de las condiciones inicial y final; así, para una misma masa gaseosa:

$$\left.\begin{aligned} P_1V_1 &= nRT_1 \\ P_2V_2 &= nRT_2 \end{aligned}\right\} \text{Dividiendo y ordenando se obtiene: } \frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$$

A partir de la ecuación de estado $PV = nRT$ se pueden obtener expresiones para la masa y la densidad de los gases.

La densidad, que es la relación de la masa por unidad de volumen de una sustancia, se puede expresar en forma directa de la siguiente manera:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

De acuerdo con la ley del estado gaseoso, es posible determinar una ecuación para la densidad en forma indirecta como se muestra enseguida:

Primero, recuérdese que:

$$PV = nRT$$

Segundo que:

$$n = \frac{m}{PM}$$

Sustituyendo n en la ley general se obtiene:

$$PV = \frac{mRT}{PM}$$

Despejando la relación de volumen entre masa:

$$\frac{V}{m} = \frac{RT}{PM\,P}$$

Finalmente, invirtiendo la relación anterior e igualándola a la densidad se llega a la ecuación indirecta de la densidad de un gas:

$$\rho = \frac{PM\,P}{RT}$$

de la cual se puede despejar la masa:

$$m = \frac{V\ PM\ P}{RT}$$

donde:

ρ = densidad del gas individual o densidad total para la mezcla de gas.

PM = peso molecular para un gas individual o peso molecular promedio para una mezcla de gas.

V = volumen del gas en forma individual o volumen total para la mezcla de gas.

P = presión del gas en forma individual o presión total para la mezcla de gas.

T = temperatura del gas o de la mezcla de gas.

R = constante general del estado gaseoso.

m = masa del gas individual o masa total para la mezcla de gas.

Tomando en cuenta que P es la presión de la mezcla gaseosa, V es el volumen del gas que corresponde al volumen del contenedor, n es el número de moles del gas, T es la temperatura absoluta del sistema, R es la constante general del estado gaseoso con las condiciones ideales de un sistema gaseoso:

Unidades comunes	**Sistema Internacional (SI)**
$N = 1$ mol de cualquier sustancia	$n = 1$ mol de cualquier sustancia
$P = 1$ atm	$P = 10^5$ Pa $= 10^5$ kg/m s^2
$T = 273$ K	$T = 273$ K
$V = 22{,}4$ L	$V = 0{,}022$ m^3

$$R = \frac{PV}{nT} = \frac{(1\text{ atm})(22{,}4\text{ L})}{(1\text{ mol})(273\text{ K})} = 0{,}082\,\frac{\text{atm L}}{\text{mol K}}$$

$$R = \frac{PV}{nT} = \frac{(10^5\text{Pa})(0{,}0224\text{ m}^3)}{(1\text{ mol})(273\text{ K})} = 8{,}2\,\frac{\text{Pa m}^3}{\text{mol K}} = 8{,}2\,\frac{\text{Kg m}^2}{\text{mol K s}^2} = 8{,}2\,\frac{\text{J}}{\text{mol K}}$$

4.4 Mezcla de gases

Las leyes de los gases se aplican tanto a gases individuales como a mezclas de éstos; en este último caso, la presión total de la mezcla gaseosa es igual a la suma de las presiones que ejercería cada gas individualmente al ocupar el mismo volumen a la temperatura de la mezcla.

La ley general del estado gaseoso se aplica no sólo a sustancias puras, sino también a mezclas de gases, su expresión es:

$$PV = nRT$$

Cuando se trata de una sola sustancia, en caso de tener una mezcla gaseosa, la fórmula puede expresarse de la siguiente manera:

$$P_T V_T = n_T RT$$

donde P_T, V_T y n_T se refieren a la presión, el volumen y el número de moles totales, donde:

$$P_T = \sum P_i = P_1 + P_2 + P_3 + \ldots + P_k$$

$$V_T = \sum V_i = V_1 + V_2 + V_3 + \ldots + V_k$$

$$n_T = \sum n_i = n_1 + n_2 + n_3 + \ldots + n_k$$

donde k, representa el número de sustancias presentes en la mezcla.

P_i es la presión parcial del gas i y la presión que ejercería el gas i si estuviera puro en el mismo volumen y a la temperatura de la mezcla.

El número total de moles es:

$$n_T = \frac{m_T}{PM}$$

donde m_T es la masa total de todos los gases involucrados es:

$$m_T = \sum m_i = m_1 + m_2 + m_3 + \ldots + m_k$$

y el $\overline{PM}$ es el peso molecular promedio:

$$\overline{PM} = \sum x_i PM_i = x_1 PM_1 + x_2 PM_2 + x_3 PM_3 + \ldots + x_k PM_k$$

aquí, x_i representa la fracción mol de cada componente de la mezcla gaseosa y PM_i es el peso molecular de cada gas:

$$x_i = \frac{n_i}{n_T}$$

Recordando los conceptos vistos en el capítulo anterior para los gases ideales se tiene:

$$x_i = \frac{n_i}{n_T} = \frac{V_i}{V_T} = \frac{P_i}{P_T}$$

$$\%\text{mol} = \%\text{volumen} = \%\text{presión} = x_i \times 100\%$$

$$x_i \neq \overline{x}_i$$

$$\overline{x}_i = \frac{m_i}{m_T}$$

$$\%\ \text{peso} = \frac{m_i}{m_T} \times 100\% = \overline{x}_i \times 100\%$$

Además de estas fórmulas es importante incluir el concepto de densidad de una mezcla gaseosa:

$$\rho_T = \frac{m_T}{V_T}$$

donde ρ_T es la densidad total de la mezcla (esta propiedad no es aditiva, es decir, la densidad total no es la suma de las densidades de cada componente de la mezcla), o sea

$$\rho_T \neq \sum \rho_i$$

donde la densidad de un componente es:

$$\rho_i = \frac{m_i}{V_i}$$

y la densidad total sólo se obtiene de la siguiente manera:

$$\rho_T = \frac{m_T}{V_T} = \frac{\sum m_i}{\sum V_i} = \frac{m_1 + m_2 + m_3 + \ldots + m_k}{V_1 + V_2 + V_3 + \ldots + V_k}$$

4.5 Metodología para resolver problemas de mezcla de gases sin reacción

En el capítulo 3 se estudiaron cinco pasos a seguir para la solución de problemas de conversión de unidades; en este apartado se amplían los puntos que servirán de apoyo en la resolución de problemas de mezcla de gases sin reacción:

1. Leer el problema.
2. Analizar el problema y plantear las preguntas implicadas.
3. Elaborar un diagrama representativo que incluya todos los datos proporcionados implícita y explícitamente en el problema, así como las preguntas.
4. Realizar las conversiones que sean necesarias para cumplir con las unidades dimensionales de *R*.
5. Elaborar un diagrama que incluya las variables de estado en las entradas y salidas del proceso.
6. Elaborar una tabla en donde se indiquen: sustancias involucradas, pesos atómicos o moleculares, datos, fórmulas y expresiones del problema (se recomienda incluir la fracción mol, ya que esta variable permite obtener, en caso necesario, datos como los porcentajes de mol, de volumen, de presión y de peso molecular promedio de la mezcla).
7. Determinar cuantitativamente los valores de las tablas, aplicando las fórmulas correspondientes, así como su análisis dimensional.
8. Dar respuesta a las preguntas del problema.

4.6 Aplicación de la metodología para resolver problemas de mezcla de gases sin reacción

Ejemplo 1

Por una tubería fluyen 200 L/min a 5 atm y 170 °C de una mezcla de CO, CO_2, N_2 y O_2 con la composición en peso siguiente: 30% de CO, 7% de CO_2, 28% de N_2 y 35% de O_2, la cual se mezcla con otra línea de aire que contiene 21% mol de O_2 y 79% mol de N_2, que maneja 120 L/min a 30 °C y 2,8 atm; se conoce que la mezcla de salida está a 110 °C y 3 atm. Con esta información responda las siguientes preguntas:

a) ¿Cuál es el peso molecular promedio de las mezclas a la entrada y a la salida de los gases?

b) ¿Cuál es la densidad a la entrada y a la salida de los gases?

c) ¿Cuáles son las presiones parciales a la salida del mezclador?

d) ¿Cuál es la composición en peso de la mezcla resultante?

e) ¿Cuáles son los volúmenes parciales a la salida del mezclador?

f) ¿Cuál es el por ciento en mol de la salida del mezclador?

g) Generar la tabla de entrada y salida de masa.

Solución:

1. En la primera lectura es posible observar que se produce una mezcla de gases formada por dos líneas de entrada y una de salida; en total existen tres líneas. Hay datos para las variables de estado, porcentajes en peso y mol, gasto másico y volumétrico. Las propiedades y variables que se desean conocer son la densidad, el peso molecular promedio, el por ciento en peso y en mol, además de las presiones y los volúmenes parciales.

2. Analizar el problema y plantear las preguntas implicadas:

   Una tubería lleva 200 L/min.

   El gasto volumétrico es de 200 L/min y si se fija el tiempo en 1 minuto, es posible calcular el volumen con la siguiente ecuación:

$$V = G_V \theta$$

$$= 200 \frac{\text{L}}{\text{min}} \times 1 \text{ min}$$

$$= 200 \text{ L}$$

   …a 5 atm y 170 °C.

   Con los datos de las variables de presión (5 atm) y de temperatura (170 °C) se aplica la ley general del estado gaseoso $PV = nRT$ para conocer el número de moles de la ecuación: $n = \frac{PV}{RT}$

   …de una mezcla de CO, CO_2, N_2 y O_2, con la composición en peso siguiente: 30% de CO, 7% de CO_2, 28% de N_2 y 35% de O_2.

   Con estos datos se obtiene la masa total de la mezcla. Aquí es necesario utilizar una base de cálculo que puede ser de 100 g (para facilitar los cálculos), de tal forma que puede calcularse la fracción peso $\left(\overline{x_i} = \frac{\%\text{ peso}}{100\%}\right)$ y con la base de 100 g se obtiene la masa de cada componente $(m_i = \overline{x_i} \times m_T)$; además, con el peso molecular de cada componente se obtienen los moles individuales de las sustancias y totales de la mezcla, que sirve para determinar la fracción mol (que no cambia aunque las cantidades sean diferentes). Conociendo estos valores, se obtienen el número de moles de cada componente en la mezcla $(n_i = x_i n_T)$ y con su peso molecular, la masa real de cada componente $(m_i = n_i PM_i)$.

   …se mezcla con otra línea de aire que contiene 21% mol de O_2 y 79% mol de N_2.

   Con los datos de la mezcla de aire se conoce su fracción mol, y con el número de moles totales se determinan los moles de cada componente o conociendo el peso molecular

promedio del aire ($\overline{PM_i} = \sum x_i PM_i$) se puede conocer la masa de la mezcla y con su peso molecular la masa de cada componente.

…que maneja 120 L/min a 30 °C y 2,8 atm.

Estos datos corresponden al volumen, la presión y la temperatura de la segunda entrada, por lo que se puede determinar el número de moles de aire $\left(n = \frac{PV}{RT}\right)$ y por ende los moles y masa de cada componente en dicha entrada.

…se conoce que la mezcla de salida está a 110 °C y 3 atm.

Con los datos de salida de temperatura, presión y número de moles de cada componente mezclados ($n_{\text{salida}} = n_{\text{entrada 1}} + n_{\text{entrada 2}}$), se puede conocer el volumen de salida $\left(V = \frac{nRT}{P}\right)$. Los datos de moles sirven para calcular la fracción de salida y las masas de cada componente; conociendo la fracción mol se tienen los volúmenes y las presiones parciales, el porcentaje en volumen, la presión, los moles, así como el peso molecular promedio.

Con la información responda las siguientes preguntas:

a) El peso molecular a las entradas y salida de los gases.

Como se puede ver, los pesos moleculares (PM_i) a las entradas y salida de los gases y la fracción mol (x_i) de cada componente son conocidos, al registrarlos en una tabla ayudan a calcular los pesos moleculares promedio de cada línea con la siguiente ecuación: $\overline{PM_i} = \sum x_i PM_i$

b) La densidad a las entradas y salida de los gases.

La densidad de las mezclas de gases a las entradas y a la salida la obtenemos con la siguiente ecuación, ya que todas las masas y los volúmenes de las líneas son conocidos:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

c) Las presiones parciales a la salida del mezclador.

Éstas son calculadas con $P_i = x_i \times P_T$

d) El por ciento en peso de la mezcla resultante es determinado con la siguiente ecuación:

$$\%\ \text{peso} = \frac{m_i}{m_T} \times 100\%$$

e) Los volúmenes parciales a la salida del mezclador se obtienen aplicando la fórmula:

$$V_i = x_i \times V_T$$

f) El por ciento en mol a la salida del mezclador se obtiene con la relación:

$$\%\ \text{mol} = x_i \times 100\%$$

g) Generar el balance de masa correspondiente.

Para generar el balance de masa es necesario recordar que, de acuerdo con la ley de conservación de la materia, la suma de las masas a la entrada de un sistema debe ser igual a la suma de las masas a la salida del mismo, por lo que:

$$\sum m_{\text{entrada}} = \sum m_{\text{salida}}$$

De la misma manera, para un sistema sin reacción química, se aplica a los moles:

$$\sum n_{\text{entrada}} = \sum n_{\text{salida}}$$

Por lo que en el problema que nos compete las fórmulas aplicadas serían:

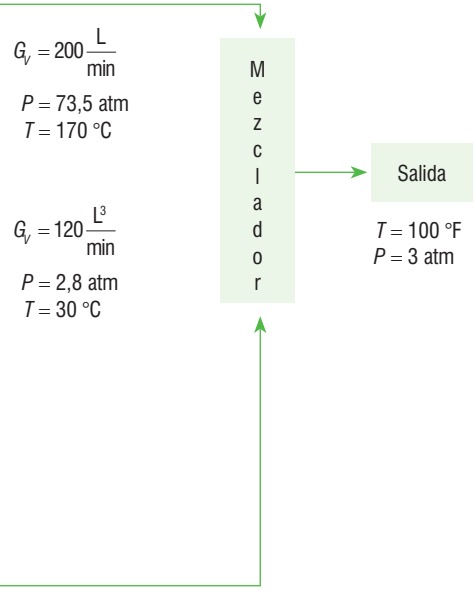
$$\sum (m_{\text{entrada 1}} + m_{\text{entrada 2}}) = \sum m_{\text{salida}}$$

$$\sum (n_{\text{entrada 1}} + n_{\text{entrada 2}}) = \sum n_{\text{salida}}$$

3. Elaborar un diagrama representativo del problema que incluya todos los datos y las preguntas del mismo (planteamiento), para ello es indispensable haber comprendido el problema (esto es, haber realizado el análisis por partes como se vio en el punto anterior).

Entrada 1	
Sustancia	**% peso**
CO	30
CO_2	7
N_2	28
O_2	35
Total	**100**

Entrada 2	
Sustancia	**% mol**
N_2	79
O_2	21
Total	**100**



4. Efectuar todas las conversiones necesarias para cumplir con las unidades dimensionales de la constante general del estado gaseoso.

Como regla general, el aspecto que rige las unidades dimensionales en problemas de gases es la constante general del estado gaseoso:

$$R = 0,082 \frac{\text{atm L}}{\text{mol K}}$$

por lo que las unidades de la presión, el volumen y la temperatura deben estar en atmósferas, litros y grados Kelvin, respectivamente; entonces, se tiene para las entradas y la salida:

$$P_1 = 73{,}5\frac{\text{lb}}{\text{in}^2} \times \frac{1\ \text{atm in}^2}{147\ \text{lb}} = 5\ \text{atm} \qquad P_2 = 2{,}8\ \text{atm}$$

$$T_1 = 170\ ^\circ\text{C} + 273 = 443\ \text{K} \qquad T_2 = 30\ ^\circ\text{C} + 273 = 303\ \text{K}$$

$$V_1 = 7{,}06\ \text{ft}^3 \times \frac{28{,}32\ \text{L}}{1\ \text{ft}^3} = 200\ \text{L} \qquad V_2 = 120\ \text{dm}^3 \times \frac{1\ \text{L}}{1\ \text{dm}^3} = 120\ \text{L}$$

$$P_3 = 2\,280\ \text{mmHg} \times \frac{1\ \text{atm}}{760\ \text{mmHg}} = 3\ \text{atm}$$

$$T_3 = \frac{230\ ^\circ\text{F} - 32}{1{,}8} + 273 = 383\ \text{K}$$

5. Elaborar una tabla con las condiciones de las variables en las entradas del proceso, y si es necesario también a la salida.

Variables					
	Presión (atm)	**Volumen (litros)**	**Temperatura (K)**	**Constante R (atm L/mol K)**	**Número de moles**
Entrada 1	5	200	443	0,082	27,53*
Entrada 2	2,8	120	303	0,082	13,52*
Salida (3)	3	429,74&	383	0,082	41,05ψ

* Para calcular el número de moles en las entradas 1 y 2 se sustituyen los valores correspondientes en la relación $n = \frac{PV}{RT}$.

& Como el número de moles de entrada es igual a los de salida $n_{\text{salida}} = n_1 + n_2$.

ψ Se obtiene de sustituir los valores convenientes en la fórmula $V_3 = \frac{n_{\text{salida}} RT_{\text{salida}}}{P_{\text{salida}}}$.

6. Elaborar una tabla en donde se indiquen: sustancias involucradas, pesos atómicos o moleculares, datos, fórmulas y expresiones del problema (se recomienda incluir la fracción mol, ya que esta variable permite obtener, en caso necesario, datos como los porcentajes de mol, de volumen, de presión y de peso molecular promedio de la mezcla).

Entrada 1	
Sustancia	**% peso**
CO	30
CO_2	7
N_2	28
O_2	35
Total*	**100**

*Se debe comprobar que la suma del porcentaje peso sea igual a 100%.

La elección de una base de cálculo para la masa $m_T = 100$ g es arbitraria, ya que puede utilizarse cualquier otra masa; sin embargo, es práctico elegir 1 g o múltiplos de 10 g por la facilidad de cálculo, la estructura de la tabla se muestra a continuación:

Entrada 1					
Sustancia	**% peso**	$m_i = \left(\frac{\%\ \text{peso}}{100\%}\right) \times m_T$ (g)	PMi (g/mol)	$n_i = \left(\frac{m_i}{PM_i}\right)$ (mol)	$x_i = \left(\frac{n_i}{n_T}\right)$
CO	30				
CO_2	7				
N_2	28				
O_2	35				
Total	**100**			n_T*	1.00&

* En esta columna se obtiene el número total de moles de la entrada 1.
& La suma de la fracción molar de todos los componentes debe ser igual a 1.

Se incluyen tres columnas más, conociendo el valor de $n_1 = 27{,}53$ moles.

(continuación **Entrada 1**)			
Sustancia	$n_i = (x_i \times n_1)$ (mol)	$m_i = (n_i \times PM_i)$ (g)	$PM_{prom} = x_i \times PMi$ (g/mol)
CO			
CO_2			
N_2			
O_2			
Total			$PM_{promedio}$

La tabla para la entrada 2 ($n_2 = 13{,}52$ moles) es similar a la elaborada anteriormente, y se muestra enseguida:

Entrada 2					
Sustancia	**% peso**	$n_i = \left(\frac{\%\ \text{mol}}{100}\right) \times n_2$ (mol)	PM_i (g/mol)	$m_i = (n_i \times PM_i)$ (g)	$PM_{prom} = x_i \times PM_i$ (g/mol)
N_2	79				
O_2	21				
Total	**100**	n_2		m_2	$PM_{promedio}$

Como se observa, en ambas tablas (entradas 1 y 2) se tiene la cantidad de masa y el número de moles para cada uno de los componentes, con lo cual se puede continuar con la tabla de salida:

Salida								
Sustancia	n_i (mol)	PMi (g/mol)	$m_i = (n_i \times Pm_i)$ (g)	$x_i = \left(\frac{n_i}{n_3}\right)$	$PM_{prom} = x_i \times PM_i$ (g/mol)	$P_i = x_i P_3$ (atm)	$V_i = x_i V_3$ (L)	%mol = $x_i \times 100$ (%mol)
CO	[1]							
CO_2	[2]							
N_2	[3]							
O_2	[4]							
Total	n_3		m_3	1	$PM_{promedio}$	P_3	V_3	100

[1] $n_{CO} = (n_{CO})_{E1} + (n_{CO})_{E2} = (n_{CO})_S$, [2] $n_{CO2} = (n_{CO2})_{E1} + (n_{CO2})_{E2} = (n_{CO2})_S$, [3] $n_{N2} = (n_{N2})_{E1} + (n_{N2})_{E2} = (n_{N2})$, [4] $n_{O2} = (n_{O2})_{E1} + (n_{O2})_{E2} = (n_{O2})_S$.

Entrada 1(E_1) Base de cálculo m_T = 100 g								
Sustancia	n_i (mol)	m_i = (% peso × 100)/m_T	PM_i (g/mol)	$n_i = \left(\frac{m_i}{PM_i}\right)$ (g)	$x_i = \left(\frac{n_i}{n_3}\right)$	$n_i = (x_i \times n_1)$ n_1 = 27,53 (mol)	$m_i = (n_i \times PM_i)$ (g)	$PM_{prom} = (x_i \times PM_i)$ (g/mol)
CO	30	30	28	1,07	0,32	8,81	246,68	8,96
CO_2	7	7	44	0,16	0,05	1,38	60,72	2,20
N_2	28	28	28	1	0,30	8,26	231,28	8,40
O_2	35	35	32	1,09	0,33	9,08	290,56	10,56
Total	**100**	m_T = 100		n_T = 3,32	1	27,53	m_1 = 829,24	30,12

7. Determinar el valor de las variables con las relaciones correspondientes.

Siguiendo el mismo procedimiento se elabora la tabla para la entrada 2:

Entrada 2 (E_2) n_2 = 13,56 moles						
Sustancia	% mol	$n_i = \left(\frac{\%\ mol}{100}\right) \times n_2$	PM_i (g/mol)	$m_i = (n_i \times PM_i)$	$x_i = \left(\frac{\%\ mol}{100}\right)$	$PM_{prom} = (x_i \times PM_i)$
N_2	79	10,71	28	299,88	0,79	22,12
O_2	21	2,85	32	91,20	0,21	6,72
Total	**100**	n_2 = 13,56 (mol)		m_3 = 391,08 (g)	1	28,84 (g/mol)

Para la salida, los resultados obtenidos son:

Salida 1								
Sustancia	n_i $(E_1 + E_2)$	PM_i	$m_i = (n_i \times PM_i)_T$	$x_i = \left(\frac{n_i}{n_3}\right)$	$PM_{prom} = (x_i \times PM_i)$	$P_3 = 3$ atm $P_i = x_i \times P_3$	% mol $= (x_i \times 100)$	$V_3 = 430{,}16$ $V_i = (x_i \times V_3)$
CO	8,81	28	246,68	0,2144	6	0,64	21,44	92,23
CO_2	1,38	44	60,72	0,0336	1,48	0,10	3,36	14,45
N_2	18,97	28	531,16	0,4617	12,93	1,39	46,17	198,60
O_2	11,93	32	381,76	0,2903	9,24	0,87	29,03	124,88
Total	**$n_3 = 41{,}09$**		**1 220,32**	**1**	**29,70**	**$P_3 = 3$**	**100**	**$V_3 = 430{,}16$**

Las tablas muestran sólo los resultados, los cálculos se deberán realizar con cada una de las expresiones mostradas abajo de la propiedad indicada.

Hay que observar que las tablas de entrada de cálculo para cada componente ya no son necesarias, porque todas siguen la misma aplicación de fórmulas, debido a eso se pueden llenar utilizando sólo los datos requeridos y aplicando las expresiones necesarias. Para dejar claro este punto se elegirá la línea de cálculo del N_2 en la tabla de salida, como muestra del uso práctico de las tablas:

$$n_{N_2} = (8{,}26 + 10{,}71)\,\text{mol} = 18{,}97\ \text{mol}$$

$$m_{N_2} = 18{,}97\ \text{mol} \times 28\ \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 531{,}16\ \text{g}$$

$$x_{N_2} = \frac{18{,}97\ \text{mol}}{41{,}09\,\text{mol}} = 0{,}4617$$

$$x_{N_2} PM_{N_2} = 0{,}4617 \times 28\ \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 12{,}93\ \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$P_{N_2} = x_{N_2} P_T = 0{,}4617 \times 3\ \text{atm} = 1{,}39\ \text{atm}$$

$$\%\ \text{mol}\, N_2 = 0{,}4617 \times 100\ \% = 46{,}17\ \%$$

Para calcular el volumen parcial (V_3) se requiere obtener el volumen total (V_T):

$$V_3 = \frac{n_3 R T_3}{P_3} = \frac{41{,}09\ \text{mol} \times 0{,}082\ \frac{\text{atm L}}{\text{K mol}} \times 383\ \text{K}}{3\ \text{atm}} = 430{,}16\ \text{L}$$

$$V_{N_2} = 0{,}4617 \times 430{,}16\ \text{L} = 198{,}60\ \text{L}$$

8. Dar respuesta a las preguntas del problema.

En esta parte se utilizan las tablas elaboradas con la información necesaria para realizar los cálculos y completar las columnas correspondientes, y se anexan pequeñas tablas que contienen los resultados a las preguntas contenidas en el problema.

a)

	$PM_{promedio}$ (g/mol)
Entrada 1	30,12
Entrada 2	28,84
Salida 1	29,7

b)

	Densidad (g/L)
Entrada 1	4,15
Entrada 2	3,25
Salida 1	2,84

Entrada 1

$$V_1 = \frac{n_1 RT_1}{P_1} = 200\ \text{L}$$

$$\rho_1 = \frac{m_1}{V_1} = \frac{829,24\ \text{g}}{200,01\ \text{L}} = 4,15\ \frac{\text{g}}{\text{L}}$$

Entrada 2

En esta parte del ejemplo se usará una relación a partir de la ley general del estado gaseoso, para determinar la densidad:

$$PV = nRT$$

se sabe que $n = \frac{m}{PM}$, sustituyendo en la ecuación

$$PV = \frac{m}{PM}RT \quad \text{despejando}$$

$$\frac{m}{V} = \frac{P\ PM}{RT} \quad \text{pero} \quad \frac{m}{V} = \rho \quad \text{por tanto,}$$

$$\rho = \frac{P\ PM}{RT}$$

La ecuación antes aplicada a la entrada 2 permite calcular la densidad de dicha entrada:

$$\rho_2 = \frac{P_2\ PM_{\text{promedio 2}}}{RT_2} = \frac{2{,}8\ \text{atm} \times 28{,}84 \dfrac{\text{g}}{\text{mol}}}{0{,}082\ \dfrac{\text{L atm}}{\text{K mol}} \times 303\ \text{K}} = 3{,}25\ \frac{\text{g}}{\text{L}}$$

que es el mismo resultado para cuando se usa la relación:

$$\rho_2 = \frac{m_2}{V_2} = \frac{391{,}08\ \text{g}}{120\ \text{L}} = 3{,}25\ \frac{\text{g}}{\text{L}}$$

Salida 1

Los resultados de la densidad para las dos entradas del problema pueden obtenerse tanto por la ley general del estado gaseoso como por la relación de la masa y el volumen, y ello dependerá de los datos proporcionados, así la ρ_3 es:

$$\rho_3 = \frac{m_3}{V_3} = \frac{1\ 220{,}32\ \text{g}}{430{,}16\ \text{L}} = 2{,}84\ \frac{\text{g}}{\text{L}}$$

c)

Salida 1	
Sustancia	**P_i (atm)**
CO	0,64
CO_2	0,1
N_2	1,39
O_2	0,87
Total	**3**

d) El por ciento en peso se determina siguiendo la estructura de la tabla anexa siguiente:

Salida 1			
Sustancia	**$m_i = (n_i \times PM_i)_T$ (g)**	**$x_i = \left(\frac{n_i}{n_3}\right)$**	**% peso = ($\bar{x}_i \times 100\%$)**
CO	246,68	0,2021	20,21
CO_2	60,72	0,0498	4,98
N_2	531,16	0,4353	43,53
O_2	381,76	0,3128	31,28
Total	**1 220,32**	**1**	**100**

Como se ha indicado en el transcurso de la solución de este ejemplo, los distintos valores obtenidos pueden ser calculados directamente sobre las tablas que se han elaborado, con la condición de colocar, en la parte superior de la columna, la relación que da origen al valor calculado; para evitar errores, deberá realizarse un cálculo completo en la parte baja de la tabla que revele todo el proceso efectuado, por ejemplo:

$$\overline{x}_{CO} = \frac{246{,}68\ \text{g}}{1\,220{,}32\ \text{g}} = 0{,}2021$$

$$\%\ \text{peso}_{CO} = 0{,}2021 \times 100\% = 20{,}21\%$$

e) Para la determinación de los volúmenes parciales se deberá usar una tabla que muestre los resultados obtenidos:

Salida 1	
Sustancia	**V_i (L)**
CO	92,23
CO_2	14,45
N_2	198,60
O_2	124,88
Total	**430,16**

f) El por ciento en mol también se reporta de la misma manera:

Salida 1	
Sustancia	**% mol**
CO	21,44
CO_2	3,36
N_2	46,17
O_2	24,03
Total	**100**

g) Generar el balance de masa correspondiente:

Como ya se ha mencionado, en esta etapa del ejemplo se debe tomar en cuenta que la masa que entra al sistema debe ser igual a la masa que sale, por lo que:

$$\text{Mol de entrada} = \text{Mol de salida}$$

$$n_{\text{entrada 1}} + n_{\text{entrada 2}} = n_{\text{salida}}$$

$$27{,}53\ \text{mol} + 13{,}56\ \text{mol} = 41{,}09\ \text{mol}$$

$$41{,}09\ \text{mol} = 41{,}09\ \text{mol}$$

$$\text{Masa de entrada} = \text{Masa de salida}$$

$$m_{\text{entrada1}} + m_{\text{entrada2}} = m_{\text{salida}}$$

$$829{,}24\ \text{g} + 391{,}08\ \text{g} = 1\ 220{,}32\ \text{g}$$

$$1\ 220{,}32\ \text{g} = 1\ 220{,}32\ \text{g}$$

El ejemplo está completamente resuelto; con la metodología presentada se pretende que sea claro y práctico, sobre todo con el empleo de tablas, diagramas y resultados obtenidos. Adicionalmente, es muy importante mencionar que la solución de este tipo de problemas debe ser útil y debe hacer un bosquejo de la problemática industrial, en un proceso conjunto y en forma particular, para así poder analizar cada una de sus etapas que conlleve hacia la propuesta de procesos alternativos y/o modificaciones de ellos.

4.7 Actividades propuestas

1. La primera de las actividades propuestas consiste en resolver nuevamente el problema del ejemplo 13 utilizando una masa de base de cálculo diferente a 100 g y una constante general del estado gaseoso en unidades del SI.

2. En segundo término, se pide que realice la siguiente actividad:

➥ Coloque una hoja delgada de papel frente a la embocadura de un embudo, aspire por el tubo y describa ¿qué sucede con la hoja de papel y cuál es la interpretación correcta del fenómeno?

4.8 Problemas

Realice la siguiente lectura y con base en ésta conteste lo que se le pide:

Una muestra de gas natural fluye a 500 lb/in^2 y 250 °F, y se analiza para conocer su composición. A partir del análisis se calcula la cantidad de cada compuesto: CH_4 = 100 lb, C_2H_6 = 240 lb, C_3H_8 = 15 lb, H_2 = 50 lb. El gas natural se hace pasar a través de un absorbedor, donde se elimina 88% en volumen de propano (C_3H_8).

Determine:

1. La composición de la mezcla gaseosa a la salida del absorbedor, en por ciento en volumen.
2. El peso molecular promedio a la entrada del absorbedor.
3. La cantidad en gramos, separada de propano en el absorbedor.
4. Las presiones y los volúmenes parciales a la salida del absorbedor (considere CNPT).
5. La densidad de la mezcla gaseosa a la entrada y la salida del absorbedor.

6. Una tubería que lleva 3 000 L/min a 10 atm y 170 °C de una mezcla de CO, CO_2, N_2 y O_2 con la siguiente composición en por ciento en peso: 35% CO, 25% N_2, 10% CO_2 y el resto O_2, se mezcla con otra línea de aire (21% mol de O_2 y 79% mol de N_2) la cual conduce 1 800 L/min a 30 °C y 7 atm, se requiere saber cuál es el por ciento en volumen del CO en la tubería que lleva la mezcla resultante.

Realice la lectura siguiente y con base en ésta conteste lo que se le pide:

Se tienen dos corrientes de mezclas de gases que se alimentan en un absorbedor, donde se separa 50% peso del CO_2 y 25% peso del CO por absorción. La primera corriente que se alimenta al absorbedor es de 1500 lb/h de una mezcla gaseosa que tiene la siguiente composición en por ciento en mol, 15% de CO_2, 30% de CO, 20% de N_2 y el resto de O_2; la segunda línea que alimenta al absorbedor es de 43 000 L/h de aire con una composición de 79% mol de N_2 y 21% mol de O_2.

Las condiciones de la primera línea son: $T = 140$ °F y $P = 27$ lb/in^2.

Las condiciones de la segunda línea son: $T = 37$ °C y $P = 80$ mmHg.

Calcular:

7. La cantidad de CO_2 y CO que se eliminan en el absorbedor en kg/h.
8. El peso molecular promedio de la mezcla gaseosa a la entrada de cada línea.
9. El peso molecular promedio de la mezcla a la salida del absorbedor.
10. El volumen a la salida del absorbedor si la mezcla gaseosa tiene una temperatura de 25 °C y una presión de 1,05 atm.
11. La densidad del gas a la salida del absorbedor.
12. Las presiones y los volúmenes parciales a la salida del absorbedor.

Realice la lectura siguiente y con base en ésta conteste lo que se le pide:

En una planta conservadora de alimentos, accidentalmente se mezclaron 3 lb de CO_2 con aire; si la presión del CO_2 es de 18 lb/in^2 y al mezclarse con el aire la presión es de 1,8 atm y se encuentran contenidos en un recipiente de 0,5 ft^3.

Determine:

13. La cantidad de aire que entró al sistema.
14. La temperatura de la mezcla.
15. Las presiones parciales de cada componente de la mezcla final.
16. El peso molecular promedio de la mezcla.
17. La densidad de la mezcla.

Realice la lectura siguiente y con base en ésta conteste lo que se le pide:

En una planta de acondicionamiento de gas, un flujo de gas contiene 18% mol de CO_2 y 82% mol de CH_4; el flujo se alimenta a un absorbedor a una velocidad de 24,8 kg/min, donde se separa la mayor parte del CO_2. El gas que sale del absorbedor contiene 91% mol de metano.

Determine:

18. La composición en por ciento en peso de la alimentación.
19. La cantidad de CO_2 absorbida.
20. Las presiones parciales a la salida del absorbedor, si la presión de la mezcla es de 4 atm.
21. Se desea preparar una mezcla gaseosa con 20% mol de N_2 y 80% mol de CO_2. Un tanque de gas de 50 L de capacidad vacío se llena a una temperatura de 298 K con el N_2 hasta que la presión llega a 2 atm, se pesa y se le agrega CO_2 hasta obtener la composición deseada. Establezca:

a) El peso del CO_2 que permite tener la composición deseada en la mezcla.

b) La presión total de la mezcla final.

22. Los gases de una mezcla salen a un flujo de 10 m^3/h, a 7 kg/cm^2 y a 285 °C. La composición en por ciento en volumen de los gases es: CO_2 75%, CO 5%, SO_2 8%, aire 12 %; dicha mezcla pasa por un absorbedor de CO_2, donde se absorbe 97% mol de CO_2.

Determine:

a) La cantidad de CO_2 que se absorbe en gramos.

b) La composición de la mezcla a la salida del absorbedor en por ciento en peso.

c) El peso molecular promedio a la salida del absorbedor.

23. Una mezcla de gases de 15% peso de CH_4, 30% peso de CO_2, 35% peso de H_2O, 5% peso de O_2 y 15% peso de N_2 se encuentran a 8 kg/cm^2 y a 70 °C, con un volumen de 500 L.

Determine:

a) Las presiones parciales en la mezcla en lb/in^2.

b) La composición en por ciento en mol de la mezcla.

c) Las cantidades de masa de cada componente en lb.

24. En la producción del carbón activado empleado para la absorción se queman cáscaras de coco y se tratan con vapor recalentado, los gases resultantes en el proceso salen mezclados con vapor de agua. En una planta que emplea este proceso, el gas producido es de 100 000 ft^3/h a 850 °F y 15 lb/in^2 de presión absoluta y con el siguiente análisis volumétrico: N_2 10%, CO_2 5%, H_2O 15%, H_2 20%, NH_3 20%, CO 25% y C_2H_4 5%. Posteriormente, los gases se enfrían a 150 °F en un cambiador de calor. El resultado de este proceso es la separación de 90% de agua por condensación; luego, la mezcla gaseosa pasa por un absorbedor, donde se separa 97% del NH_3.

Determine:

a) El peso molecular promedio de la mezcla original.

b) El peso de agua condensada en el cambiador de calor.

c) La composición de los gases a la salida del absorbedor.

25. Un horno de coque produce 1 000 000 ft^3/h de un gas que tiene la siguiente composición en por ciento en volumen: C_6H_6 8%, C_3H_8 5%, CH_4 40%, CO 7%, H_2 35% y el resto es de CO_2. El gas sale del horno a 20 lb / in^2 y 740 °F. Después del enfriamiento a 100 °F, el benceno y el tolueno se eliminan en un 85% peso por absorción.

Determine:

a) El peso molecular promedio de la mezcla a la salida del horno y del absorbedor.

b) La masa del gas a la salida del horno.

c) La composición a la salida de la torre de absorción en por ciento en peso.

d) La masa de benceno y tolueno separado en lb.

26. Se tiene una mezcla de la siguiente composición en por ciento en mol: N_2 30%, CO 50%, H_2 15% y O_2 5%. Si la mezcla se encuentra en un reactor de 2 m^3, a una temperatura de 400 °C y una presión de 50 atm.

Determine:

a) La presión parcial de cada componente.

b) El peso molecular promedio de la mezcla.

c) El por ciento en peso de las componentes.

27. Una muestra de gas natural fluye a 700 psia y 320 °F, y se analiza para conocer su composición. El análisis permite calcular las siguientes cantidades: CH_4 600g, C_3H_8 380g, C_2H_6 1 300g y H_2 100g. El gas natural se hace pasar por un absorbedor donde se elimina 60% del volumen del C_3H_8 y 5% de H_2.

Determine:

a) La composición de la mezcla gaseosa que sale del absorbedor en por ciento en volumen.

b) El peso molecular promedio a la entrada y a la salida del absorbedor.

c) La composición en por ciento en mol de los gases separados.

d) Las cantidades de cada componente separado del absorbedor en libras.

e) La densidad de la mezcla de gases a la entrada del absorbedor en forma directa e indirecta.

f) Si la presión a la salida del absorbedor es la mitad de la entrada y la temperatura asciende a 43 °F, ¿qué densidad tiene la mezcla que sale del absorbedor?

28. Una mezcla que contiene 20% mol de CO, 30% mol de CO_2, 40% mol de N_2 y 10% mol de O_2, se encuentra a 600 °R y 30 lb/in^2 en un recipiente de 1 ft^3; ésta se pasa a través de un tanque donde se elimina 85% de CO_2, saliendo la mezcla a 1 atm y 25 °C.

Determine:

a) ¿Cuál es el peso molecular promedio de la mezcla al inicio y al final del proceso?

b) ¿Cuál es la presión parcial de cada componente a la salida?

c) La densidad de la mezcla a la entrada y a la salida del absorbedor.

29. De un alto horno se obtiene una mezcla gaseosa a 300 °F y 3 680 mmHg, la composición de la mezcla es la siguiente: 20% peso de SO_2, 50% peso de CO_2 y el resto es vapor de agua; esta mezcla se hace pasar por un enfriador, donde se separa toda el agua y 5% mol de SO_2.

Determine:

a) La cantidad de vapor de agua y SO_2 separada del enfriador.

b) La composición en por ciento en volumen de la mezcla que sale del enfriador.

c) El peso molecular promedio a la entrada y salida del enfriador.

d) Si a la salida del enfriador se sabe que la temperatura es de 25 °C y 585 mmHg.

Determine las presiones y los volúmenes parciales a la salida.

30. A un mezclador se alimentan 400 lb de N_2, 9 kg de Cl_2, 980 g de H_2 y 360 lb de CO_2 por una línea, y por la otra se alimenta aire (21% mol O_2 y 79% mol N_2). Se desea saber qué cantidad de aire se debe introducir al mezclador para que la mezcla finalmente tenga una concentración de 3% peso de CO_2.

4.9 Tema de actualidad

Ubican globos de sacerdote desaparecido en alta mar en Brasil

Martes 22 de abril de 2008 - 23:09:19

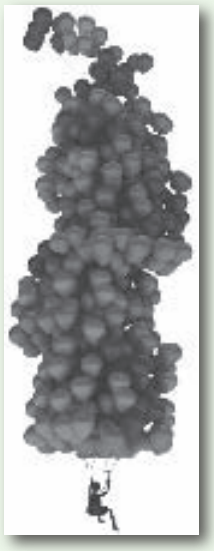


Figura 4.3 *El sacerdote Adelir de Carli conversó con la prensa el 20 de abril de 2008 antes de salir sostenido por 1 000 globos del puerto de Paranagua.*

La Fuerza Aérea Brasileña (FAB), que participa en la búsqueda de un sacerdote que desapareció el domingo en el mar, encontró parte de los mil globos que el religioso utilizó para realizar un vuelo aerostático.

Una aeronave militar fotografió un ramillete de globos a unos 50 km al este de la ciudad de Florianópolis, capital del sureño estado de Santa Catarina, pero "no observó señales" del sacerdote Adelir de Carli, indicó la FAB en un comunicado.

Las búsquedas continuarán el miércoles y las coordenadas fueron transmitidas a la Marina, que también participa en la búsqueda del sacerdote, quien trataba de realizar un vuelo con la ayuda de cerca de mil globos de los usados para fiestas, inflados con helio.

El religioso partió el domingo del puerto de Paranaguá, en el sureño estado de Paraná, con destino a Cascavel o Maringá, ciudades del mismo estado, cercanas a la frontera con Paraguay.

De Carli quería hacer una protesta en favor de unos camioneros, pero el tiempo adverso lo desvió de su ruta y lo condujo mar adentro.

El párroco, quien estaba equipado con dos teléfonos celulares y un equipamiento de localización GPS, llamó por última vez en la noche del domingo al servicio de salvamento marítimo para pedir ayuda.

De Carli había cubierto antes un trayecto de 110 km entre Paraná y la vecina ciudad argentina de San Antonio con la ayuda de 500 globos, en una aventura que tardó cuatro horas.

La contaminación en las Olimpiadas

Por Javier Gómez
Marzo 20, 2008

Haile Gebrselassie, el gran campeón etíope y primer favorito para ganar la medalla de oro en la prueba de maratón en los próximos Juegos Olímpicos de Beijing, anunció que no lo correría.

Figura 4.4 *La contaminación de Beijing, uno de los motivos por los cuales las delegaciones prefirieran Japón para su entrenamiento.* (Jupiter Images Corporaton)

Es el primero de algunos más que seguramente renunciarán a participar en las Olimpiadas de China que se celebrarán a partir del próximo verano, después del **informe que emitió la Comisión Médica del COI** (Comité Olímpico Internacional) en el que ha indicado que el nivel de contaminación es tal en la capital china, que conlleva cierto riesgo y podría afectar a la salud de aquellos participantes que actúen en pruebas que se realicen al aire libre.

Es el caso, por tanto, de deportes como el ciclismo, la maratón, la natación en mar abierto, la marcha o el triatlón. Esto se debe a que ese tipo de pruebas requieren de un esfuerzo físico continuo que implica una mayor cantidad de aire en los pulmones, en este caso, contaminado.

Obviamente, aunque China ya hace tiempo que viene luchando contra esa contaminación, es un problema que Beijing ha venido arrastrando desde hace lustros. La primera pregunta que ahora surge es si los intereses olímpicos están por encima de la salud de los deportistas, pues cuando se hace la elección de la sede cada cuatro años, temas como el medio ambiente, supuestamente, se deben tener en cuenta. ¿Nadie reparó en ese riesgo que ahora sale a la luz tras este informe médico?, ¿a nadie se le ocurrió pensar en los altos niveles de contaminación de la capital china?

- La selección argentina de fútbol y la de natación española prefieren el país vecino.
- Corea del Sur también recibirá equipos nacionales.
- El país del “Sol Naciente” cuenta con mejores instalaciones deportivas.

Japón será **el refugio** de varios equipos de diversas disciplinas de 25 países, entre ellos **España, Argentina, Cuba y Brasil,** en sus entrenamientos previos a los Juegos Olímpicos de Beijing por las buenas condiciones que ofrece, tanto ambientales como de cercanía.

Medios japoneses, como el diario *Asahi*, han informado que una **veintena** de **ciudades** japonesas acogerán a equipos nacionales desde finales de julio hasta mediados de agosto, cuando el último de ellos viajará a China, donde se enfrentará con la temida contaminación.

Así, la **selección argentina de fútbol** creará un gran revuelo a su llegada a Niigata, donde jugadores como la estrella del Barcelona, **Lionel Messi**, llevarán a cabo su preparación para las olimpiadas, incluido un juego amistoso en Tokio contra el combinado nipón.

La selección española de natación se concentrará en Hyogo, la inglesa en Osaka, la francesa de atletismo en Wakayama y los equipos cubano y brasileño de judo en Chiba.

Ese fenómeno ya ocurrió con ocasión de las olimpiadas celebradas en Seúl, Corea, en 1988, cuando Japón ofrecía una ventaja considerable en **instalaciones** respecto a su país vecino.

Corea del Sur también acogerá a delegaciones nacionales

No obstante, **Corea del Sur** también acogerá algunas delegaciones nacionales que no desean concentrarse en China.

Las razones son variadas, pero la más esgrimida ha sido las adversas condiciones de medio ambiente de muchas de las sedes que acogerán a las diversas disciplinas.

A la **asfixiante contaminación** que dificultará los campeonatos de deportes como el atletismo o el ciclismo en la capital china, se unen fenómenos inesperados como la **invasión de algas** que se ha registrado en Tsingtao, la localidad costera que acogerá el campeonato de vela.

Por ejemplo, la selección de Bahrein de atletismo, que se concentrará en la ciudad de Yamagata, en el norte de la principal isla de Japón, ha citado variados argumentos.

Algunas de sus razones son las que más se han escuchado desde que comenzó a acercarse la cita olímpica: **la polución de la capital china.**

Sin embargo, el país árabe también ha citado la comida como una de las razones para asentarse antes del inicio de los juegos en Japón, un país conocido por la delicadeza de su gastronomía.

Conscientes de este atractivo para las delegaciones deportivas, el Comité Olímpico de Japón organizó en diciembre pasado la **promoción** de una docena de ciudades japonesas para destacar sus ventajas y recomendarlas a las federaciones deportivas de otros países.

Japón, a un paso de China

Japón destaca, asimismo, por la **proximidad con China**; los equipos que preparen su participación en los juegos en el archipiélago nipón se beneficiarán de que sólo hay una hora de diferencia horaria con Beijing, por lo que se ahorrarán los efectos de los vuelos intercontinentales.

El "jet-lag" es un hándicap clásico para los equipos que suelen llegar a Japón para disputar campeonatos internacionales, como el Mundial de Clubes que todos los años enfrenta a los mejores clubes de fútbol de todos los continentes.

Sin embargo, a la contaminación china y el **excesivo exotismo de su comida** para algunos paladares, se une otra razón que ha obligado a buscar refugio a algunas delegaciones: la falta de instalaciones deportivas en Beijing.

El diario *Nikkei* publicó recientemente que la competencia por hacerse un lugar dónde entrenar en la ciudad deportiva de Beijing es muy intensa, por lo que algunos países **se han decantado por Japón**, un país con las instalaciones más punteras y a un paso de la China olímpica.

4.10 Bibliografía

Chang, Raymond, *Fisicoquímica,* 9ª. ed., McGraw-Hill Interamericana, México, 2008.

Choppin, Gregory R., *Química*, Grupo Editorial Patria, México, 2008.

Farrington, Daniels A., *Fisicoquímica*, CECSA, 1985.

Fogler, Scott H., *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas,* 4ª. ed., Prentice Hall, México, 2008.

Geankoplis, *Procesos de transporte y operaciones unitarias*, CECSA, México, 2004.

Green W., Perry R. H., *Perry´s Chemical Engineers Handbook*, 7ª. ed., McGraw-Hill, New York, 2006.

Hein, Morris, *Química general*, Cengage Learning, 2008.

I.N. Levine, *Fisicoquímica*, 2 volúmenes, 5ª. ed., McGraw-Hill Interamericana, México, 2004.

Laidler, Keith J., *Fisicoquímica*, Grupo Editorial Patria, 2007.

Mc Cabe W., Smith J., Harriot P., *Unit Operations of Chemical Engineering*, McGraw-Hill, New York, 2004.

Mc Cabe, W. L., Smith, J. L., Harriot, P., *Operaciones unitarias en ingeniería química,* Mc-Graw-Hill, New York, 2002.

Peters, M.P., Timmerhaus, K.D., West, R.E., y Peters, M., *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, McGraw-Hill, New York, 2002.

Timberlake, Karen C., *Química*, Prentice Hall, México, 2008.

Treybal. R.E., *Operaciones de transferencia de masa,* McGraw-Hill, México, 1988.

Capítulo

5

Procesos termodinámicos y balance de energía

Motor de combustión interna (ciclo termodinámico).

5.1 Definición del estado gaseoso, propiedades e idealidad de los gases

Aunque ya se habló del estado gaseoso y sus leyes en el capítulo 4, es necesario abordar nuevamente algunos aspectos importantes de este tema, los cuales serán de gran utilidad para entender los procesos termodinámicos.

Los gases conforman el primer estado de agregación de la materia llamado **estado gaseoso**, en éste se cumplen en mayor o menor grado los postulados de la teoría cinética molecular:

- Los átomos o las partículas son del mismo tamaño, estructura y forma, y se encuentran separadas una de otra por espacios grandes; de esta forma, los átomos o las partículas no tienen una unión entre sí, sino sólo enlaces iónicos o puentes de hidrógeno que las mantienen unidas entre sí.
- Los gases son elásticos y con movimiento dinámico, por lo que se mueven en todo el recipiente que los contiene.
- No existen entre los átomos de los gases choques bruscos que disminuyan su velocidad de movimiento; los choques que se suscitan son elásticos y expandibles.
- Los gases carecen de una masa representativa, así como de un volumen propio, por esa razón éstos deben contenerse en recipientes cerrados, los cuales permiten obtener una masa y un volumen representativo en función de la forma y el tamaño del mismo.

Cuando los gases cumplen con estos postulados, se dice que son gases ideales; aunque en realidad las moléculas de los gases no tienen la misma forma ni tamaño, sus choques no son elásticos y de acuerdo con su densidad, pueden generar una masa propia.

La ley general del estado gaseoso ideal propone que los gases tienen una relación entre las variables de estado (**presión**, **volumen**, **temperatura** y **masa**), la cual está dada por la siguiente expresión:

$$PV = nRT$$

La interpretación de esta ley indica que la presión es inversamente proporcional al volumen, pero directamente proporcional a la temperatura y a la cantidad de gas (n). La constante general del estado gaseoso se representa con la letra R.

Para poder entender esta ley analicemos el siguiente ejemplo:

Ejemplo 1

En una olla de presión casera se aplica esta ley.

Solución:

Primera etapa

Cuando se introduce agua a la olla queda un espacio "vacío" entre el líquido y la tapa; sin embargo, este espacio aparentemente vacío contiene aire (una mezcla gaseosa formada por nitrógeno y oxígeno). En el momento de cerrar la olla, este aire queda atrapado en el interior; cuando empieza el calentamiento, se calientan el agua y el aire, provocando que sus moléculas adquieran una mayor energía cinética y se expandan en el espacio existente. Hay que recordar que en la tapa de la olla existe un orificio en el que se coloca la válvula de presión, la cual al inicio del calentamiento permite la salida del aire y del vapor para ocupar más volumen (aquí se confirma que si la temperatura aumenta, el volumen del gas aumenta, siempre y cuando se mantenga la presión constante).

Segunda etapa

El vapor producido por el agua debido al calentamiento desplaza al aire. En este punto es posible observar cómo sale el vapor de agua al exterior por el orificio de la válvula de presión de la tapa; entonces, se coloca la válvula impidiendo la salida del gas, en ese momento al no poder salir el gas su volumen se restringe al espacio entre el líquido y la tapa, sin embargo, debido al calentamiento la presión del vapor aumenta (aquí se confirma que cuando la temperatura aumenta la presión también lo hace, siempre y cuando el volumen sea constante). Al momento de poner la válvula en la olla la temperatura es la temperatura de saturación a la presión atmosférica, cuando continúa el calentamiento se evapora más agua hasta alcanzar el equilibrio líquido-vapor; la temperatura aumenta hasta T_{sat} a la presión dentro de la olla, esta presión es: $P = P_{atmosférica} + \dfrac{\text{Masa válvula (g)}}{\text{Área del orificio}}$

Otro ejemplo común donde se observa la relación entre la presión, el volumen y la temperatura es el aire de las llantas de los automóviles. En este caso, el volumen que ocupa el aire se puede considerar constante. Cuando se introduce aire a la llanta la presión aumenta hasta el valor deseado, entonces se cierra la entrada de aire y se coloca el tapón. Cuando la llanta gira, hay un calentamiento debido a la fricción entre la llanta y el pavimento, lo que genera un aumento de temperatura y, como el volumen es constante, el aumento de temperatura provoca un aumento de presión en la llanta.

Con los ejemplos anteriores es posible comprobar que la ley general del estado gaseoso es común (tanto de observar como de analizar) en nuestro entorno; pero no sólo es posible comprobarla en la vida cotidiana, sino también en la industria, una autoclave es una olla de presión que cumple exactamente con la misma función que la olla casera, sólo que su capacidad volumétrica es superior.

5.2 Leyes de los gases

En esta sección se tratarán algunos de los principales postulados de las leyes de los gases, de los procesos termodinámicos en los gases ideales, de las definiciones y de las propiedades de los procesos termodinámicos y de los diagramas *P vs. V* aplicados a los procesos termodinámicos.

Como ya se mencionó antes, existe una ley general del estado gaseoso y de ésta se derivan las leyes parciales que son las siguientes:

5.2.1 Ley de Charles y Gay Lussac

Estos autores postularon que en un sistema gaseoso cerrado, si la presión se mantiene constante durante un proceso, que va de un punto inicial a un punto final, el volumen es directamente proporcional a la temperatura del sistema; es decir, genera una isobara en el diagrama presión-volumen, razón por la cual recibe el nombre de **proceso isobárico** (véase figura 5.1), cuya representación matemática es la siguiente:

$$P = \text{cte} \Rightarrow P_1 = P_2$$

por tanto:

$$V_1/V_2 = T_1/T_2;\ V \propto T;\ V/T = \text{cte};\ n_1 = n_2$$

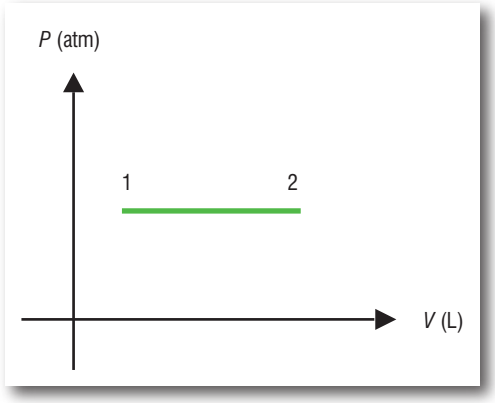


Figura 5.1

5.2.2 Ley de Boyle-Mariotte

Boyle y Mariotte determinaron que en un sistema gaseoso cerrado, si la temperatura se mantiene constante durante un proceso, que va de un estado inicial a un estado final, la presión y el volumen ejercidos por el gas en el recipiente son inversamente proporcionales; es decir, cuando la presión aumenta el volumen disminuye y viceversa, generando una isoterma en un diagrama *P vs. V*; este proceso recibe el nombre de **proceso isotérmico** (véase figura 5.2). Las características de este proceso son las siguientes:

$$T = \text{cte} \Rightarrow T_1 = T_2$$

por tanto

$$P_1V_1 = P_2V_2;\ V \propto 1/P;\ PV = \text{cte.};\ n_1 = n_2$$

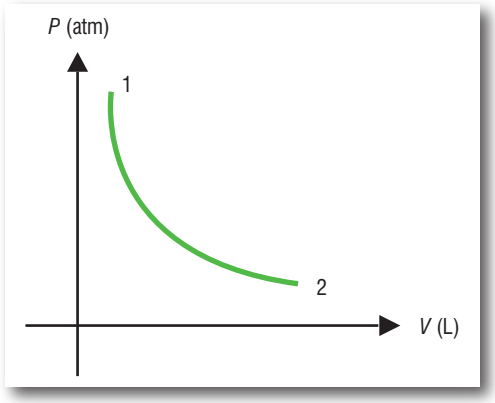


Figura 5.2

5.2.3 Ley de Avogadro y Amagat

Avogadro y Amagat determinaron que en un sistema gaseoso cerrado, si el volumen se mantiene constante, de un estado inicial a un estado final de un proceso, la temperatura y

la presión son directamente proporcionales, de tal forma que si aumenta la temperatura, aumenta la presión, generando una isometra o isocora en un diagrama *P vs. V*. Este proceso se conoce con el nombre de **proceso isométrico** o **proceso isocórico** (véase figura 5.3). Las características de este proceso son las siguientes:

$$V = \text{cte} \Rightarrow V_1 = V_2$$

por tanto

$$P_1/P_2 = T_1/T_2 \; ; \; T \; \alpha \; P; \; P/T = \text{cte}$$

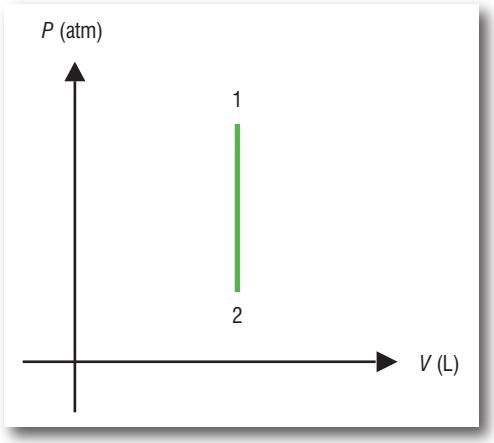


Figura 5.3

5.3 Sistemas de unidades relacionados con las leyes de los gases ideales

Las unidades dimensionales en las leyes de los gases están regidas por la constante general del estado gaseoso, que se representa con la letra *R*; dicha constante relaciona a las variables de estado involucradas en un sistema gaseoso y su valor es el siguiente:

$$R = 0{,}082 \text{ atm L/mol K}$$

Esta constante indica que la presión en el sistema debe ser expresada en atmósferas, el volumen en litros, la cantidad de masa en mol, por lo que la masa deberá ser expresada en gramos y su peso molecular en gramos/mol, finalmente la temperatura debe expresarse en grados Kelvin.

Las conversiones principales para las variables de estado son:

Presión:

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg} = 1{,}033 \text{ kg/cm}^2 = 14{,}7 \text{ lb/in}^2 = 0{,}988 \text{ bar} = 14{,}7 \text{ psia}$$

Volumen:

$$1 \text{ L} = 1 \text{ dm}^3 = 1\,000 \text{ cm}^3 = 1\,000 \text{ mL} = 0{,}001 \text{ m}^3$$

$$1 \text{ ft}^3 = 28{,}32 \text{ L}$$

$$1 \text{ Gal} = 3{,}8 \text{ L}$$

$$1 \text{ mL} = 1 \text{ cm}^3$$

Masa:

$$1 \text{ lb} = 454 \text{ g} = 0{,}454 \text{ kg}$$

$$1 \text{ kg} = 1\,000 \text{ g} = 0{,}001 \text{ Ton}$$

Temperatura:

$$K = {}^{\circ}C + 273 = (({}^{\circ}F - 32)/1{,}8) + 273$$

$${}^{\circ}F = 1{,}8\ {}^{\circ}C + 32$$

5.4 Metodología para resolver problemas relacionados con las leyes de los gases ideales

1. Leer el problema:

Este primer paso de la metodología permitirá obtener la información generalizada del problema, como:

- Ubicación en el contexto teórico.
- Identificación de las variables de estado involucradas.
- Procesos termodinámicos que se mencionan.
- Determinación respecto a si son procesos continuos, cerrados o aislados uno de otro.
- Identificación del tipo de gas al que se refiere el problema.
- Visualización de cómo están representados estos procesos en un diagrama de presión *vs.*volumen, etcétera.

Una vez realizada la lectura, es muy importante que se recuerde la teoría relacionada con las leyes de los gases ideales y qué tipo de procesos se pueden llevar a cabo con dichas leyes, así como los diferentes conceptos mencionados antes.

2. Analizar el problema:

Se lee el problema por segunda vez. En esta lectura se debe analizar el problema, palabra por palabra, si es necesario, hasta lograr resolverlo, identificando cada proceso y las ecuaciones relacionadas con las variables de estado hasta la resolución de las preguntas planteadas en el mismo; por tanto, se debe relacionar la teoría con los datos del problema.

3. Elaborar el diagrama de variables y el diagrama de procesos:

En este punto se deberán escribir en el diagrama de variables todos los datos del problema en relación con las variables de estado, identificando las incógnitas que se deberán resolver al desarrollar el diagrama de procesos.

4. Realizar todas las conversiones:

Este paso se deberá realizar tomando en cuenta que la constante general del estado gaseoso marca las unidades dimensionales que deben ser consideradas en los problemas relacionados con las leyes de los gases.

5. Hacer las sustituciones numérica y dimensional en las ecuaciones generadas en el diagrama de variables:

En esta etapa se realizan las sustituciones tanto de los valores numéricos como de las unidades dimensionales; es el momento de resolver matemáticamente el diagrama de variables.

6. Elaborar el diagrama *P vs. V* real:

En esta parte de la metodología ya se tienen los valores de todas las variables de estado, por lo que ya se puede y debe elaborar el diagrama *P vs. V* del proceso.

7. Resolver las preguntas del problema:

Normalmente las preguntas de los problemas están relacionadas con la descripción de los procesos, los valores de las variables de estado faltantes, los diagramas *P vs. V* reales, etc., estos valores ya han sido determinados, por lo que en cada diagrama sólo se indica la respuesta correspondiente a cada pregunta.

5.5 Aplicación de la metodología para resolver problemas de procesos en gases ideales

Ejemplo 2

Supóngase que 4,50 lb de oxígeno a una temperatura de 284 °F y 973 mmHg de presión se someten a una serie de procesos consecutivos:

1. Disminución de volumen a presión constante hasta un volumen de 17,65 ft^3.
2. Enfriamiento en donde P/T = cte hasta 0,5 bar.
3. Proceso en el que la $P \alpha 1/V$ hasta el volumen inicial.

   Con la información anterior determine:

   a) La cantidad en mol de oxígeno en el sistema.

   b) La descripción y las características de los procesos involucrados.

   c) Todas las variables de estado.

   d) Elabore el diagrama *P vs. V* real.

1. Leer el problema: en este punto es posible observar que el problema incluye procesos consecutivos; es decir, es un proceso seguido de otro hasta llegar al último. En éste se habla del gas oxígeno, cuyo peso molecular es de 32 g/mol; asimismo, se indican y preguntan valores de las variables de estado y se solicita la descripción de los procesos y el diagrama *P vs. V*.

2. Analizar el problema: en este ejemplo se establece que 4,50 lb de oxígeno a una temperatura de 284 °F y 973 mmHg de presión se someten a una serie de procesos consecutivos.

En esta parte del problema se da la masa de oxígeno, por tanto, podemos conocer el número de mol con la relación $n = m/PM$, y como el gas es el oxígeno, ya se conoce su peso molecular; asimismo, se indican la presión y la temperatura, con esta información

es posible calcular el volumen inicial (V_1) del gas por la ley general del estado gaseoso $PV = nRT$.

a) Disminución de volumen a presión constante hasta un volumen de 17,65 ft^3.

Como se observa, el primer proceso que se describe es un proceso isobárico que indica que $P_1 = P_2$ y que la ecuación física que corresponde a este proceso es la siguiente $V_1/V_2 = T_1/T_2$, y como se conocen todas las variables, menos el V_2, sólo éste se despeja de la ecuación para poder conocer por completo todas las variables del punto 2.

b) Enfriamiento en donde P/T = constante hasta 0,5 bar.

La descripción del segundo proceso indica que el cociente de la presión entre el volumen es constante, lo que corresponde a un proceso isométrico o isocórico, donde el volumen permanece constante y la ley física indica que $P_2/P_3 = T_2/T_3$. Como ya se conocen todas las variables menos T_3, ésta se puede despejar de la fórmula para obtener su valor; hasta este momento, por tanto, ya se conocen todas las variables hasta el punto 3 del problema.

c) Proceso en el que la $P \alpha 1/V$ hasta el volumen inicial.

Finalmente, con la última descripción de los procesos es posible darse cuenta de que en el único proceso en el que la presión es inversamente proporcional al volumen es el proceso isotérmico que indica que las temperaturas inicial y final de este proceso son constantes y que la ecuación relacionada con este proceso es $P_3V_3 = P_4V_4$. Como es de esperarse, conocemos todo menos la P_4, la cual puede despejarse de la ecuación para conocer su valor.

Con base en los datos anteriores, determine:

I. La cantidad en mol de oxígeno en el sistema.

II. La descripción y las características de los procesos involucrados.

III. Todas las variables de estado.

IV. Elaborar el diagrama *P vs. V* real.

Al analizar las preguntas del problema se observa que todas éstas ya se resolvieron y no falta ningún dato para dar solución al problema, lo único que debe hacerse ahora es resolverlo matemáticamente para dar respuesta a todas las incógnitas; por tanto, en este momento el problema prácticamente está resuelto.

3. **Elaborar el diagrama de variables y el diagrama de procesos:** en este momento se escribirán los datos del problema en el diagrama de variables y las fórmulas despejadas en las variables desconocidas en función del diagrama de procesos (véase tabla 5.1).

4. **Realizar todas las conversiones:** en el mismo diagrama de variables se pueden realizar las conversiones en línea (véase tabla 5.2).

5. **Realizar las sustituciones de valores en las variables de estado que lo requieran:**

$$n = m/PM = 2\,034 \text{ g}/32 \text{ g/mol} = 63{,}84 \text{ mol}$$

$$V_1 = ((63{,}84 \text{ mol})\ (0{,}082 \text{ atm L/mol K})\ (413 \text{ K}))/1{,}28 \text{ atm} = 1\,689 \text{ L}$$

$$T_2 = ((500 \text{ L})\ (413 \text{ K}))/1\,689 \text{ L} = 122{,}3 \text{ K}$$

Tabla 5.1.

Diagrama de variables	Diagrama de procesos
Gas de estudio: oxígeno (O_2) PM = 32 g/mol m = 4,50 lb $n = ? = m/PM$ $R = 0{,}082$ atm L/mol K $P_1 = 973$ mmHg $T_1 = 284$ ºF $V_1 = ? = n\,R\,T_1/P_1$ $P_2 = P_1$ $T_2 = ? = V_2T_1/V_1$ $V_2 = 17{,}65$ ft^3 $P_3 = 0{,}5$ bar $T_3 = ? = P_3T_2/P_2$ $V_3 = V_2$ $P_4 = ? = P_3V_3/V_4$ $V_4 = V_1$ $T_4 = T_3$	Por la ley general del estado gaseoso se sabe que: $P_1V_1 = nRT_1$ Por tanto: $V_1 = nRT_1/P_1$ 1-2 Proceso de compresión isobárico; P = cte; $P_1 = P_2$; $V \alpha T$; V/T = cte; $V_1/V_2 = T_1/T_2$; Ley de Charles y Gay Lussac. Por tanto: $T_2 = V_2T_1/V_1$ 2-3 Proceso de enfriamiento isométrico o isocórico; V = cte; $V_2 = V_3$; $P \alpha T$; P/T = cte; $P_2/P_3 = T_2/T_3$; Ley de Avogadro y Amagat Por tanto: $T_3 = P_3T_2/P_2$ 3-4 Proceso de expansión isotérmico T = cte; $T_3 = T_4$; $P \alpha 1/V$; PV = cte; $P_3V_3 = P_4V_4$; Ley de Boyle-Mariotte Por tanto: $P_4 = P_3V_3/V_4$

Tabla 5.2.

Diagrama de variables	Diagrama de procesos
Gas de estudio: oxígeno (O_2) $PM = 32$ g/mol $m = 4{,}50$ lb × 454 g/1 lb = 2 043 g $n = ? = m$/PM $R = 0{,}082$ atm L/mol K $P_1 = 973$ mmHg × 1 atm/760 mmHg = 1,28 atm $T_1 = ((284$ ºF − 32)/1,8) + 273 = 413 K $V_1 = ? = n\,R\,T_1/P_1$ $P_2 = P_1$ $T_2 = ? = V_2T_1/V_1$ $V_2 = 17{,}65$ ft^3 × 28,32 L/1 ft^3 = 500 L $P_3 = 0{,}5$ bar × 1 atm/0,998 bar = 0,5 atm $T_3 = ? = P_3T_2/P_2$ $V_3 = V_2$ $P_4 = ? = P_3V_3/V_4$ $V_4 = V_1$ $T_4 = T_3$	Por la ley general del estado gaseoso se sabe que: $P_1V_1 = nRT_1$ Por tanto: $V_1 = nRT_1/P_1$ 1-2 Proceso de compresión isobárico; P = cte; $P_1 = P_2$; $V \alpha T$; V/T = cte; $V_1/V_2 = T_1/T_2$; Ley de Charles y Gay Lussac. Por tanto: $T_2 = V_2T_1/V_1$ 2-3 Proceso de enfriamiento isométrico o isocórico; V = cte; $V_2 = V_3$; $P \alpha T$; P/T = cte; $P_2/P_3 = T_2/T_3$; Ley de Avogadro y Amagat Por tanto: $T_3 = P_3T_2/P_2$ 3-4 Proceso de expansión isotérmico T = cte; $T_3 = T_4$; $P \alpha 1/V$; PV = cte; $P_3V_3 = P_4V_4$; Ley de Boyle-Mariotte Por tanto: $P_4 = P_3V_3/V_4$

$$T_3 = ((0{,}5 \text{ atm})\ (122{,}3 \text{ K}))/1{,}28 \text{ atm} = 47{,}8 \text{ K}$$

$$P_4 = ((0{,}5 \text{ atm})\ (500 \text{ L}))/1\,689 \text{ L} = 0{,}15 \text{ atm}$$

Estos resultados finales de las sustituciones se colocan en el diagrama de variables de la siguiente manera:

Tabla 5.3.

Diagrama de variables	Diagrama de procesos
Gas de estudio: oxígeno (O_2) $PM = 32$ g/mol $m = 4{,}50$ lb $\times$ 454 g/1 lb = 2 043 g $n = ? = m/PM = 63{,}84$ mol $R = 0{,}082$ atm L/mol K $P_1 = 973$ mmHg $\times$ 1 atm/760 mmHg = 1,28 atm $T_1 = ((284\ ^oF - 32)/1{,}8) + 273 = 413$ K $V_1 = ? = n\,R\,T_1/P_1 = 1\,689$ L $P_2 = P_1 = 1{,}28$ atm $T_2 = ? = V_2T_1/V_1 = 122{,}3$ K $V_2 = 500$ L $P_3 = 0{,}5$ bar $\times$ 1 atm/0,998 bar = 0,5 atm $T_3 = ? = P_3T_2/P_2 = 47{,}8$ K $V_3 = V_2 = 500$ L $P_4 = ? = P_3V_3/V_4 = 0{,}15$ atm $V_4 = V_1 = 1\,689$ L $T_4 = T_3$	Por la ley general del estado gaseoso se sabe que: $P_1V_1 = nRT_1$ Por tanto: $V_1 = nRT_1/P_1$ 1-2 Proceso de compresión isobárico; P = cte; $P_1 = P_2$; $V \alpha T$; V/T = cte; $V_1/V_2 = T_1/T_2$; Ley de Charles y Gay Lussac. Por tanto: $T_2 = V_2T_1/V_1$ 2-3 Proceso enfriamiento isométrico o isocórico; V = cte; $V_2 = V_3$; $P \alpha T$; P/T = cte; $P_2/P_3 = T_2/T_3$; Ley de Avogadro y Amagat Por tanto: $T_3 = P_3T_2/P_2$ 3-4 Proceso expansión isotérmico T = cte; $T_3 = T_4$; $P \alpha 1/V$; PV = cte; $P_3V_3 = P_4V_4$; Ley de Boyle-Mariotte Por tanto: $P_4 = P_3V_3/V_4$

6. **Elaborar el diagrama *P vs. V* real:** Dados los valores reales para todas las variables de estado, se puede elaborar el diagrama *P vs. V* real de la siguiente manera:

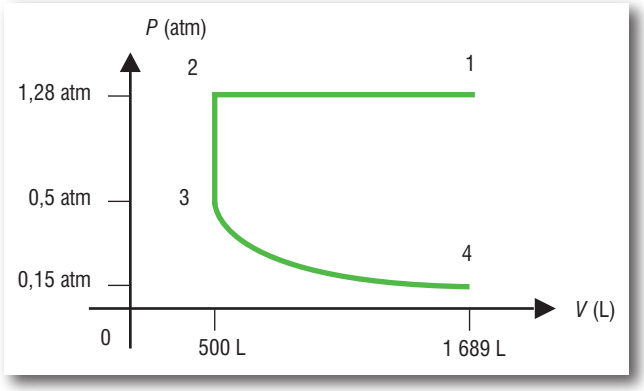


Figura 5.4

7. **Resolver las preguntas del problema:** esta actividad es simple; sólo se indica en los diferentes diagramas los resultados de las preguntas del problema.

Tabla 5.4.

Diagrama de variables	Diagrama de procesos
Gas de estudio: oxígeno (O_2) $PM = 32$ g/mol $m = 4{,}50$ lb $\times$ 454 g/1 lb = 2 043 g A) $n = ? = m/PM = 63{,}84$ mol $R = 0.082$ atm L/mol K $P_1 = 973$ mmHg $\times$ 1 atm/760 mmHg = 1,28 atm $T_1 = ((284\ ^oF - 32)/1{,}8) + 273 = 413$ K $V_1 = ? = n\,R\,T_1/P_1 = 1\,689$ L $P_2 = P_1 = 1{,}28$ atm $T_2 = ? = V_2T_1/V_1 = 122{,}3$ K $V_2 = 500$ L $P_3 = 0{,}5$ bar $\times$ 1 atm/0,998 bar = 0,5 atm $T_3 = ? = P_3T_2/P_2 = 47{,}8$ K $V_3 = V_2 = 500$ L $P_4 = ? = P_3V_3/V_4 = 0{,}15$ atm $V_4 = V_1 = 1\,689$ L $T_4 = T_3$	Por la ley general del estado gaseoso se sabe que: $P_1V_1 = nRT_1$ Por tanto: $V_1 = nRT_1/P_1$ 1-2 Proceso de compresión isobárico; P = cte; $P_1 = P_2$; $V \alpha T$; V/T = cte; $V_1/V_2 = T_1/T_2$; Ley de Charles y Gay Lussac. Por tanto: $T_2 = V_2T_1/V_1$ 2-3 Proceso de enfriamiento isométrico o isocórico; V = cte; $V_2 = V_3$; $P \alpha T$; P/T = cte; $P_2/P_3 = T_2/T_3$; Ley de Avogadro y Amagat Por tanto: $T_3 = P_3T_2/P_2$ 3-4 Proceso expansión isotérmico T = cte; $T_3 = T_4$; $P \alpha 1/V$; PV = cte; $P_3V_3 = P_4V_4$; Ley de Boyle-Mariotte Por tanto: $P_4 = P_3V_3/V_4$

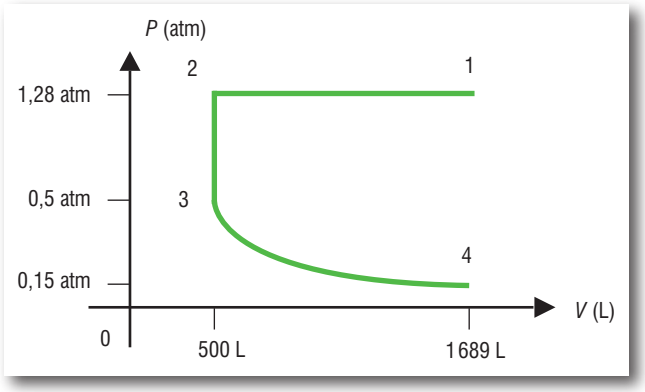


Figura 5.5

5.6 Termodinámica

Esta ciencia desempeña un papel primordial en el aprovechamiento de los recursos energéticos y su transformación posterior en la producción de trabajo útil, así como en la interpretación de fenómenos naturales.

En la termodinámica se encuentra la explicación racional del funcionamiento de la mayor parte de los mecanismos y los dispositivos que posee y controla el hombre en la actualidad.

El campo de estudio de esta ciencia comprende las relaciones entre calor y trabajo respecto a la energía de una determinada porción del Universo. Un primer acercamiento para llevar a cabo este propósito consiste en establecer los conceptos fundamentales o, dicho de otra manera, en introducir el lenguaje utilizado en la termodinámica.

Al aislar una porción del Universo (interés de estudio) se llega al concepto de sistema termodinámico, o simplemente sistema. Es claro que ya sea que se trate de un trozo de metal, de una determinada cantidad de líquido contenido en un recipiente o de un gas encerrado en un contenedor, en todos los casos la selección del sistema la hace arbitrariamente el observador.

La idea de aislar una porción del Universo lleva implícito el concepto de frontera, o sea, lo que separa al sistema del resto del Universo, la cual puede ser real, como lo son las paredes de un recipiente que contiene a un líquido o a un gas, o bien puede ser imaginaria y consistir sólo de la superficie geométrica que encierra un cierto volumen.

Una vez seleccionado el sistema que será objeto del estudio, el paso siguiente consiste en escoger el modo más adecuado para hacer la descripción de la condición física. Así, se puede determinar, por ejemplo, si se trata de un gas: establecer su composición química, medir su volumen y la presión que ejerce sobre las paredes del recipiente que lo contiene, éstos son sólo algunos ejemplos de las llamadas propiedades o variables termodinámicas, que son usadas para llevar a cabo la caracterización del sistema. Las propiedades termodinámicas son características macroscópicas, susceptibles de ser medidas experimentalmente y darles valores numéricos, con lo cual es posible definir el sistema.

Las variables o propiedades que caracterizan el estado de un sistema pueden dividirse en dos categorías: **intensivas** y **extensivas**.

Las propiedades intensivas, como la temperatura, la presión y la densidad no dependen de la masa del sistema. Una variable intensiva puede definirse en un punto, ya que tiene un valor finito cuando el tamaño del sistema que rodea el punto se aproxima a cero.

Las variables que dependen del tamaño del sistema, como la longitud, el volumen, la masa y la energía interna, son propiedades o variables extensivas. Cualquier propiedad extensiva del sistema es igual a la suma de las propiedades parciales respectivas de los componentes del sistema.

El cociente entre dos propiedades extensivas de un sistema homogéneo, es una propiedad intensiva.

Cuando las propiedades de un sistema permanecen constantes; o sea, cuando no cambian con el tiempo, el conjunto de valores de esas propiedades o variables termodinámicas define un estado del sistema y, en este caso, un estado de equilibrio de dicho sistema, que es un concepto importante en el estudio de los sistemas termodinámicos, en el cual ningún cambio es perceptible por largo que sea el tiempo de espera.

De acuerdo con este concepto, es posible distinguir varias acciones externas sobre el sistema, lo cual da origen a los tipos de equilibrio: térmico (exige la igualdad de temperatura), mecánico (igualdad de presiones), eléctrico (correspondencia de potenciales eléctricos) y de fases y reacción química (equivalencia de potenciales químicos).

Así, a partir de la noción de equilibrio surge la definición de función de estado termodinámico, cuyo valor depende únicamente de las condiciones inicial y final, e independientes de la trayectoria que haya seguido el proceso. (Nota: la entalpía, por ejemplo, es una función de estado y depende de la presión y temperatura). En este grupo se pueden mencionar a la energía, la temperatura, el volumen, la presión, la entalpía, la entropía y el número de moles, entre otras.

La ecuación para la función de estado termodinámico es la siguiente:

$$\Delta X = x_f - x_i$$

donde x_i es el valor inicial y x_f es el valor final de la función de estado considerada.

Si se fija una determinada cantidad de masa de un gas en un recipiente, de tal manera que sea posible medir fácilmente la presión, el volumen y la temperatura, y se determinan valores fijos de estas dos últimas variables con ciertos valores arbitrarios, sería posible comprobar que resulta imposible modificar la primera de esas variables, o sea la presión.

Es decir, si *P* y *V* se eligieran arbitrariamente, quedaría automáticamente fijado el valor de la presión.

Así, una vez que *V* y *T* han sido fijados por el experimentador, el valor de *P* quedaría unívocamente determinado; análogamente, si *P* y *T* se eligiesen arbitrariamente, quedaría automáticamente fijado el valor de *V*.

De esta forma, de las tres coordenadas termodinámicas *P, V* y *T*, sólo dos de éstas son independientes, lo que implica que ha de existir una relación que ligue tales coordenadas termodinámicas.

Tal relación recibe el nombre de **ecuación de estado**, por esa razón, una determinada ecuación de estado se cumplirá en un cierto intervalo, fuera del cual puede no ser válida.

De esta situación surge el concepto de **grados de libertad**, definido como el subgrupo de propiedades termodinámicas que son independientes y que dependen del número de fases y componentes del sistema.

La observación experimental del comportamiento de un sistema dado, muestra que éste puede ser afectado por "el resto del Universo" o, por lo menos, por aquellos objetos o sustancias que se encuentran en su cercanía. Al conjunto de sistemas que pueden interaccionar con el sistema en estudio y alterar su estado se le llama **vecindad** o **alrededores del sistema**.

El hecho de que un sistema sea o no afectado por sus alrededores depende del tipo de frontera que los separa. A este respecto, pueden distinguirse tres tipos de paredes: una **pared aislante**, que es aquella que no permite interacción alguna entre el sistema y sus alrededores; es claro que un sistema encerrado por una pared aislante permanecerá indefinidamente en el mismo estado (véase figura 5.6).

Una **pared adiabática** es aquella que permite sólo interacciones de tipo mecánico entre el sistema y su vecindad. Este tipo de pared también impide cualquier tipo de interacción por medios no mecánicos, además de que impide el intercambio de calor con los alrededores.

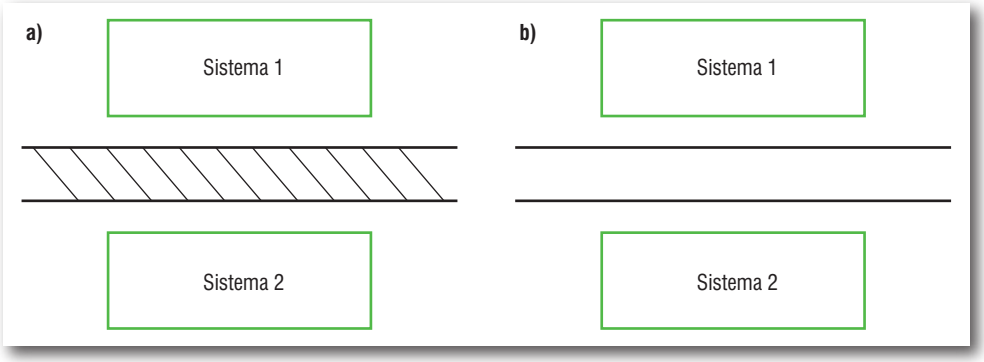


Figura 5.6 *Representación de dos diferentes tipos de paredes, adiabática (a) y diatérmica (b).*

Por último, una **pared diatérmica** es aquella que permite interacciones de tipo mecánico o no mecánico entre el sistema y su vecindad. Cuando dos sistemas están separados por este tipo de pared se dice que están en contacto térmico.

Es inmediato deducir que una frontera imaginaria es siempre una pared diatérmica. Cuando un sistema es afectado por sus alrededores y la interacción tiene como consecuencia un cambio en el estado del sistema, se concluye que se ha efectuado un proceso (véase figura 5.7).

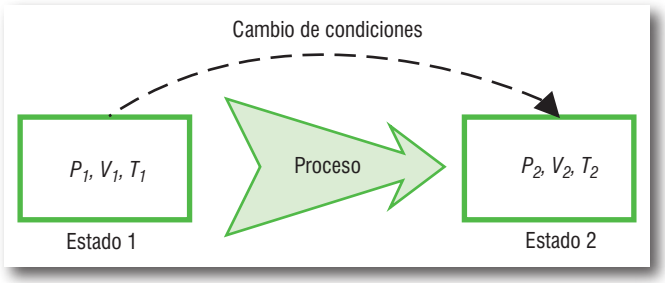


Figura 5.7 *Las coordenadas o los valores de las variables termodinámicas cambian cuando se realiza un proceso.*

Los sistemas termodinámicos suelen clasificarse en **abiertos**, **cerrados** o **aislados**. El primer tipo se presenta cuando el sistema tiene la opción de intercambiar tanto la masa como la energía, en el segundo sólo se efectúan intercambios de energía y en el tercero no existe intercambio de ningún tipo; los intercambios en todos los casos son efectuados con los alrededores.

De acuerdo con las fases detectadas, los sistemas pueden ser **homogéneos**, cuando presentan una sola fase, y **heterogéneos** cuando tienen dos o más fases; asimismo, cuando el potencial es tan pequeño que los cambios perceptibles se logran en tiempos finitos y el sistema puede retornar a las condiciones anteriores sin modificar los alrededores, se tienen procesos reversibles, en contraparte, cuando los potenciales son lo suficientemente grandes y no es posible regresar a las condiciones originales mediante el cambio de dirección de potenciales sin afectar los alrededores, se tiene un proceso termodinámico irreversible.

5.7 Primera ley de la termodinámica o principio de equivalencia del calor en trabajo mecánico

La primera ley de la termodinámica relaciona la **energía interna**, el **trabajo** y el **calor**; ésta establece que si sobre un sistema con una determinada energía interna, se realiza un trabajo o se transfiere calor mediante un proceso, la energía interna del sistema variará.

La diferencia entre la energía interna del sistema y la cantidad de trabajo es el calor; el calor es la energía transferida al o desde el sistema debido a un potencial térmico, es decir, una diferencia de temperaturas entre el sistema y sus alrededores.

Si se considera que el sistema es un recipiente metálico con agua y se pretende elevar su temperatura por fricción, utilizando una cuchara, o bien por calentamiento directo con un mechero; en el primer caso se realiza un trabajo sobre el sistema y en el segundo una transmisión de calor.

Cabe aclarar que la energía interna de un sistema, el trabajo y el calor no son más que diferentes manifestaciones de energía, es por eso que la energía no se crea ni se destruye, sino que, durante un proceso, sólo se transforma en sus diversas manifestaciones.

La ecuación general de la conservación de la energía es la siguiente:

$$E_{entra} - E_{sale} = E_{final,\ sistema} - E_{inicial,\ sistema}$$

Además, se sabe que $E_{universo} = \text{constante}$,

entonces
$$\Delta E_{universo} = \Delta E_{sistema} - E_{entra} + E_{sale}$$
$$\Delta E_{sistema} = -E_{sale} + E_{entra}$$

si
$$E_{sale} = W \text{ y } E_{entra} = Q$$
$$\Delta E_{sis} t = Q - W$$

esto es, el cambio de energía de un sistema es el calor absorbido por el sistema menos el trabajo desarrollado por éste.

Esta última expresión es conocida como la primera ley de la termodinámica, que es una forma general de establecer el principio de la conservación de la energía; no establece restricción alguna sobre la conversión entre las diferentes formas de energía, sino que únicamente indica que la cantidad total de energía debe ser constante.

El signo para el trabajo y el calor depende de si el sistema absorbe o cede energía con su entorno (véase tabla 5.5).

Tabla 5.5. Convención de signos para el trabajo y el calor, según entrada-salida en un sistema termodinámico.

	Salida	Entrada
Calor	–	+
Trabajo	+	–

5.8 Trabajo

Cuando una fuerza es aplicada a un cuerpo y ésta lo desplaza una cierta longitud, se ha realizado un trabajo de índole mecánico (véase figura 5.8).

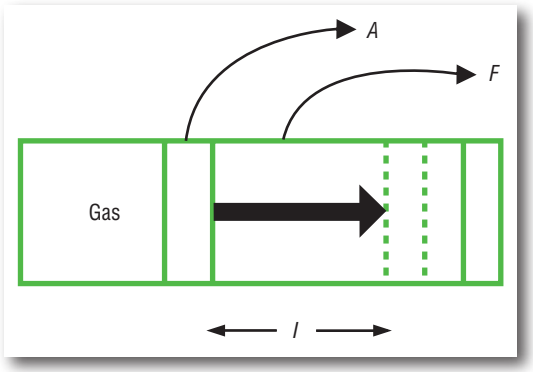


Figura 5.8 *Un gas contenido en un recipiente ocasiona un trabajo mecánico.*

Desarrollando una expresión que contenga las variables termodinámicas adecuadas, se tiene:

$$F = P \times A$$

$$V = A \times l$$

$$A = V/l$$

$$dA = \frac{dV}{dl}$$

$$F = P\frac{dV}{dl}$$

$$W = F \times l$$

$$dW' = P\frac{dV}{dl}dl$$

$$dW = P\,dV$$

$$W = \int_{V_1}^{V_2} P\,dV$$

La última ecuación representa la fórmula general para el cálculo del trabajo en un proceso termodinámico reversible, donde ***F*** representa a la fuerza, ***A*** el área, ***l*** la longitud, **W** el trabajo, ***V*** el volumen y ***P*** la presión.

5.9 Calor y capacidad calorífica a presión o volumen constantes

El calor es considerado como un potencial térmico ocasionado por la energía, que fluye de un punto de alta temperatura a uno de baja temperatura. Esta transmisión de energía (Q) es función (f) de la masa, así como del tipo de sustancia involucrada, así se tiene $Q = f$ (temperatura, masa de la sustancia, característica de la sustancia), es decir:

$$dQ = n\,C_x\,dT$$

donde C_x es conocida como la capacidad calorífica molar del sistema, que se refiere a la cantidad de calor que absorbe el sistema por cada grado de incremento en la temperatura; asimismo, las variables termodinámicas presión y volumen dan origen al cálculo de calores a P o V constantes con las siguientes expresiones:

$$Q_P = nC_P dT \qquad \text{y} \qquad Q_V = nC_V dt$$

Algunas veces, el calor y la temperatura son utilizados como sinónimos; sin embargo, son dos conceptos diferentes y con características particulares entre sí, de hecho el mecanismo de transferencia de calor entre los cuerpos implica una diferencia de temperatura entre ellos, y la temperatura es la medida de la energía cinética media de las moléculas (véase tabla 5.6).

Fundamentalmente existen cinco lineamientos básicos para medir el calor:

1. Cuando se ponen en contacto dos o más cuerpos a distintas temperaturas, la cantidad de calor perdida por los cuerpos que se enfrían es igual a la cantidad de calor ganada por los cuerpos que se calientan.
2. Si un cuerpo se enfría, pierde una cantidad de calor igual a la que había sido necesario proporcionarle para elevar su temperatura.
3. La cantidad de calor absorbido o desprendido por un cuerpo cuando no hay cambio de estado, es proporcional al aumento de su temperatura.

Tabla 5.6. Diferencias entre el calor y la temperatura.

Calor	Temperatura
Es una forma de energía	Es una medida de la energía cinética media de traslación de las moléculas de un cuerpo o sustancia
Depende de la cantidad de materia presente	No depende de la cantidad de materia presente
La cantidad de calor que absorbe o emite un cuerpo caliente se puede medir en un calorímetro	Se mide con un termómetro, termopar o pirómetro
Puede transformarse en otras formas de energía	No es transformable
Se mide en calorías o joules	Se mide en grados Celsius, Fahrenheit, Kelvin o Rankin

4. La cantidad de calor absorbida o desprendida por un cuerpo es proporcional a su masa.
5. Para elevar su temperatura en un mismo número de grados, los cuerpos absorben cantidades diferentes de calor.

Son distinguibles dos tipos de calor en un sistema, éstos son:

1. **Calor sensible**. Es la energía absorbida o cedida por un sistema sin que exista cambio de fase, calculándose a presión constante, su expresión es:

$$Q_{\text{sensible}} = \int_{T_1}^{T_2} nC_p\,dT = Q_p$$

2. **Calor latente.** Es la cantidad de calor absorbido o cedido por la masa de un sistema, durante el cambio de fase a temperatura y presión constantes, siendo su ecuación:

$$Q_{\text{latente}} = n\lambda$$

donde λ (calor latente) está relacionado con los calores generados en los cambios de fase presentes (vaporización, fusión y sublimación).

5.10 Entalpía o calor a presión constante

Cuando se adiciona energía a un sistema termodinámico cerrado, parte de la energía es incrementada y otra parte modifica la presión, el volumen o ambos; de esta manera, el producto *PV* representa una forma adicional de energía en el sistema debido a estas variables termodinámicas. Para considerar este hecho se define una nueva función de estado denominada entalpía (contenido calorífico).

La expresión que le da origen surge de la primera ley de la termodinámica:

$$dE = dQ - dW$$

como el proceso es efectuado a presión constante:

$$Q_P = dE + dW$$

$$Q_P = dE + d(PV)$$

$$= dE + PdV + VdP$$
$$= E_2 - E_1 + P(V_2 - V_1)$$
$$= (E_2 + PV_2) - (E_1 + PV_1)$$
$$= H_2 - H_1$$

Esta función sólo depende de las condiciones iniciales y finales del sistema, de esta forma la ecuación tiene validez general.

Si ahora se consideran ciertas restricciones que se verifican en muchas reacciones químicas, como: a) la presión se mantiene constante y b) no interviene trabajo alguno, salvo el que pueda efectuarse contra la presión atmosférica, entonces la ecuación queda:

$$dW = PdV \qquad dP = 0$$
$$dH = H_2 - H_1 = Q_P = n\, C_P\, dT$$

Esta ecuación es válida sólo si no se realiza ningún otro trabajo, salvo el mecánico ya considerado; en estas condiciones, dQ es una diferencial exacta.

5.11 Energía o calor a volumen constante

Cuando un proceso es efectuado bajo la condición de mantener el volumen constante y partiendo de la primera ley de la termodinámica:

$$dE = dQ - dW$$
$$dE = Q_V + PdV$$

el producto PdV es igual a cero y es obtenida la relación:

$$dE = Q_V = n\, C_V\, dT$$

Existe una relación entre Q_v y Q_P a partir de la ecuación y relaciones siguientes:

$$\Delta E = Q_V$$
$$\Delta H = Q_P$$

y sabiendo que:

$$H = \Delta E + \Delta(PV)$$

se tiene:

$$Q_P = Q_V + \Delta(PV)$$

El producto $\Delta(PV)$ para reacciones químicas en que sólo intervengan sólidos y líquidos es insignificante en comparación con el valor de Q_V y, por tanto, la diferencia entre Q_v y Q_P es muy pequeña; sin embargo, para reacciones en que intervengan gases, $\Delta(PV)$ puede ser muy importante, porque los cambios de volumen podrían ser muy grandes.

En general, este término puede estimarse con suficiente aproximación usando la ecuación de los gases ideales, así para el proceso $aA_{(g)} + bB_{(g)} \rightarrow eE_{(g)} + mM_{(g)}$, se tiene:

$$Q_P = Q_V + \Delta(PV)$$
$$= Q_V + n_E RT + n_M RT - n_A RT + n_B RT$$
$$n_E + n_M + (n_A - n_B) = \Delta n$$
$$Q_P = Q_V + \Delta nRT$$

5.12 Aplicación de la primera ley de la termodinámica en los procesos termodinámicos

Una de las aplicaciones inmediatas de la primera ley de la termodinámica es la obtención de las variables en procesos termodinámicos: energía, entalpía, trabajo y calor.

Son cuatro los procesos termodinámicos a estudiar: **isotérmico** (T = constante), **isométrico** (V = constante), **isobárico** (P = constante) y **adiabático** ($Q = 0$), y sus relaciones son presentadas a continuación. Para ello se toma como base la expresión $dE = dQ - dW$, comentada anteriormente.

5.12.1 Proceso isotérmico

La característica principal de un proceso isotérmico es mantener la temperatura constante a lo largo del proceso efectuado, su representación en coordenadas PV ya ha sido mostrada.

$$dE = dQ - dW$$

sabiendo que dE y dH en los gases ideales son función únicamente de la temperatura y dado que las expresiones para esas variables termodinámicas incluyen el factor dT (cero para ambos casos), entonces:

$$dE = 0 \text{ y } dH = 0$$

por lo cual $dQ = dW$ y sabiendo que $dW = PdV$ se tiene:

$$dW = \int_{V_1}^{V_2} P\, dV$$

$$P = \frac{nRT}{V}$$

$$W = \int_{V_1}^{V_2} \frac{nRT}{dV}$$

$$W = nRT \ln \frac{V_2}{V_1} = nRT \ln \frac{P_1}{P_2}$$

5.12.2 Proceso isobárico

La presión permanece constante a lo largo de todo el proceso isobárico y los valores según $dE = dQ - dW$ para el trabajo son:

$$dW = \int_{V_1}^{V_2} P\, dV$$

como la presión es constante se obtiene:

$$dW = P \int_{V_1}^{V_2} dV$$

$$W = P\,(V_2 - V_1)$$

y

$$dE = nC_V dT$$

como dH es igual a Q_P se deduce que:

$$dH = nC_P dT = Q_P$$

5.12.3 Proceso isométrico

En este proceso la variable termodinámica que se mantiene constante es el volumen, de esta manera se tiene que el proceso está representado por una línea vertical en el diagrama *PV* y partiendo de $dE = dQ - dW$ se tienen las siguientes expresiones:

$$dW = \int_{V_1}^{V_2} P\, dV$$

con dV igual a cero, ya que el volumen se mantiene constante y, por tanto, el valor de dW es igual a cero; entonces, $dE = dQ$, sin embargo el calor a volumen constante Q_V es calculado por la expresión:

$$Q_V = n\, C_V\, dT = dE$$

y para la entalpía se tiene:

$$dH = nC_P dT$$

5.12.4 Proceso adiabático

La característica de un proceso adiabático es que está aislado térmicamente, por lo que no hay transferencia de calor ($Q = 0$), a partir de esta expresión se realizan cálculos que llevan a la obtención del coeficiente del proceso adiabático, mejor conocido como coeficiente gama.

Como $Q = 0$ se obtiene:

$$dE = -dW$$

sustituyendo en ambas expresiones:

$$nC_V dT = -PdV$$

de la relación:

$$P = \frac{nRT}{V}$$

se obtienen las siguientes expresiones:

$$nC_V dT = -\frac{nRT}{V} dV$$

$$C_V = \frac{dT}{T} = -\frac{R}{V} dV$$

integrando:

$$C_V \ln = \frac{T_2}{T_1} = -R \ln \frac{V_2}{V_1}$$

el resultado es:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\frac{R}{C_V}}$$

Con $R = C_P - C_V$, de donde:

$$\frac{R}{C_V} = \frac{C_P - C_V}{C_V} = \frac{C_P}{C_V} - 1$$

La relación:

$$\frac{C_P}{C_V} = \gamma$$

es conocida como coeficiente del proceso adiabático γ.

También pueden obtenerse las expresiones $P_1V_1^{\gamma} = P_2V_2^{\gamma}$ y $T_1P_1^{\frac{-(\gamma-1)}{\gamma}} = T_2P_2^{\frac{-(\gamma-1)}{\gamma}}$

Estas expresiones se obtienen utilizando la ecuación $\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$

Es importante incluir en este punto que existen valores predeterminados para C_P, C_V y γ, dependiendo del tipo de gas al que se refiera el proceso (véase tabla 5.7).

Tabla 5.7. Valores predeterminados.

Tipo de gas	C_P (cal/mol K)	C_V (cal/mol K)	γ
Monoatómico	5	3	1,67
Diatómico	7	5	1,40
Poliatómico	9	7	1,28

5.13 Ciclos termodinámicos

Un **ciclo termodinámico** se define como la serie de procesos consecutivos que retornan al equilibrio inicial o a las condiciones de las que originalmente se partió.

Cuando un sistema se somete a dos o más procesos, uno a continuación de otro, siendo las condiciones finales del primero, las condiciones iniciales del segundo, se dice que el sistema ha pasado por una sucesión de procesos. Si dicha secuencia tiene la particularidad de hacer que el sistema regrese a las condiciones iniciales, entonces se dice que el sistema ha sufrido un ciclo termodinámico. Una de las propiedades de los ciclos termodinámicos es que si se suman las diferenciales de cualquier ciclo (la diferencia total), la integral cíclica debe ser igual a cero.

Como cualquier ciclo, el sistema regresa finalmente a su estado inicial; la diferencia total en valor de cualquier propiedad de estado debe ser cero:

$$\oint X = 0 \qquad \text{donde } X = T, P, V, \text{E, H, etcétera.}$$

En la tabla 5.8 se dan las características generales del ciclo termodinámico.

Tabla 5.8. Valores de las variables termodinámicas para el ciclo de la figura 5.9.

Etapa	Proceso efectuado	Variable termodinámica característica	Propiedades del proceso
1-2	Expansión isobárica	P = cte	$V_2 > V_1$, $P_1 = P_2$, calentamiento
2-3	Expansión isotérmica	T = cte	$V_3 > V_2$, $P_1 < P_3$, disminución de presión
3-4	Enfriamiento isocórico o isométrico	V = cte	PV = *Energía* $P_1V_2 < P_1V_3$, $P_4 < P_3$
4-5	Compresión isobárica	P = cte	$V_1 < V_3$, enfriamiento
5-1	Compresión adiabática	$Q = 0$	$T_1 < T_5$

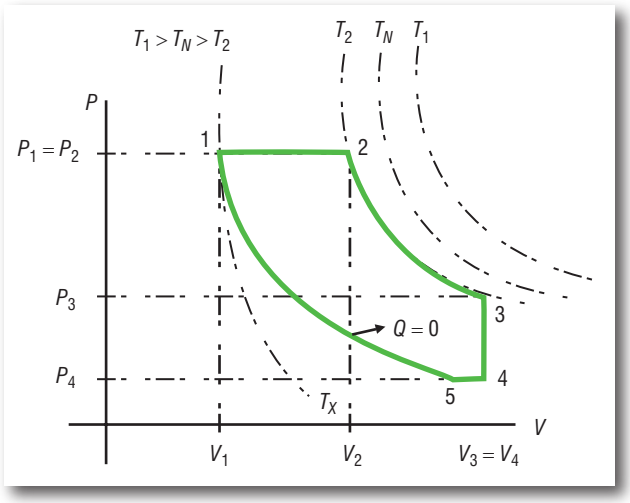


Figura 5.9 *Ejemplo de un ciclo termodinámico con los cinco procesos efectuados indicados en la tabla 5.8.*

En la tabla 5.9 se presenta un resumen de las fórmulas descritas en esta parte del capítulo.

Tabla 5.9. Formulario de la primera ley de la termodinámica (en éste se puede observar el diagrama para cada proceso).

Procesos reversibles para gases ideales, sistemas cerrados con valores de C_v y C_p medios				
	Tipo de proceso			
	Isotérmico	Isobárico	Isométrico	Adiabático
Relación *P*, *V*, *T*	Boyle $T_1 = T_2$ $P_1 V_2 = P_2 V_2$	Charles $P_1 = P_2$ $V_1/T_1 = V_2/T_2$	Gay-Lussac $V_1 = V_2$ $P_1/T_1 = P_2/T_2$	$P_1 V_1^{\gamma} = P_2 V_2^{\lambda}$ $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$ $\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{R/Cp} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{R/Cv}$
Trabajo	$W = nRT \ln \frac{P_2}{P_1} = nRT \ln \frac{V_2}{V_1}$	$W_{irrev} = P_{op}(V_2 - V_1)$ $W_{rev} = \Delta H - \Delta E$	$W = 0$	$W_{irrev} = P_{op}(V_2 - V_1)$ $W_{rev} = -\Delta E$
Cambio de energía interna	$\Delta E = 0$	$\Delta E = n C_v \Delta T$	$\Delta E = n C_v \Delta T$	$\Delta E = n C_v \Delta T$
Cambio de entalpía	$\Delta H = 0$	$\Delta H = n C_p \Delta T$	$\Delta H = n C_p \Delta T$	$\Delta H = n C_p \Delta T$
Calor	$Q = nRT \ln \frac{V_2}{V_1} = nRT \ln \frac{P_1}{P_2}$	$Q_p = \Delta H$	$Q_v = \Delta E$	$Q = 0$

5.13.1 Ciclo de Carnot

Como ya se mencionó antes, un ciclo es cualquier serie de operaciones realizadas de manera que al final el sistema se encuentra en las mismas condiciones iniciales de presión, volumen y temperatura. El ciclo de Carnot, en particular, consta de cuatro etapas:

- 1-2 Expansión isotérmica.
- 2-3 Expansión adiabática o isoentrópica.
- 3-4 Compresión isotérmica.
- 4-1 Compresión adiabática o isoentrópica.

Su rendimiento es el máximo alcanzable desde una cierta cantidad de calor absorbido a una determinada temperatura, hasta llegar a otra inferior.

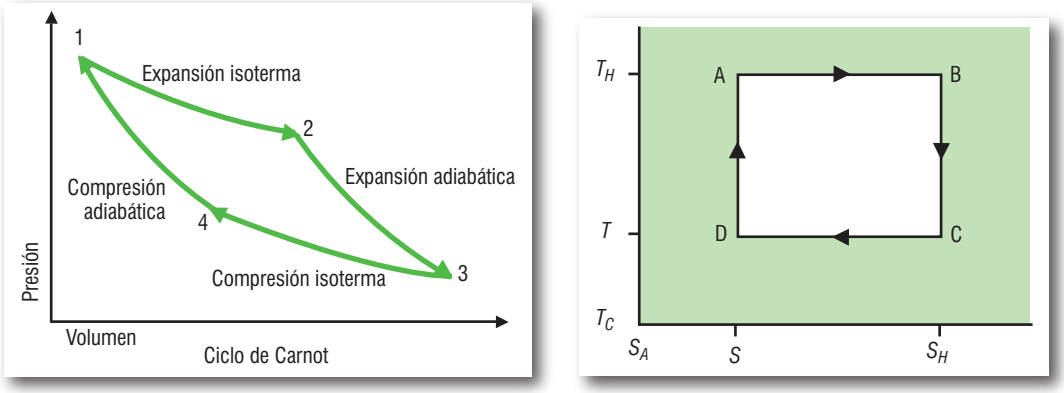


Figura 5.10 *Diagrama del ciclo de Carnot en función de la temperatura y la entropía.*

5.13.2 Ciclo de Diesel

Al igual que el ciclo de Carnot, este ciclo consta de cuatro procesos:

- a-b Compresión adiabática o isoentrópica.
- b-c Expansión isobárica.
- c-d Expansión adiabática o isoentrópica.
- d-a Enfriamiento isocórico o isométrico.

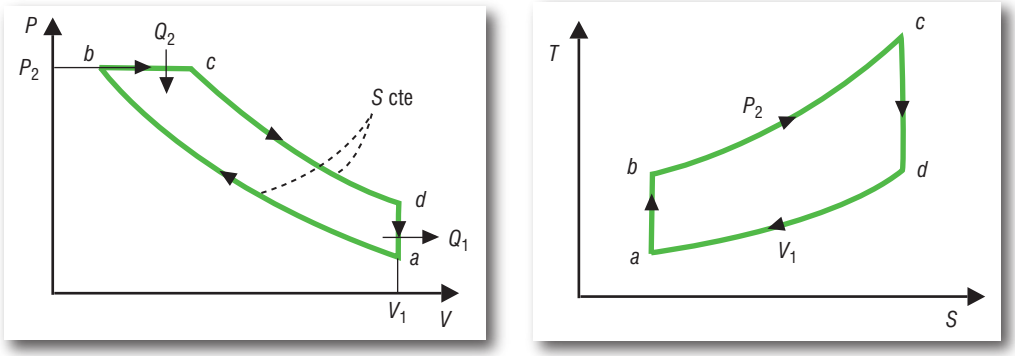


Figura 5.11 *Diagrama del ciclo de Diesel.*

5.13.3 Ciclo de Otto

El ciclo de Otto es el ciclo termodinámico ideal que se aplica en los motores de combustión interna. Se caracteriza porque todo el calor se aporta a volumen constante. El ciclo consta de cuatro procesos:

- 1-2 Compresión adiabática o isoentrópica.
- 2-3 Calentamiento isométrico o isocórico.
- 3-4 Expansión adiabática o isoentrópica.
- 4-1 Enfriamiento isométrico o isocórico.

Éste se denomina ciclo del motor de cuatro tiempos (admisión, compresión, expansión y escape).

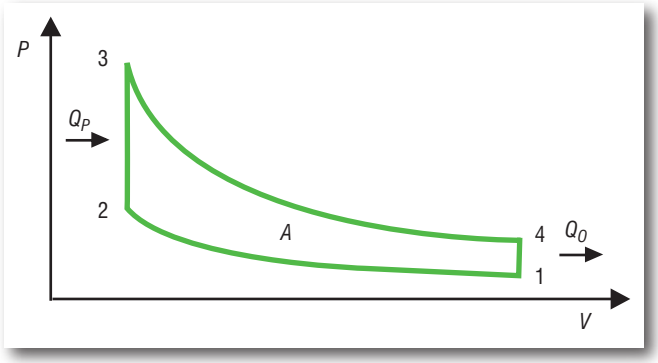


Figura 5.12 *Diagrama del ciclo de Otto.*

5.13.4 Ciclo de Rankine

Hay cuatro procesos distintos en el desarrollo de este ciclo, los cuales van cambiando el estado del fluido. Estos estados quedan definidos por los números del 1 al 4 en el diagrama T-S:

- Proceso a-b Expansión isoentrópica.
- Proceso b-c Calentamiento isobárico.
- Proceso c-d Compresión isoentrópica.
- Proceso d-a Enfriamiento isobárico.

Diagrama *T-S* del ciclo

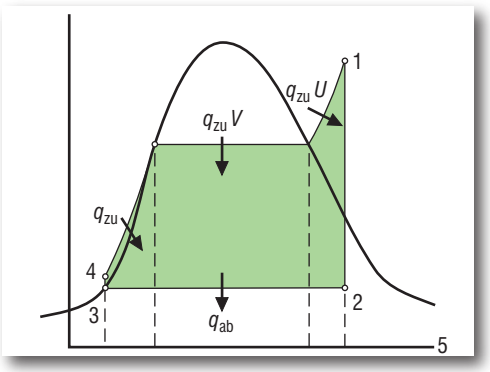


Diagrama *P-V* del ciclo

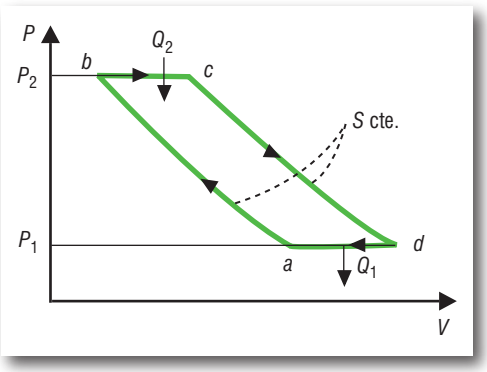


Figura 5.13 *Diagrama del ciclo de Rankine.*

5.13.5 Ciclo de Brayton o Joule

Se denomina ciclo de Brayton a un ciclo termodinámico de compresión, calentamiento y expansión de un fluido compresible, generalmente aire, que se emplea para producir trabajo neto y su posterior aprovechamiento como energía mecánica o eléctrica.

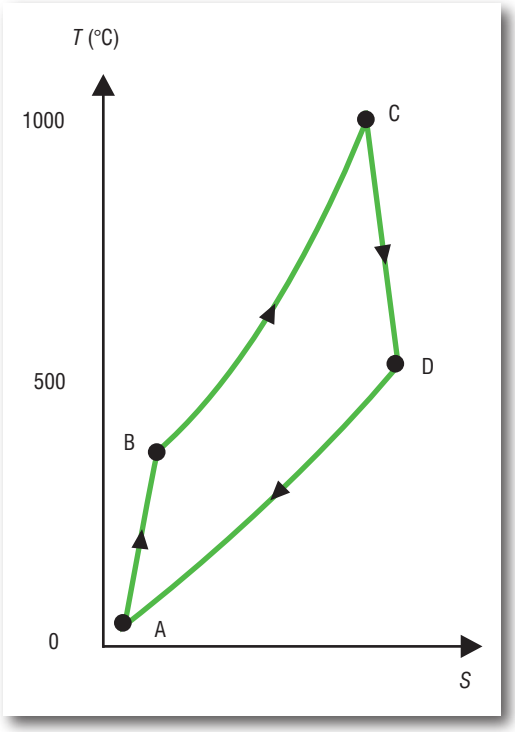


Figura 5.14 *Diagrama del ciclo Brayton en una turbina de gas, en función de la entropía S y la temperatura T.*

5.13.6 Ciclo de Atkinson

El ciclo Atkinson se diseñó para ofrecer mayor eficiencia a expensas de la potencia, se están empezando a utilizar en las aplicaciones híbridas modernas, como se podrá ver en el tema de actualidad para los motores híbridos.

Éste contempla seis procesos termodinámicos:

- 1-2 Compresión isotérmica.
- 2-3 Calentamiento isométrico o isocórico.
- 3-4 Expansión isobárica.
- 4-5 Expansión adiabática.
- 5-6 Enfriamiento isométrico o isocórico.
- 6-1 Compresión isobárica.

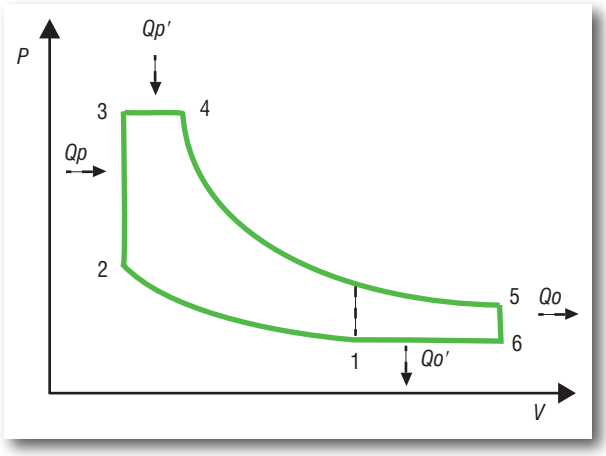


Figura 5.15 *Ciclo termodinámico de un motor Atkinson.*

5.13.7 Ciclo Stirling

El ciclo Stirling es un ciclo termodinámico del motor Stirling, el cual busca obtener el máximo rendimiento. Por esta razón, es semejante al ciclo de Carnot.

A diferencia de la máquina de Carnot (la cual logra la mayor eficiencia), esta máquina está constituida por dos adiabáticas reversibles y dos isocoras.

Existe también una máquina similar según el ciclo Ericsson, la cual consta de dos adiabáticas reversibles y dos isobaras.

El **ciclo Stirling ideal** consiste en cuatro procesos termodinámicos que actúan sobre el fluido de trabajo:

- 1-2. Compresión isotérmica.
- 2-3. Calentamiento isométrico o isocórico. *Qr*.
- 3-4. Expansión isotérmica.
- 4-1. Enfriamiento isométrico o isocórico. *Qr*.

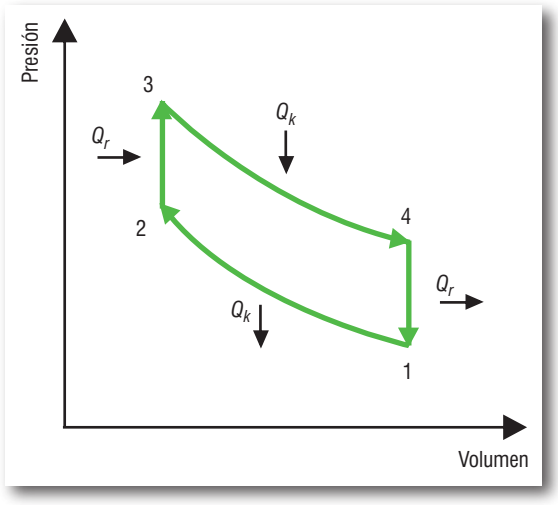


Figura 5.16 *Diagrama P-V para el ciclo Stirling.*

5.14 Metodología para resolver problemas de leyes de los gases ideales y procesos termodinámicos

1. Leer el problema.
2. Analizar el problema.
3. Elaborar un diagrama de:
   a) Variables.
   b) Procesos.
4. Anotar todos los datos del problema en ambos diagramas, incluyendo las preguntas del problema.
5. Realizar todas las conversiones de acuerdo con las unidades de R (constante de ley general del estado gaseoso).
6. Generar los despejes que permitan resolver las incógnitas de variables de estado.
7. Realizar las sustituciones numéricas y dimensionales correspondientes.
8. Elaborar una tabla de resultados de Q, W, ΔE y ΔH.
9. Resolver las preguntas del problema.

5.15 Aplicación de la metodología para resolver problemas de procesos termodinámicos

Ejemplo 3

Supóngase que 2,4 kg de aire precalentado se someten a un ciclo ideal reversible bajo las siguientes condiciones. El inicio del ciclo es un proceso de compresión que obedece al comportamiento $PV^{\gamma} = \text{cte.}$, donde $V_1/V_2 = 17$, y donde la temperatura es de 40 °C y la presión es de 1 atm. Aprovechando la combustión, se calienta el gas y la relación de volumen provocado por el gas es $V_3/V_2 = 2$, siguiendo una relación $V/T = \text{cte}$. A continuación, se lleva a cabo una expansión en ausencia de calor hasta la temperatura de 826 K. De esas condiciones sigue un enfriamiento hasta una presión de 1 atm y una temperatura de 40 °C. Considérese $\gamma = 1{,}4$ y la composición del aire (79% mol de N_2 y 21% mol de O_2).

a) Determinar todas las variables de estado.

b) Determinar los procesos y sus características.

c) Calcular Q, W, ΔE y ΔH para cada proceso y para todo el ciclo.

d) Elaborar el diagrama P *vs.* V real.

Solución:

Siguiendo la metodología propuesta se indica a continuación su desarrollo:

1. Leer el problema

Como ya se mencionó en el tema de la metodología de gases ideales y procesos, en esta parte de la metodología es posible darse cuenta de que en el problema se menciona

que el gas es aire que es una mezcla gaseosa formada por 21% mol de O_2 y 79% mol de N_2, se indican los datos y las relaciones de las variables de estado, se mencionan los procesos consecutivos que se llevan a cabo y piden el diagrama de variables, el diagrama de procesos, el diagrama de *P vs. V* real y los valores totales de las propiedades termodinámicas para cada proceso y para todo el ciclo.

2. Analizar el problema

…***2,4 kg de aire precalentado***…

Con estos datos se conoce la masa de aire, y como también se conoce la composición del aire, es posible conocer el peso molecular promedio, con esta información y con la fórmula siguiente:

$$n = \frac{m}{PM}$$

Se determina el número de mol del aire. El hecho de que el aire sea una mezcla de gases diatómicos permite conocer los valores de C_V , C_p y γ:

$$C_V = 5\frac{\text{cal}}{\text{mol K}},\ Cp = 7\frac{\text{cal}}{\text{mol K}} \quad \text{y} \quad \gamma = 1,4$$

…se someten a un ciclo ideal reversible bajo las siguientes condiciones.

Esta parte de la oración indica que las variables iniciales y finales son iguales; además de que los procesos pueden ir en ambas direcciones del punto 1-2 o 2-1 y así sucesivamente, además que para los procesos isotérmicos:

$$Q = W = nRT\ln\frac{P_f}{P_i} = nRT\ln\frac{V_1}{V_2}$$

y para los procesos adiabáticos:

$$W = -\Delta E = -\left[nCv\left(T_f - T_i\right)\right] \qquad \text{por ser reversible}$$

…el inicio del ciclo es con un proceso de compresión que obedece al comportamiento $PV^{\gamma} = cte$***…***

De acuerdo con el diagrama del proceso adiabático, podemos identificarlo.

Proceso adiabático:

$$PV^{\gamma} = \text{cte};\ P_iV_i^{\gamma} = P_fV_f^{\gamma};\ \frac{T_f}{T_i} = \left(\frac{P_f}{P_i}\right)^{R/C_p} = \left(\frac{V_i}{V_f}\right)^{R/C_p};$$

$$\Delta H = nC_p\left(T_f - T_i\right); \qquad \Delta E = nC_v\left(T_f - T_i\right); \qquad W = -\Delta E$$

…donde $V_1/V_2 = 17$***, la temperatura es de 4 °C y la presión es de 1 atm…***

Como ya se conoce el número de mol, la presión y la temperatura inicial, el volumen 1 se puede conocer por la ley general del estado gaseoso:

$$P_1V_1 = nRT_1 \Rightarrow V_1 = \frac{nRT_1}{P_1}$$

Y por la relación dada en el problema, se puede conocer el V_2 por despeje $V_2 = \frac{V_1}{17}$.

Con este dato y las fórmulas del diagrama de procesos se pueden encontrar las variables y las propiedades faltantes:

$$P_2 = \frac{P_1 V_1^{\gamma}}{V_2^{\gamma}};\ T_2 = T_1\left(\frac{V_i}{V_f}\right)^{R/C_p}$$

$$\Delta H = n\,C_p\left(T_f - T_i\right)$$

$$\Delta E = n\,C_v\left(T_f - T_i\right)$$

$$W = -\Delta E$$

…aprovechando la combustión, se calienta el gas y la relación volumen provocado por el gas es $\frac{V_3}{V_2} = 2$ ***siguiendo una relación*** $\frac{V}{T}$ ***cte…***

Recuérdese que el proceso isobárico indica que:

$$P = \text{cte},\ P_i = P_f;$$

$$\frac{V_i}{V_f} = \frac{T_i}{T_f};\quad V \propto T;\qquad V/T = \text{cte};$$

$$Qp = \Delta H;\qquad \Delta H = nCp(T_f - T_i);$$

$$\Delta E = nCv(T_f - T_i);\ W = \Delta H - \Delta E$$

y como existe la relación $\frac{V_3}{V_2} = 2$ se pueden conocer por despeje las variables y las propiedades correspondientes:

$$V_3 = 2V_2$$

$$T_3 = \frac{T_2 V_3}{V_2}$$

$$Q_P = \Delta H = n\,Cp(T_3 - T_2)$$

$$\Delta E = n\,Cv(T_3 - T_2)$$

$$W = \Delta H - \Delta E$$

…a continuación se lleva a cabo una expansión en ausencia de calor hasta la temperatura de 826 K…

Al declarar que el proceso se realiza en ausencia de calor, se indica que éste es adiabático; entonces, se pueden encontrar las variables y las propiedades correspondientes por despeje de las fórmulas siguientes:

$$P_4 = P_3\left(\frac{T_4}{T_3}\right)^{Cp/R}$$

$$V_4 = \left(\frac{P_3 V_3^{\gamma}}{P_4} \right)^{1/\gamma}$$

$$Q = 0$$

$$\Delta H = n\,Cp(T_4 - T_3)$$

$$\Delta E = n\,Cv(T_4 - T_3)$$

$$W = -\Delta E$$

…de estas condiciones sigue un enfriamiento hasta una presión de 1 atm y una temperatura de 40 °C…

Como ya se mencionó, este proceso es un ciclo, lo que indica que las condiciones iniciales son iguales a las finales, de esta forma $V_5 = V_1$; $T_5 = T_1$; $P_5 = P_1$, lo cual indica que ya se conoce el volumen 5, dado que es igual a V_4. El último proceso sería isométrico, si es diferente $P_5 = P_4$, éste sería isobárico y si todas las variables fueran diferentes sería adiabático. Una vez resueltos los valores de las variables, es posible definir el último proceso que cierra el ciclo.

…considérese γ = 1,4 y la composición del aire (79% mol de N_2 y 21% mol de O_2)…

Con estos datos se confirma que el aire es considerado un gas diatómico, por lo que $\gamma = 1,4 = \dfrac{C_P}{C_V}$ y como se sabe que $R = C_P - C_V = 1,987 \dfrac{\text{cal}}{\text{mol K}} \approx 2 \dfrac{\text{cal}}{\text{mol K}}$ se puede determinar el valor de C_P por despeje de γ:

$$C_P = 1,4 C_V$$

y sustituyendo en R, se encontrará el valor numérico de C_V.

$$R = 1,4 C_V - C_V = 2 \frac{\text{cal}}{\text{mol K}} \therefore C_V = 5 \frac{\text{cal}}{\text{mol K}} \Rightarrow C_P = 1,4(5 \frac{\text{cal}}{\text{mol K}}) = 7 \frac{\text{cal}}{\text{mol K}}$$

Con la composición del aire se puede conocer el peso molecular promedio con el llenado de la tabla 5.10.

Tabla 5.10.

Componentes	PM_i $\left(\frac{g}{mol}\right)$	% mol	$X_i = \left(\frac{\%\ mol}{100}\right)$	$X_i PM_i$ $\left(\frac{m}{mol}\right)$
N_2	28	79		
O_2	32	21		
Total		**100**	**1.0**	$\overline{PM}$

a) Determinar todas las variables de estado.

b) Determinar Q, W, ΔE y ΔH, parciales y totales.

c) Elaborar el diagrama P *vs.* V real.

Como se puede observar en este análisis, las preguntas quedan resueltas en un 100% después de obtener los valores numéricos.

3. Elaborar un diagrama de variables

El diagrama de variables es igual al diagrama de las leyes de gases, sólo que se deben agregar las constantes para las expresiones de calor (C_P, C_V, R y γ).

4. Elaborar un diagrama de procesos

Al igual que el diagrama de variables, a éste se le deben agregar las expresiones de calor, energía, trabajo y entalpía.

Estos dos diagramas se deben realizar al mismo tiempo.

Tabla 5.11.

Diagrama de variables	Diagrama de procesos
Aire $m = 2\,400$ g $\overline{PM} = ?$ Composición del aire 79% mol N_2 21% mol O_2 $n = ? = m/PM$ $\gamma = 1{,}4$ $C_P = 7\dfrac{\text{cal}}{\text{mol K}}$ $C_V = 5\dfrac{\text{cal}}{\text{mol K}}$ $R = 0{,}082\dfrac{\text{atm}}{\text{mol K}} = 1{,}987\dfrac{\text{cal}}{\text{mol K}}$ $P_1 = 1$ atm $T_1 = 40\ ^{o}$C $V_1 = ?$ $P_2 = ?$ $T_2 = ?$ $V_2 = V_1/17$ $P_3 = P_2$ $T_3 = ? = T_2V_3/V_2$ $V_3 = 2V_2$ $P_4 = ? = P_3(T_4/T_3)^{CP/R}$ $T_4 = 826$ K $V_4 = ?$ $P_5 = 1$ atm $= P_1$ $T_5 = 40\ ^{o}$C $= T_1$ $V_5 = V_1$	1-2 Procesos de compresión adiabática; $Q = 0$ $P_1 \neq P_2$; $T_1 \neq T_2$: $V_1 \neq V_2$ $PV^{\gamma} = \text{cte}$; $P_1V_1^{\gamma} = P_2V_2^{\gamma}$ c; $\Delta H = nC_p(T_2 - T_1)$ $\Delta E = nC_v(T_2 - T_1)$ $W\text{rev} = -\Delta\text{E}$ 2-3 Proceso de calentamiento isobárico $P = \text{cte}$; $P_2 = P_3$; $V \propto T$; $\dfrac{V}{T} = \text{cte}$; $\dfrac{V_2}{V_3} = \dfrac{T_2}{T_3}$ $Q_p = \Delta H = nC_p(\text{T}_3 - \text{T}_2)$ $W = \Delta H - \Delta E$ 3-4 Proceso de expansión adiabática $Q = 0$; $P_3 \neq P_4$; $T_3 \neq T_4$; $V_3 \neq V_4$; $PV^{\gamma} \neq \text{cte}$ $P_3V_3^{\gamma} = P_4V_4^{\gamma}$ $\dfrac{T_4}{T_3} = \left(\dfrac{P_4}{P_3}\right)^{R/C_p} = \left(\dfrac{V_4}{V_3}\right)^{R/C_v}$ $\Delta H = nC_p(T_4 - T_3)$ $\Delta\text{E} = nC_v(T_4 - T_3)$ $W\text{rev} = -\Delta E$ 4-1 Proceso desconocido Preguntas: a) Determinar las variables de estado. b) Determinar los procesos. c) Calcular Q, W, ΔE y ΔH para cada proceso y el ciclo. d) Elaborar diagrama *P vs. V* real.

5. Realizar las conversiones

$$m = 2{,}4 \text{ kg}\left|\frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}}\right| = 2\,400 \text{ g} \qquad T_1 = 40\ ^{\circ}\text{C} + 273 = 313 \text{ K}$$

6. Generar los despejes

Primero se determinará el $\overline{PM}$ del aire.

Tabla 5.12.

Componentes	PM_i $\left(\frac{g}{mol}\right)$	% mol	$X_i = \left(\frac{\%\ mol}{100}\right)$	$X_i PM_i$ $\left(\frac{g}{mol}\right)$
N_2	28	79	0,79	22,12
O_2	32	21	0,21	6,72
Total		**100**	**1,0**	**28,84**

El número de moles se determina con la siguiente fórmula:

$$n = \frac{m}{\overline{PM}} = \frac{2\,400 \text{ g}}{28{,}84 \text{ g/mol}} = 83{,}22 \text{ mol}$$

Por la ley general del estado gaseoso, es posible determinar el volumen 1:

$$P_1V_1 = nRT_1 \text{ entonces } \therefore V_1 = \frac{nRT_1}{P_1} = \frac{(83{,}22 \text{ mol})(0{,}082 \text{ atm/mol})(313 \text{ K})}{1 \text{ atm}} = 2136 \text{ L}$$

Se utilizarán las fórmulas de los procesos para determinar las demás variables:

$$V_2 = \frac{V_1}{17} = \frac{2136 \text{ L}}{17} = 125{,}65 \text{ L}$$

$$P_2 = \frac{P_1V_1^{\gamma}}{V_2^{\gamma}} = \frac{(1 \text{ atm})(2136 \text{ L})^{1{,}4}}{(125{,}65 \text{ L})^{1.4}} = 52{,}8 \text{ atm}$$

$$T_2 = T_1\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{R/Cv} = 313 \text{ K}\left(\frac{2136 \text{ L}}{125{,}65 \text{ L}}\right)^{2/5} = 972{,}13 \text{ K}$$

$$V_3 = 2V_2 = 2(125{,}65 \text{ L}) = 251{,}3 \text{ L}$$

$$P_3 = P_2 = 52{,}8 \text{ atm}$$

$$T_3 = \frac{T_2V_3}{V_2} = \frac{(972{,}13 \text{ K})(251{,}3 \text{ L})}{125{,}65 \text{ L}} = 1944{,}26 \text{ K}$$

$$P_4 = P_3\left(\frac{T_4}{T_3}\right)^{Cp/R} = 52{,}8 \text{ atm}\left(\frac{826 \text{ K}}{1944{,}26 \text{ L}}\right)^{7/2} = 2{,}64 \text{ atm}$$

$$V_4 = \left(\frac{P_3 V_3^{\lambda}}{P_4}\right)^{1/\gamma} = \left[\frac{(52{,}8\ \text{atm})(25{,}34)^{1{,}4}}{2{,}64\ \text{atm}}\right]^{1/1{,}4} = 2135{,}4\ \text{L}$$

Como se puede observar, el volumen 4 es igual al volumen inicial, lo cual indica que el proceso con el que se cierra el ciclo es un proceso isométrico y su diagrama es:

4-1 Proceso de enfriamiento isométrico o isocórico:

$$V_2 = \text{cte};\ V_4 = V_1;\ P\alpha T;\ P/T = \text{cte};\ \frac{P_4}{P_1} = \frac{T_4}{T_1};$$

$$Q_V = \Delta E = n C_v (T_1 - T_4);\quad \Delta H = n C_p (T_1 - T_4);\quad W = 0$$

7. Elaborar una tabla de resultados de Q, W, ΔE y ΔH.

Tabla 5.13.

Proceso	Q	W	ΔE	ΔH
1-2 $Q = 0$	0	–274 264	274 264	383 969,6
2-3 P = cte	566 304,6	161 801,3	404 503,3	566 304,4
3-4 $Q = 0$	0	465 308	–465 308	–651 431,2
4-1 V = cte	–21 459,3	0	–213 459,3	–298 843
Totales	**352 845,3**	**352 845,3**	**0**	**0**

$$\Delta H_{1-2} = n C_p (T_2 - T_1) = (83{,}22\ \text{mol})\left(7\frac{\text{cal}}{\text{mol K}}\right)(972{,}13\ \text{K} - 313\ \text{K}) = 383969{,}6\ \text{cal}$$

$$\Delta E_{1-2} = n C_v (T_2 - T_1) = (83{,}22\ \text{mol})\left(5\frac{\text{cal}}{\text{mol K}}\right)(972{,}13\ \text{K} - 313\ \text{K}) = 274\,264\ \text{cal}$$

$$\Delta H_{2-3} = n C_p (T_3 - T_2) = (83{,}22\ \text{mol})\left(7\frac{\text{cal}}{\text{mol K}}\right)(1944{,}26\ \text{K} - 972{,}13\ \text{K}) = 566\,304\ \text{cal}$$

$$\Delta E_{2-3} = n C_v (T_2 - T_1) = (83{,}22\ \text{mol})\left(5\frac{\text{cal}}{\text{mol K}}\right)(1944{,}13\ \text{K} - 972.13\ \text{K}) = 404\,503{,}3\ \text{cal}$$

$$W_{2-3} = \Delta H - \Delta E = 566\,304{,}6\ \text{cal} - 404\,503{,}3\ \text{cal} = 161\,801{,}3\ \text{cal}$$

$$\Delta H_{3-4} = n C_p (T_4 - T_3) = (83{,}22\ \text{mol})\left(7\frac{\text{cal}}{\text{mol K}}\right)(826\ \text{K} - 1944{,}26\ \text{K}) = -651\,431{,}2\ \text{cal}$$

$$\Delta E_{3-4} = n C_p (T_4 - T_3) = (83{,}22\ \text{mol})\left(5\frac{\text{cal}}{\text{mol K}}\right)(826\ \text{K} - 1944{,}26\ \text{K}) = -465\,308\ \text{cal}$$

$$W_{3-4} = -\Delta E = 566\,304{,}6\ \text{cal} - 404\,503{,}3\ \text{cal} = 161\,801{,}3\ \text{cal}$$

Recuérdese que para que exista un ciclo se deben de cumplir tres criterios:

1. Las variables iniciales y finales deben ser iguales.

$$T_1 = T_5 = 313 \text{ K}$$
$$P_1 = P_5 = 1 \text{ atm}$$
$$V_1 = V_5 = 2\ 136 \text{ L}$$

2. El calor total debe ser igual al trabajo total.

$$Q_T = W_T = 352\ 845{,}3 \text{ cal}$$

3. La entalpía total y la energía total deben ser cero.

$$\Delta H_T = \Delta E_T = 0$$

Como se puede observar, aquí se cumplen los tres criterios; por tanto, se puede afirmar que se trata de un ciclo.

8. Resolver las preguntas del problema

a) Determinar las variables de estado.

Diagrama de variables

Aire

$$m = 2\,400 \text{ g}$$

$$\overline{PM} = \sum \left(X_i PM_i \right) = 2\,884 \text{ g/mol}$$

$$n = \frac{m}{PM} = 83{,}22 \text{ mol}$$

$$\gamma = 1{,}4$$

$$C_p = 7 \frac{\text{cal}}{\text{mol K}}$$

$$C_v = 5 \frac{\text{cal}}{\text{mol K}}$$

$$R = 0{,}082 \frac{\text{atm}}{\text{mol K}} = 1{,}987 \frac{\text{cal}}{\text{mol K}}$$

$$P_1 = 1 \text{ atm}$$

$$T_1 = 40\ ^{\circ}\text{C} = 313 \text{ K}$$

$$V_1 = \frac{nRT}{P_1} = 2136 \text{ L}$$

$$P_2 = \frac{P_1 V_1^{\gamma}}{V_2^{\gamma}} = 52{,}8 \text{ atm}$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{R/Cv} = 972{,}13 \text{ K}$$

$$V_{2=} = \left(\frac{V_1}{17} \right) = 125{,}65 \text{ L}$$

$$P_3 = P_2 = 52{,}8 \text{ atm}$$

$$T_3 = \frac{T_2 V_3}{V_2} = 1944{,}26 \text{ K}$$

$$V_3 = 2V_2 = 251{,}3 \text{ L}$$

$$P_4 = P_3\left(\frac{T_4}{T_3}\right)^{Cp/R} = 2{,}64 \text{ atm}$$

$$T_4 = 826 \text{ K}$$

$$P_5 = 1 \text{ atm} = P_1$$

$$T_5 = 40\ ^{o}\text{C} = 313 \text{ K} = T_1$$

$$V_5 = V_4 = 2\ 135{,}4 \text{ L} = V_1$$

b) Determinar los procesos

1-2 Proceso de compresión adiabático.

2-3 Proceso de calentamiento isobárico.

3-4 Proceso de expansión adiabática.

4-1 Proceso de enfriamiento isométrico o isobárico.

c) Calcular Q, W, ΔE y ΔH para cada proceso y para todo el ciclo.

La tabla elaborada da respuesta al problema.

d) Elaborar un diagrama real de *P vs. V.*

Para resolver este punto se deben tomar los valores de presión y de volumen del diagrama de variables y graficarlos.

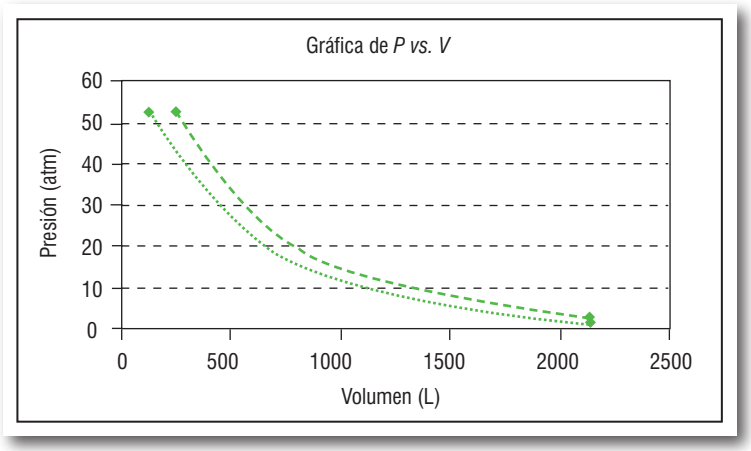


Figura 5.17

Como se puede observar, el ejemplo está totalmente resuelto.

5.16 Ley cero de la termodinámica (termofísica)

Se tienen dos sistemas *A* y *B* térmicamente aislados uno del otro, por medio de una pared adiabática; por ejemplo, aislantes térmicos, gruesas capas de madera o de asbesto, etc. (véase figura 5.18).

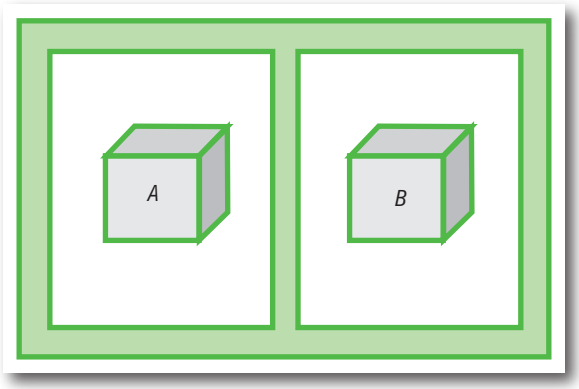


Figura 5.18 *Dos sistemas, A y B, aislados por una pared adiabática, caracterizados por masa (m), capacidad calorífica (CP) y temperatura (T).*

A continuación, estos sistemas se ponen en contacto térmico al sustituir la pared adiabática que los divide por una pared diatérmica en la que se permite el intercambio de energía térmica (véase figura 5.19).

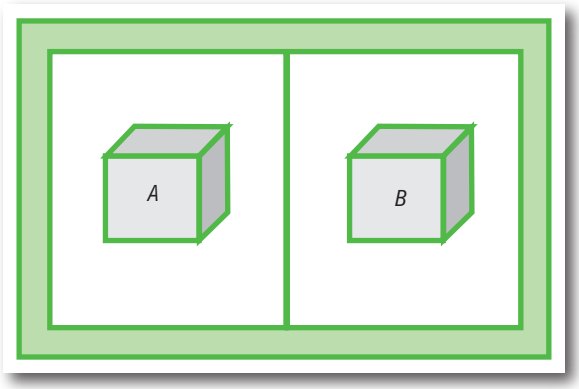


Figura 5.19 *Los mismos sistemas, A y B, aislados por una pared diatérmica. Las variables consideradas anteriormente no cambian.*

Los cambios en los sistemas *A* y *B* percibidos al paso del tiempo, indican que $T_A = T_B$, esto es conocido en la obtención de un equilibrio térmico en el sistema, debido a la diferencia entre los gradientes térmicos de los sistemas considerados.

Si ahora se modifica el sistema de tal manera que se añada un tercer sistema, con las condiciones de temperatura $T_A, \neq T_B, \neq T_C$ (véase figura 5.20).

El resultado experimental muestra que pasando un determinado lapso de tiempo se tiene que $T_A = T_B = T_C$, y no habrá ningún cambio posterior si la pared es cambiada por una

pared diatérmica. Se sabe que la temperatura final (T_f) del proceso efectuado corresponde a la temperatura de equilibrio (T_e):

$$T_{\text{final}} = T_{\text{equilibrio}}$$

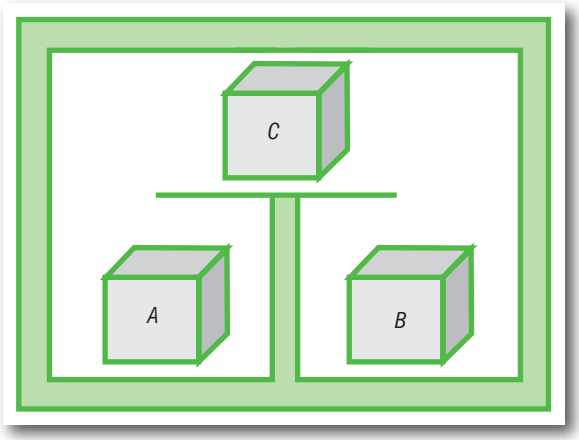


Figura 5.20 *El sistema presenta diferencias entre el gradiente de temperatura para cada sistema presente.*

Estas experiencias pueden resumirse en la ley cero de la termodinámica, la cual sostiene que **dos sistemas en equilibrio térmico con un tercero, están en equilibrio entre sí**.

Cabe hacer notar que esta ley no es más que una formulación del concepto del grado relativo de calentamiento entre dos cuerpos y este atributo es una propiedad del sistema que se identifica con su temperatura.

5.17 Calor sensible y calor latente

5.17.1 Calor sensible

El calor sensible es aquel que recibe o cede un cuerpo sin cambiar su estado físico mientras sube o disminuye su temperatura. En general, se ha observado experimentalmente que la cantidad necesaria de calor para calentar o enfriar un cuerpo es directamente proporcional a la masa del cuerpo y al incremento de su temperatura. La constante de proporcionalidad recibe el nombre de capacidad calorífica. El calor sensible se puede calcular por:

$$Qs = m\, C_p (T_2 - T_1) \qquad \text{las unidades de } C_p \text{ son calor/g°C}$$

$$Qs = n\, C_p (T_2 - T_1) \qquad \text{las unidades de } C_p \text{ son calor/mol °C}$$

En donde C_p es la capacidad calorífica a presión constante, definida como la cantidad de calor requerida para aumentar en un grado la temperatura de la unidad de masa de un cuerpo a presión constante. Se expresa en (unidad de calor/g °C), (unidad de calor/mol K), y donde T es la temperatura final (2) o inicial (1), m es la masa expresada en gramos y n es la masa expresada en mol.

Si el proceso se efectuara a volumen constante, entonces el calor sensible sería:

$$Qs = m\, C_v (T_2 - T_1) \qquad \text{las unidades de } C_p \text{ son calor/g°C}$$

$$Qs = n\, C_v (T_2 - T_1) \qquad \text{las unidades de } C_p \text{ son calor/mol °C}$$

En donde C_v es la capacidad calorífica a volumen constante. Las capacidades caloríficas varían con la temperatura y el estado físico de agregación de las sustancias.

5.17.2 Calor latente o calor de cambio de estado

El calor latente o calor de cambio de estado es la energía absorbida por las sustancias al cambiar de estado: de sólido a líquido (calor latente de fusión) o de líquido a gaseoso (calor latente de vaporización). Al cambiar de gaseoso a líquido y de líquido a sólido se cede la misma cantidad de energía.

$$Q_L = m\,\lambda$$

$$Q_L = n\,\Delta H$$

El agua tiene un calor latente de vaporización más alto que el del amoníaco ya que para romper los puentes de hidrógeno que enlazan las moléculas es necesario suministrar mucha energía y el segundo calor de fusión más alto. El amoniaco presenta características completamente opuestas:

- Agua: calor de fusión: 334 J/g (80 cal/g); calor de vaporización: 2272 J/g (540 cal/g).
- Amoniaco: calor de fusión: 180 cal/gramo; calor de vaporización: 1369 J/g (327 cal/g).

Una de las ventajas del elevado calor de vaporización del agua es que permite a determinados organismos disminuir su temperatura corporal, mediante la transpiración.

5.18 Balance de calor

Una de las aplicaciones prácticas de la ley cero de la termodinámica está en el desarrollo de balances de energía en sistemas, donde el principio en que se fundamenta es que cuando un sistema en contacto con otro cede calor, el otro lo recibe:

$$Q_{\text{perdido}} = Q_{\text{ganado}}$$

y considerando que los procesos se efectúan a presión constante se tiene que

$$(mC_p dT)_{\text{perdido}} = (mC_p dT)_{\text{ganado}}$$

Cuando se calienta una sustancia, por ejemplo agua, desde el estado sólido hasta el vapor se efectúan las consideraciones que a continuación se llevan a cabo y que tienen que ver con los conceptos antes descritos (véase figura 5.21).

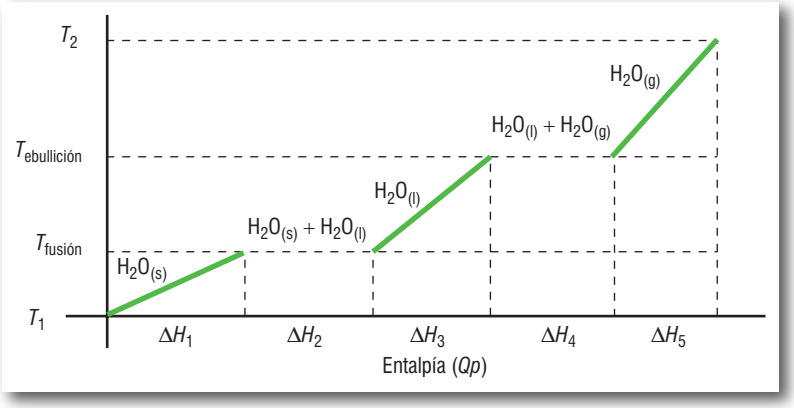


Figura 5.21 *Diagrama temperatura-entalpía, a P = 1 atm.*

El cálculo del calor total para la sustancia considerada sería:

$$\Delta H_{\text{Total}} = \sum_i^n \Delta H_n = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 + \Delta H_4 + \Delta H_5$$

$$\Delta H_{\text{Total}} = Q_{\text{total}} = (mC_p dT)_{\text{hielo}} + m\,\Delta H_{\text{fusión}} + (mC_p dT)_{\text{agua}} + m\,\Delta H_{\text{evaporación}} + (mC_p dT)_{\text{vapor de agua}}$$

$$= \int_{T_1}^{T_{\text{fusión}}} m_{\text{sólido}} C_{p\text{sólido}} dT + m_{\text{sólido}} \lambda_{\text{fusión}} + \int_{T_{\text{fusión}}}^{T_{\text{ebullición}}} m_{\text{líquido}} C_{p\text{líquido}} dT +$$

$$m_{\text{gas}} \lambda_{\text{evaporación}} + \int_{T_{\text{ebullición}}}^{T_2} m_{\text{gas}} C_{p\text{gas}} dT$$

5.19 Metodología para resolver problemas de termofísica

La metodología propuesta en esta parte del tema es similar a las anteriores; sin embargo, aquí lo importante es que el calor que cede el sistema lo absorbe el entorno y viceversa. El agua que sirve como principal regulador de la temperatura de los sistemas al ponerse en contacto indirecto con los reactivos, productos o sustancias involucrados en el proceso mediante una pared diatérmica; esta agua pasa a través de tuberías que rodean a los reactores o tanques. Estos dispositivos son conocidos como equipos de transferencia de calor, que pueden ser de calentamiento o enfriamiento, según sea el caso.

La metodología propuesta es:

1. Leer el problema.
2. Analizar el problema.
3. Anotar todos los datos del problema en un listado.
4. Elaborar el balance de calor para designar quién cede y quién absorbe el calor.
5. Realizar las conversiones pertinentes y los despejes correspondientes.
6. Resolver las preguntas del problema.

5.20 Aplicación de la metodología

Ejemplo 4

En un reactor químico se generan 4 500 kcal/h, para regular su temperatura y para que la presión en el reactor no se incremente, se hace pasar por las tuberías que rodean al reactor (enchaquetado) agua a una temperatura de 20 °C. Se sabe que para que exista una perfecta regulación, el agua debe salir del enchaquetado como vapor a 150 °C.

Determine:

➥ La cantidad de agua que se debe alimentar al intercambiador de calor por minuto para lograr la regulación de la temperatura.

Considere que el calor latente de vaporización del agua es 540 cal/g y su capacidad calorífica 1 cal/g °C, además de que el reactor tiene una eficiencia en la transferencia de calor de 65%.

1. En la lectura del problema es posible distinguir de que en éste se habla de un intercambiador de calor en donde entra el agua fría y sale vapor, lo cual indica que existe un

cambio de fase en la transferencia y que la transferencia no es de 100% y que el flujo de calor es por cada hora de operación.

2. Se analizará el problema parte por parte:

En un reactor químico se generan 4 500 kcal/h, para regular su temperatura y para que la presión en el reactor no se incremente…

Esta parte del problema indica que el calor cedido en el balance es el generado en el reactor, por lo que se sabe que:

$$Q_{\text{cedido}} = 4\,500 \text{ kcal/h}$$

… se hace pasar por las tuberías que rodean al reactor (enchaquetado) agua a una temperatura de 20 °C. Se sabe que para que exista una perfecta regulación, el agua debe salir del enchaquetado como vapor a 150 °C…

Esta parte del problema indica que el calor absorbido en el balance es el que absorbe el agua, esto es:

$$Q_{\text{absorbido}} = Q_{\text{agua}}$$

En este punto, también es posible percibir que el agua entra a una temperatura de 20 °C y sale como vapor a 150 °C, variación que indica que existe un cambio de fase en ésta (de líquido a vapor) por lo que el calor absorbido por el agua se puede representar de la siguiente manera:

$$Q_{\text{agua}} = Q_{\text{sensible del agua}} + Q_{\text{latente de agua}} + Q_{\text{sobrecalentamiento}}$$

Recuérdese que:

$$Q_{\text{sensible del agua}} = (m_{\text{agua}})(C_{\text{pagua}})(T_{\text{eb}} - T_1)$$
$$Q_{\text{latente de agua}} = (m_{\text{agua}})(\lambda_{\text{vapor}})$$
$$Q_{\text{sobrecalentamiento}} = (m_{\text{agua}})(C_{\text{pvapor}})(T_2 - T_{\text{eb}})$$

Determine:

- La cantidad de agua que se debe alimentar al intercambiador de calor por minuto para lograr la regulación de la temperatura.

Considere que el calor latente de vaporización del agua es 540 cal/g y su capacidad calorífica 1 cal/g °C, además de que el reactor tiene una eficiencia en la transferencia de calor de 65%.

Aquí se pide determinar la cantidad de agua que se debe alimentar por minuto; recuérdese que el dato del calor cedido es por hora, por lo que tendremos que convertir el calor cedido por hora a calor cedido por minuto de la siguiente manera:

$$Q_{\text{cedido}} = \frac{\text{kcal}}{\text{h}}\left|\frac{1\text{ h}}{60\text{ min}}\right| = \frac{\text{cal}}{\text{min}}$$

Ahora se debe escribir el balance de calor completo para poder despejar la masa del balance de calor y, así, el problema estará terminado.

3. Anotar todos los datos del problema en un listado:

   Calor cedido por el reactor = 4 500 kcal/h

   Temperatura de H_2O fría (entrada del intercambiador) $T_i = 20$ °C

   Temperatura de H_2O caliente (salida del intercambiador) $T_f = 150$ °C

   Masa de H_2O alimentada al intercambiador = ?

   Calor latente de vaporización del agua (λ) = 540 cal/g

   Capacidad calorífica del agua sobrecalentada a 120 °C (C_p) = 1,02006 cal/g K

   Capacidad calorífica del agua sobrecalentada a 150 °C = 1,0285 cal/g K

   Eficiencia de trasferencia de calor = 65 %

   Temperatura de ebullición de agua $T_{eb} = 100$ °C

4. Elaborar el balance de calor para designar quién cede y quién absorbe el calor:

$$Q_{\text{cedido}} = Q_{\text{absorbido}}$$

$$Q_{\text{reactor}} = Q_{H_2O\ \text{fría}} + Q_{\text{latente del } H_2O} + Q_{H_2O\ \text{sobrecalentada}}$$

$$Q_{\text{reactor}} = m_{H_2O} Cp_{H_2O}(T_{eb} - Ti) + m_{H_2O}\lambda + m_{H_2O\ \text{sobrecalentada}} C_{pvapor}(Tf - T_{eb})$$

5. Realizar las conversiones pertinentes y los despejes correspondientes:

$$Q_{\text{cedido}} = \frac{4\,500\ \text{kcal}}{\text{h}} \left| \frac{1\ \text{h}}{60\ \text{min}} \right| \frac{1\,000\ \text{cal}}{1\ \text{kcal}} = 75\,000 \frac{\text{kcal}}{\text{min}}$$

   Para tal efecto, primero se deberá factorizar la masa de agua para poder despejarla:

$$Q_{\text{reactor}} = m_{H_2O}(C_{pH_2O}(T_{eb} - T_i) + \lambda + C_{pvapor}(T_f - T_{eb})$$

   Despejando la masa de agua (recuérdese que la masa de agua y la masa de agua sobrecalentada es la misma y que el calor del reactor se considera positivo, ya que se está hablando del calor absorbido por el agua):

$$m_{H_2O} = Q_{\text{reactor}}/[C_{pH_2O}(T_{eb} - T_i) + \lambda + C_{pvapor}(T_f - T_{eb})]$$

6. Resolver las preguntas del problema:

   Determinar:

➥ La cantidad de agua que se debe alimentar al intercambiador de calor por minuto para lograr la regulación de la temperatura.

$$m_{H_2O} = (75\,000\ \text{cal/min})/[(1\ \text{cal/g °C})(100\ \text{°C} - 20\ \text{°C}) + (540\ \text{cal/g}) + (1\ \text{cal/g °C})(150\ \text{°C} - 100\text{°C})]$$

$$m_{H_2O} = 111{,}94\ \text{g/min}$$

Como se puede observar, el problema está completamente resuelto.

5.21 Problemas

1. Una libra de vapor de agua se somete a los siguientes procesos continuos:

a) El vapor inicialmente a 400 psia y 800 °F se expande isotérmicamente hasta una presión de 80 psia.

b) Después, el vapor se enfría isométricamente hasta 50 psia.

c) Por último, se comprime a presión constante hasta un volumen de 8,64 ft^3.

Determine:

1. Todas las variables de estado.
2. Elabore el diagrama *P vs*. *V* correspondiente.

2. Una cantidad de 30 moles de un gas ideal que se encuentra a condiciones normales de presión y temperatura se somete a una serie de procesos representados en el siguiente diagrama:

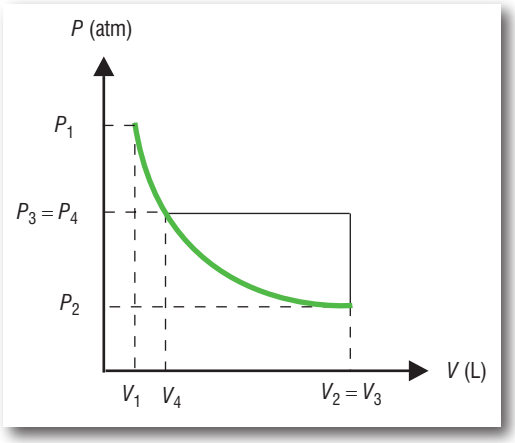


Figura 5.22

Escriba el nombre de cada uno de los procesos:

a) $V_2 = ?$ si $P_2 = 0{,}6$ atm.

b) $P_3 = ?$ si $T_3 = 364$ K.

c) $V_4 = ?$

3. Suponga que 4 000 m^3 de metano (CH_4) medidos en condiciones de estado se someten como parte de una serie de procesos consecutivos, siendo las condiciones de 30 atm y 70 °C.

a) Calentamiento isobárico hasta 200 °C.

b) Enfriamiento isométrico hasta una presión de 3 atm.

c) Compresión isotérmica hasta obtener el volumen original.

Determine:

1. La masa de metano en el proceso.
2. El volumen inicial.

3. El volumen final del proceso isobárico.
4. La temperatura final del proceso isométrico.
5. La presión final del proceso isotérmico.
6. Elabore el diagrama *P vs. V* real.

4. 1.5 mol de gas ideal con 585 mmHg de presión y 25 °C de temperatura iniciales se someten a una serie de procesos continuos.

a) Calentamiento isométrico hasta una presión de 2,539 atm.

b) Expansión a temperatura constante hasta llegar a la presión original.

c) Se comprime isobáricamente hasta llegar al volumen original, completándose así un ciclo.

Determine:

1. El diagrama del proceso *P vs*. *V*.
2. El volumen inicial.
3. La temperatura final del proceso isométrico.
4. El volumen final del proceso isotérmico.
5. Temperatura final del proceso isobárico.

5. Se tienen 15 m^3 de benceno (C_6H_6) a 0 °C y 1 atm de presión, sometiéndose a los siguientes procesos continuos.

a) A partir del estado inicial se calienta con una relación V/T = cte, hasta alcanzar una temperatura de 120 °F.

b) Posteriormente, se comprime con una relación PV = cte, hasta la presión de 3 atm.

c) Finalmente, se enfría con una relación P/T = cte hasta alcanzar una temperatura de 273 K.

Determine:

1. Todas las variables de estado.
2. La descripción y nombre de cada proceso.
3. Elabore el diagrama *P vs. V* real.

6. Se desea comprimir 10 lb de dióxido de carbono (CO_2) a un volumen de 35 ft^3. Considere comportamiento ideal, determine la presión en atmósferas a que es necesario someterlo si la temperatura es de 35 °C.

7. Se tienen 10 m^3 de N_2 a condiciones normales de presión y temperatura; a partir de este estado inicial se somete a los siguientes procesos consecutivos:

a) El gas se calienta isobáricamente hasta alcanzar una temperatura de 300 K.

b) Después se comprime isotérmicamente hasta alcanzar una presión de 45 lb/in^2.

c) Finalmente se enfría el gas isométricamente hasta alcanzar la temperatura inicial.

Determine:

1. Todas las variables de estado que faltan en cada proceso.
2. La masa de N_2.

8. En un contenedor se encuentra un gas a 30 °C, 3 atm y un volumen de 20 L. Se enfría isométricamente hasta llegar a 200 K y finalmente se expande isobáricamente con un volumen de 27 L. Determine la presión en el proceso isométrico, la temperatura en el proceso isobárico y demás variables que hagan falta.

9. Cada hora entran a un compresor 87 m^3 de O_2 a 298 K y 1 atm, se comprime a 360 K y 10 atm.

Determine:

1. El flujo de alimentación medido a C.N.P.T.
2. El flujo volumétrico de O_2 comprimido.
3. Suponiendo que la compresión es isotérmica, ¿cuál es el flujo de O_2 comprimido?

10. Un recipiente contiene 20 m^3 de amoniaco (NH_3) a 5 °C y 912 mmHg de presión, sometiéndose a los siguientes procesos consecutivos.

a) A partir del estado inicial se calienta con la relación $PV^n = \text{cte}$, hasta alcanzar una temperatura de 140 °F.

b) Posteriormente se comprime con una relación $PV = \text{cte}$, hasta la presión de 44 psia.

c) Finalmente se enfría con una relación $P \alpha T$. hasta llegar a la temperatura inicial.

Determine:

1. La masa de NH_3 en cada proceso en lb.
2. Todas las variables de estado.
3. Nombre de cada proceso y la ley a la que corresponde.
4. Diagrama de procesos.
5. Diagrama *P vs*. *V* real.

11. En un proceso de destilación se obtiene una corriente de alcohol metílico (CH_3OH) con un flujo de 60 kg/h y se almacena la producción en tanques de 2000 L a 85 °C cada hora de proceso; el tanque se calienta hasta 60 °C por efectos de un mal almacenaje. Se propone, para evitar accidentes, que se enfríe a –32 °C y esto provoca un congelamiento y la descomposición del alcohol, provocando pérdidas a la empresa.

a) El gerente de producción desea saber si los tanques podrán soportar la presión de calentamiento si la norma indica que la presión máxima que soportan los tanques es de 450 psia.

b) ¿Cuánto tiempo podrán soportar los tanques de almacenamiento antes de explotar si cada minuto se eleva la temperatura 3 °C?

c) ¿Qué presión debe tener el sistema para evitar el congelamiento si se sabe que el alcohol debe ser envasado a 25 °C para evitar perder sus propiedades?

12. En la Ciudad de México se tienen 45 moles de CO_2 en un recipiente a condiciones estándar de presión y temperatura y se somete a una serie de procesos representados en el diagrama de la figura 5.23.

Determine:

1. Masa de CO_2 expresada en lb.
2. Todas las variables de estado.
3. Nombre de cada proceso (diagrama de proceso) y de qué ley provienen hasta completar el ciclo.

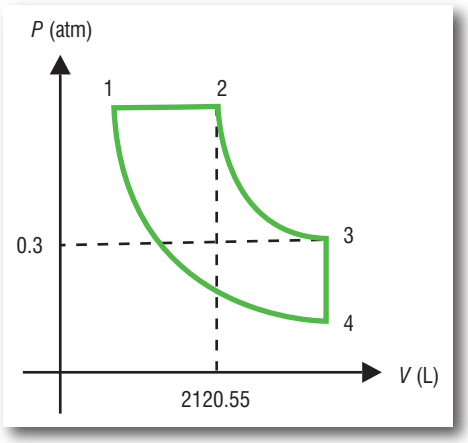


Figura 5.23

13. Un cilindro con émbolo tiene un volumen de 2 ft^3 y contiene vapor a 60 lb/in^2 y 300 °F. Se transfiere calor al vapor hasta que la temperatura aumente a 500 °F, siendo la relación $PV^{\gamma} = cte$. Determine los valores de Q, W, ΔE, ΔH, se sabe que el vapor trabaja con $\gamma = 1{,}35$.

14. Un mol de vapor se somete a los siguientes procesos reversibles:

a) El vapor a una presión de 400 lb/in^2 y 800 °F se expande isotérmicamente hasta una presión de 80 lb/in^2.

b) Posteriormente se enfría a un volumen constante hasta que la presión es de 50 lb/in^2.

c) A continuación se enfría a presión constante a un volumen de 8,646 ft^3, se comprime adiabáticamente hasta 400 lb/in^2 y por último se calienta a presión constante hasta llegar a su temperatura inicial.

Determine:

1. Q
2. W
3. ΔE
4. ΔH para cada etapa y totales

15. Cuatro gramos de helio ocupan un volumen de 5 L a 12,4 kg/cm^2. Por medio de un proceso isométrico, baja su presión a 9,3 kg/cm^2 y se enfría a una temperatura T_2. Posteriormente, mediante un proceso a presión constante, se expande hasta ocupar un volumen dos veces el valor del volumen inicial y su temperatura es de 824 °C. Luego, a través de un proceso adiabático, se enfría hasta alcanzar la temperatura T_2, ocupando un volumen de 28,5 L. Finalmente, mediante un proceso a temperatura constante, alcanza nuevamente su volumen inicial a 9,3 kg/cm^2.

a) Elabore un diagrama *P vs*. *V* que ilustre el proceso completo.

b) Determine los valores de *Q* y *W* para cada proceso y para todo el ciclo (dar resultados en joules).

16. Un mol de un cierto gas se expande irreversiblemente y adiabáticamente hasta duplicar su volumen. En la expansión su temperatura cambia de 298 K a 248 K. Suponiendo comportamiento de gas ideal, determine los valores de las capacidades caloríficas molares a presión y volumen constantes.

17. Un mol de un gas monoatómico se somete al ciclo reversible descrito en la figura 5.24. A partir de los datos, determine los valores de calor, trabajo, energía y entalpía.

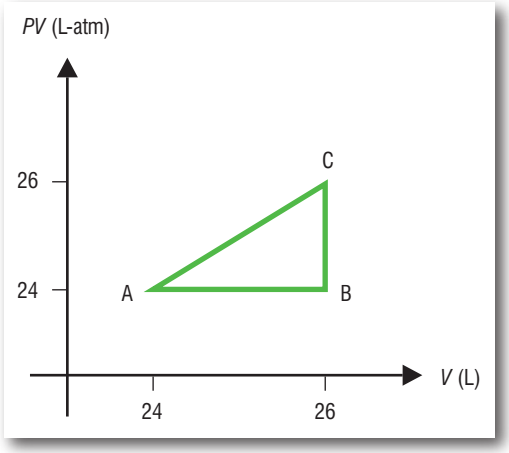


Figura 5.24

18. Cierta cantidad de un gas diatómico se somete a una serie de procesos reversibles que conforman un ciclo. El gas que se encuentra inicialmente a 0,95 atm, 20 °C y 5 L experimenta un cambio adiabático durante el cual se calcula que $\Delta E = 267{,}5$ cal. Posteriormente, se calienta hasta un volumen de 1,934 L mediante un proceso que cumple la relación $V/T =$ cte. A continuación experimenta un cambio en el que $Q = 0$ y $\Delta E = -305{,}65$ cal y finalmente regresa a su estado inicial mediante un proceso en el que teóricamente se establece que $W = 0$. Determine todas las variables de estado (P, V, T) así como los valores de ΔE, ΔH, Q y W parciales y totales.

19. Se comprimen 10 m^3/min de aire desde 1 atm y 24 °C hasta 2 atm. Determine los valores de Q, W, ΔE y ΔH para cada uno de los siguientes cambios:

1. Proceso adiabático reversible.
2. Proceso adiabático irreversible.

20. 10 L de aire ($\gamma = 1{,}4$), inicialmente a 327 °C y 8 atm se someten a una expansión isotérmica, con lo que su volumen aumenta cinco veces. Posteriormente, mediante un proceso adiabático, el gas se expande otra vez hasta alcanzar una temperatura de 300 K. De aquí, por medio de otro proceso isotérmico, el gas se comprime y finalmente por medio de otra compresión adiabática, alcanza las condiciones iniciales.

1. Represente el ciclo termodinámico reversible usando las variables de P y V.
2. Determine los valores de P, V, T, Q, W, ΔE y ΔH en cada proceso.
3. Determine el valor de W total para el ciclo, en calorías y en joules.

21. Se tienen 1,62 mol de un gas a 600 K y 8 atm, los cuales se someten a una expansión hasta un volumen de 50 L, realizando para esto un trabajo de 3 108,41 cal. Mediante un proceso diferente y siguiendo una relación $PV^{\gamma} =$ cte, se realiza una expansión hasta alcanzar a una temperatura de 300 K y el trabajo que se realiza tiene un valor de 2 430 cal; acto seguido se comprime de manera isoentálpica, realizando un trabajo de –1 560 cal, para luego volverse a comprimir hasta que el trabajo sea igual a ΔE y que $\Delta H = -2\,430$ cal considere que $\gamma = 1{,}4$.

Determine:

1. El valor de todas las variables de estado faltantes.
2. El calor, la entalpía, la energía y los trabajos totales y parciales. Explique si se trata de un ciclo o no.

22. Un mol de un gas ideal cuya $C_v = 5{,}0$ cal/mol K y que está inicialmente a CNPT, efectúa el siguiente ciclo reversible:

Proceso A:

Del estado 1 al estado 2 se calienta a volumen constante hasta el doble de su temperatura inicial.

Proceso B:

Del estado 2 al estado 3 se expande adiabáticamente hasta regresar a su temperatura inicial.

Proceso C:

Del estado 3 se comprime isotérmicamente hasta regresar al estado 1.

Determine los valores de calor, trabajo, energía y entalpía para cada proceso y para cada ciclo completo.

23. Se tienen 2 400 g de aire precalentado, los cuales se someten a un ciclo ideal reversible bajo las siguientes condiciones:

a) El inicio del ciclo es con un proceso de compresión que obedece al comportamiento $PV^{\gamma} = \text{cte}$, donde $V_1/V_2 = 17$.

b) La temperatura es de 40 °C y la presión de 1 atm. Aprovechando la combustión, se calienta el gas y la relación de volumen provocado por el gas es $V_3/V_2 = 2$, siguiendo una relación $V/T = \text{cte}$. A continuación se lleva a cabo una expansión en ausencia de calor hasta la temperatura de 826 K. De esas condiciones, sigue un enfriamiento hasta una presión de 1 atm y una temperatura de 40 °C. Considere $\gamma = 1{,}4$.

Determine:

1. Todas las variables de estado.
2. El calor, la entalpía, el trabajo y la energía interna para cada proceso y para todo el ciclo.
3. Elabore el diagrama *P vs*. *V* real.

24. Un compresor maneja 1 mol de H_2 que ocupan 1 000 ft^3/min y lo comprime hasta que la temperatura cambia de un valor inicial de 20 °C hasta un valor final de –50 °C, si el valor de $C_v = 5/2\ R$ y el proceso es adiabático irreversible.

Determine:

a) Los valores de calor, trabajo, energía y entalpía.

b) La presión final del proceso.

25. Un mol de aire que inicialmente se encuentra a una temperatura de 120 °C y a una presión de 8 atm se somete al siguiente proceso reversible: se expande isotérmicamente hasta una presión tal que, cuando es enfriado a volumen constante a 20 °C , la presión final es de 3 atm. Considere el aire como gas ideal cuyo $C_p = 7/2\ R$.

Determine los valores de calor, trabajo, energía y entalpía.

26. Un tanque rígido y no conductor tiene un volumen de 120 ft^3, éste se divide en dos partes iguales por medio de una membrana delgada. A uno de los lados de la membrana, el tanque contiene hidrógeno gaseoso a una presión absoluta de 60 lb/in^2 y a una temperatura de 100 °F. El otro lado está a un vacío perfecto; inesperadamente, la membrana se rompe y el gas llena el tanque.

Determine:

a) La temperatura final del gas.

b) La cantidad de trabajo efectuado ($C_v = 5$ cal/mol K).

27. Para el siguiente ciclo de Carnot, se considera un mol de gas ideal cuyo $C_v = 6$ cal/mol K.

Determine:

a) Las condiciones *P*, *V*, *T* en cada estado termodinámico.

b) Los valores de calor, trabajo, energía y entalpía de cada proceso y para todo el ciclo.

c) Defina qué es el calor, trabajo, energía y entalpía.

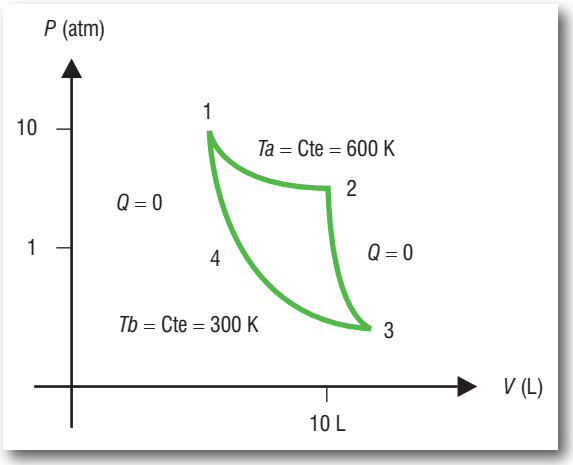


Figura 5.25

28. 600 g de gas hidrógeno se someten a los siguientes procesos reversibles:

a) A partir de las condiciones estándar de presión y temperatura se expande isobáricamente hasta que se triplica el volumen inicial.

b) Después se somete a un proceso PV = constante hasta que se triplica la presión inicial.

c) A continuación a un proceso donde el volumen es constante hasta que la presión es la mitad de la presión anterior.

d) Finalmente ocurre un proceso donde PV^{γ} = constante, hasta la temperatura 2.

Si el $C_p = 6{,}9$ cal/mol K, determine los valores de calor, trabajo, energía y entalpía para cada proceso e indique si se trata de un ciclo o no elaborando el diagrama *P vs*. *V* correspondiente.

29. 10 moles de un gas perfecto con $C_v = 1{,}5$, *R* sufre un proceso cíclico reversible 1-2-3-4-1 que se muestra en la siguiente figura, donde *P* o *V* se mantienen constantes en cada una de las etapas. Determine los valores de energía, calor, trabajo y entalpía para cada etapa y para el ciclo completo, exprese sus resultados en joules.

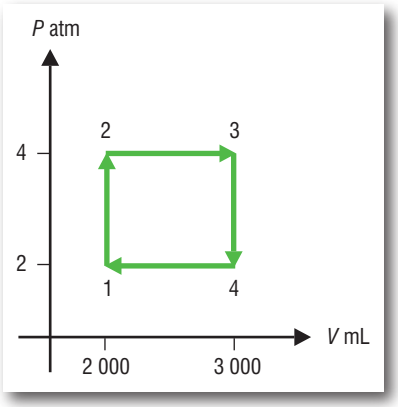


Figura 5.26

30. Un mol de un gas monoatómico realiza el siguiente ciclo reversible:

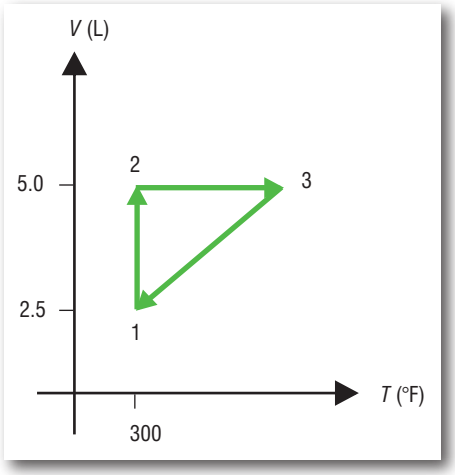


Figura 5.27

Determine para cada etapa y para el ciclo completo los valores de energía, trabajo, calor y entalpía.

31. 250 cal de calor elevarán la temperatura de 50 g de hierro hasta 46,7 °C, ¿cuál es el calor específico del hierro?

32. El calor específico del agua es 1 cal/g °C, ¿cuántas calorías se necesitan para elevar la temperatura de 20 g de agua en 15 °C?

33. ¿Cuántas calorías se requieren para elevar la temperatura de 1 lb de agua desde 0 °C hasta el punto de ebullición en la ciudad de México?

34. ¿A qué principio de calorimetría se asigna el siguiente experimento?

a) Si se mezcla 1 litro de agua a 80 °C con un litro de agua a 20 °C se obtienen 2 litros de agua a 50 °C.

b) Si una moneda de cobre con 20 °C, se calienta hasta 60 °C, adquiere una cantidad de calor y si se deja enfriar hasta 20 °C, perderá la misma cantidad de calor que había absorbido.

Explique su respuesta.

35. La siguiente gráfica corresponde al calentamiento de una sustancia.

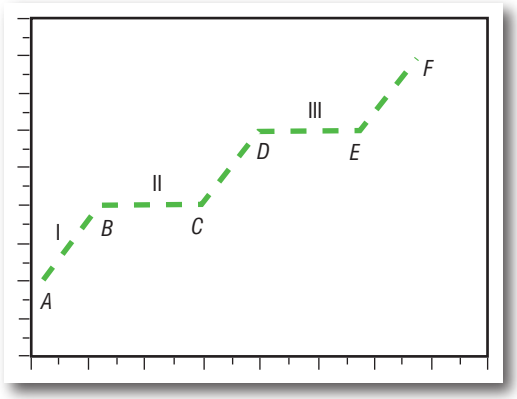


Figura 5.28

¿Qué estados de agregación representan las líneas: a) AB, b) BC, c) CD, d) DE, e) EF?

36. Un intercambiador de calor usa vapor que sale de una turbina para calentar aire en una planta de proceso. El vapor entra al intercambiador con un gasto másico de 1,2 kg/s, una presión de 22 KPa y sale a una temperatura de 200 °C. El vapor sale del intercambiador con un vapor saturado de 200 KPa. El aire entra al intercambiador a 20 °C y 101 KPa. El gasto másico del aire es de 3 kg/s. Suponiendo que la superficie exterior del intercambiador está perfectamente aislado, determine la temperatura del aire conforme abandona el intercambiador. Realice el diagrama del proceso. Datos $\Delta H_{vap} = 164$ kJ/kg.

37. En una parte de un ciclo que se efectúa en una planta de vapor, éste se condensa a baja presión para posteriormente bombearse hacia la caldera, utilizando en el condensador agua de enfriamiento. Si el vapor de baja presión tiene una entalpía (H) de 580 kcal/kg y el condensado una de 43,3 kcal/kg vapor, determine la masa de agua de enfriamiento requerida por cada kg de vapor que se condensa. Considere $C_p = 1$ cal/g °C para el agua líquida.

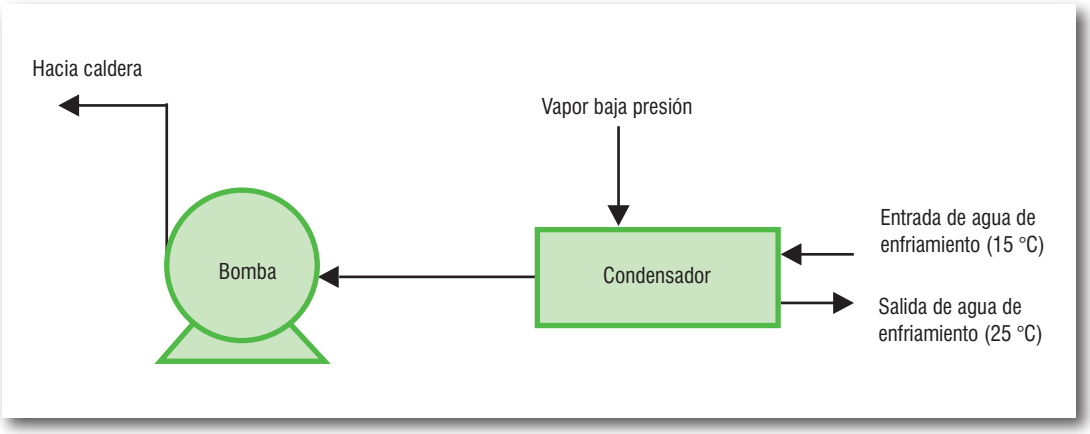


Figura 5.29

38. ¿Qué cantidad de solución de salmuera se necesita para enfriar 1500 L/h de anilina en un intercambiador de calor, si ésta entra a 150 °F y sale a 77 °F. La salmuera entra a 38 °F y sale a 77 °F. Exprese sus resultados en kg/min y en L/min.

Datos:

C_p de la salmuera	0,82 cal/g °C	Densidad 1,15 g/mL
C_p de la anilina	0,48 cal/g °C	Densidad 1,20 g/mL

39. El quemador de una caldera consume 1 m^3/min de metano medido en condiciones normales de presión y temperatura, para evaporar agua, siendo la capacidad calorífica del gas de -212,8 kcal/mol. Determine la masa evaporada de agua, si se calienta de 20 a 100 °C y luego se evapora. Considere que el C_p del agua es de 1 cal/g °C y que el calor latente de vaporización es de 8,8 kcal/mol.

40. En un reactor químico se desprenden 2500 kJ, determine qué cantidad de agua se debe suministrar al enchaquetado del reactor para que cambie su temperatura de 25 °C a 120 °C. Considere que el calor latente de vaporización del agua es 540 cal/g y su capacidad calorífica es de 1 cal/g °C.

5.22 Tema de actualidad

Autos híbridos

Figura 5.30

Se denomina **vehículo o automóvil eléctrico híbrido** a un vehículo en el cual la energía eléctrica que lo impulsa proviene de baterías y, alternativamente, de un motor de combustión interna que mueve un generador. Normalmente, el motor también puede impulsar las ruedas en forma directa.

En el diseño de un automóvil híbrido, el motor térmico es la fuente de energía que se utiliza como última opción, y se dispone de un sistema electrónico para determinar qué motor usar y cuándo hacerlo.

En el caso de híbridos gasolina-eléctricos, cuando el motor de combustión interna funciona, lo hace con su máxima eficiencia. Si se genera más energía de la necesaria, el motor eléctrico se usa como generador y carga la batería del sistema. En otras situaciones, funciona sólo el motor eléctrico, alimentándose de la energía guardada en la batería.

En algunos motores de este tipo es posible recuperar la energía cinética al frenar, convirtiéndola en energía eléctrica.

La combinación de un motor de combustión operando siempre a su máxima eficiencia y la recuperación de energía del frenado (especialmente útil en la ciudad), hace que estos vehículos alcancen mejores rendimientos que los vehículos convencionales.

Todos los coches eléctricos utilizan baterías cargadas por una fuente externa, lo cual les ocasiona problemas de autonomía de funcionamiento sin recargarlas. Esta queja habitual se evita con los coches híbridos.

Desempeño de los automóviles híbridos

La clave de un automóvil híbrido es que el motor de combustible puede ser mucho más pequeño que el de un auto convencional y, por tanto, más eficiente. La mayoría de los autos requiere un motor relativamente grande para producir suficiente potencia y acelerar rápidamente. En un motor pequeño, sin embargo, la eficiencia puede ser mejorada utilizando partes más pequeñas y livianas, reduciendo el número de cilindros y operando el motor cerca de su máxima potencia. Hay varias razones por las cuales los motores pequeños son más eficientes que los grandes:

- Los motores grandes tienden a ser más pesados que los pequeños, haciendo que el automóvil utilice energía adicional cada vez que acelera o se desplaza en subida.

- Los pistones y otros componentes internos son más pesados, requiriendo más energía cada vez que se mueven en el motor.
- El desplazamiento de los cilindros es más largo, con lo cual se requiere más combustible para moverlos.
- Los motores grandes cuentan con más cilindros en general, y cada cilindro utiliza más combustible en cada explosión, aun cuando el auto no se desplaza.

El motor a combustible es dimensionado al máximo de su requerimiento en potencia y en general la mayoría de los conductores (no los de carrera) utilizan el motor en su máxima potencia menos del 1% del tiempo. Los autos híbridos utilizan motores pequeños, dimensionados al promedio de potencia utilizada en vez de la potencia máxima.

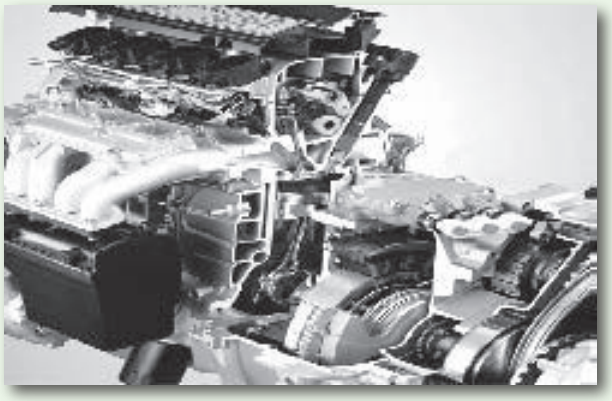


Figura 5.31

Fuentes:

http://images.google.com.mx/imgres?imgurl=http://www.mundoautomotor.com.ar/web/wp-content/uploads/2007/11/motor_hibrido-honda_civic02.jpg&imgrefurl=http://www.mundoautomotor.com.ar/web/2007/11/28/autos-hibridos-definicion/&h=492&w=490&sz=296&hl=es&start=1&usg=__Bp7xSK2VRskSurTEnp_RXNKbdrY=&tbnid=u74wBtPP6eiwnM:&tbnh=130&tbnw=129&prev=/images%3Fq%3Dcomo%2Bfuncinan%2Bmotores%2Bhidrido%2B2008%26gbv%3D2%26hl%3Des%26sa%3DG

Figura 5.32

El nuevo Chevrolet Malibú estrenará una versión híbrida que se pondrá a la venta en octubre de 2008. **General Motors** presentó ayer mismo este modelo en el que se ha buscado la máxima eficiencia en cuanto a gasto de combustible.

La propulsión de esta berlina corre a cargo de dos motores diferentes: **eléctrico de 36 voltios y gasolina 2,4 L Ecotec VVT de 167 Cv**. La potencia llega al eje delantero a través de la **transmisión Hydra-Matic 4T45** enlazada a una caja de cambios **automática de cuatro velocidades** con convertidor automático de par en el embrague.

Además de la incorporación del motor eléctrico, la reducción de gasto de combustible se ha realizado a través de diferentes métodos. **El motor se para cuando el vehículo está estacionado** y arranca de nuevo cuando se presiona el pedal del freno. Además, durante la deceleración del vehículo se realiza el corte de la inyección y se **recarga la energía a través de los frenos**.

La **batería** del Malibú híbrido está formada por **níquel metal** y es capaz de soportar un recargado más dinámico y eficiente.

El consumo se reduce en torno a los **9,8 l/100 km en ciudad y a los 7,35 l/100 km en carretera**, unos 0,5 L menos aproximadamente con respecto a la versión de serie de la berlina.

La garantía presentada por General Motors cubre durante 5 años o 160 000 km los motores y durante ocho años o 160 000 km la batería.

http://images.google.com.mx/imgres

5.23 Bibliografía

Chang, Raymond, *Fisicoquímica*, 9ª. ed., McGraw-Hill Interamericana, México, 2008.

Choppin, Gregory R., *Química*, Grupo Editorial Patria, México, 2008.

Farrington, Daniels A., *Fisicoquímica*, CECSA, 1985.

Fogler, Scott H., *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas*, 4ª. ed., Prentice Hall, México, 2008.

Hein, Morris, *Química General*, Cengage Learning, 2008.

I.N. Levine, *Fisicoquímica,* 2 Volúmenes, 5ª. ed., McGraw-Hill, 2004.

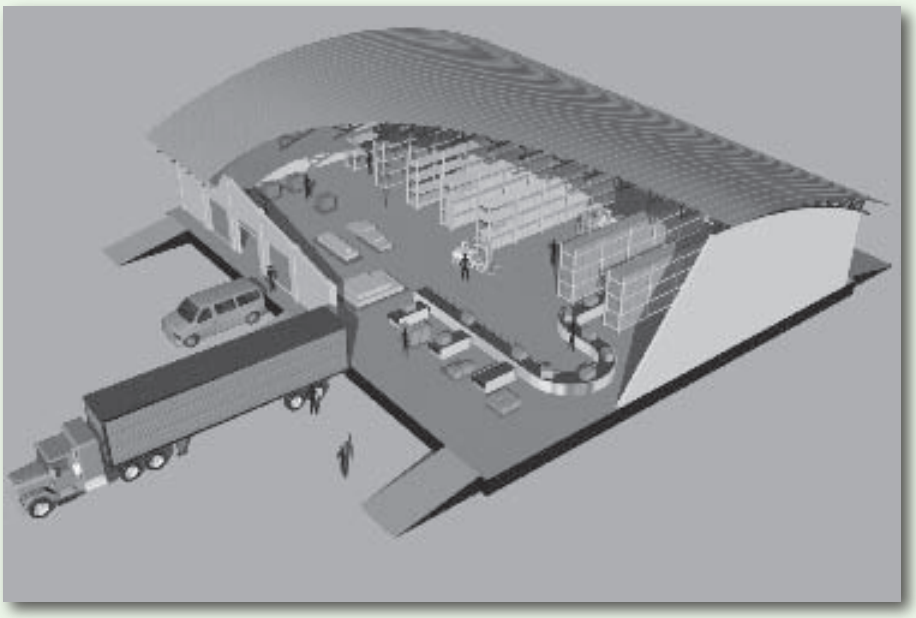
Laidler, Keith J., *Fisicoquímica*, Grupo Editorial Patria, 2007.

Timberlake, Karen C., *Química*, Prentice Hall, México, 2008.

Capítulo

6

Operaciones unitarias (primera parte). Transporte y almacenamiento de materiales



Medios y vías de transporte en una planta industrial.

6.1 Introducción

La industria comprende múltiples actividades propias de cada rama particular y debe entenderse como un sistema complejo de procesos que al operar utiliza innumerables materias primas y genera, en consecuencia, gran variedad de residuos.

Cualquier proceso de transformación, separación o purificación puede ser dividido en lo que la ingeniería denomina operaciones y procesos unitarios; muchos de éstos han sido

estudiados de manera extensa y están definidos y descritos con claridad en la literatura técnica. Tales operaciones y procesos unitarios se insertan en diferentes procesos industriales manteniendo sus principios básicos, aunque su dinámica y la corriente de materiales varíen en cada proceso. La caracterización de los procesos y operaciones unitarias permite entender, entre otras cosas, la lógica de la generación de residuos de manera integrada a los procesos industriales.

Ambas técnicas, tanto las operaciones como los procesos industriales, se abordan en cuanto a sus principios, aplicaciones y principales fundamentos en este capítulo y en el capítulo 7.

En los diferentes ***procesos de producción***, se presenta la necesidad de mezclar sustancias, de separar los componentes de una mezcla y de compactar o fraccionar sólidos.

Dentro del amplio campo de las separaciones hay dos grandes ***grupos***: a) el de las separaciones disfuncionales que son realizadas con cambios de fases y ***transporte de materia*** de una fase a otra y b) los ***métodos*** correspondientes a las separaciones mecánicas, que comprenden **filtración**, **sedimentación**, **centrifugación** y **tamizado**, entre otras.

Las separaciones mecánicas son aplicables a las mezclas heterogéneas pero no a las homogéneas y la forma de separación depende de la naturaleza de la partícula que vaya a ser separada así como de las fuerzas que actúan sobre ella para separarlas. Las características de las partículas más importantes que se deben tener en cuenta son el tamaño, la forma y la densidad y, en el caso de fluidos, la viscosidad y la densidad, que intervienen en las separaciones de sólidos de ***gases***, gotas de líquidos de gases, sólidos de sólidos y sólidos de líquidos. El comportamiento de los diferentes componentes ante las fuerzas establece el movimiento relativo entre el fluido y las partículas, y entre las partículas de diferente naturaleza. Debido a estos movimientos relativos, las partículas y el fluido se acumulan en distintas regiones y pueden separarse y recogerse, por ejemplo en la torta y en el tanque de filtrado de un filtro prensa, que son de los dispositivos empleados para la separación de mezclas.

Uno de estos grupos es el de las separaciones mecánicas que comprenden la filtración, la sedimentación y el tamizado (análisis granulométrico), estas separaciones son aplicables a mezclas heterogéneas y se basan en las diferencias físicas de las partículas.

6.2 Clasificación de las operaciones unitarias

Entre las operaciones unitarias más representativas se tienen a las siguientes:

- Transporte de materiales.
- Almacenamiento.
- Formación de mezclas.
- Separación de mezclas (homogéneas y heterogéneas).
- Manejo de sólidos.
- Intercambio de calor.

En la industria, la operación física necesaria para trasladar materiales de toda clase (materias primas, productos intermedios o productos terminados) dentro, desde o hacia la industria, se conoce con el nombre de operación unitaria de transporte. Las vías de transporte en la industria son las calles de las fábricas, las vías de ferrocarril, los tranvías aéreos, las tuberías y más.

Los medios de transporte son todos aquellos vehículos como camiones, vagones de ferrocarril, vagones cisternas, elevadores, bombas, botellas y válvulas para tuberías, entre otros.

Ejemplo 1

En una tubería se transporta 50 libras de agua a razón de 10 pies/s, ¿cuál será la energía cinética involucrada en el transporte de esa masa de agua?

Solución:

Se sabe que la energía cinética está definida como $E_C = \frac{1}{2} mv^2$, así realizando las operaciones correspondientes se tiene:

$$E_C = \frac{1}{2} \times 50\ lb_m \times \left(\frac{10\ ft}{s}\right)^2 \times \frac{1}{32{,}174\ \frac{ft\ lb_m}{s^2\ lb_f}}$$

$$= 77{,}70\ \text{ft lb}_f$$

Ejemplo 2

Se tiene un costal de cemento de 85 lb suspendido a 10 pies sobre la superficie de un almacén ¿cuánta energía potencial en $\text{lb}_{\text{fuerza}}$ posee este costal de cemento?

Solución:

De la expresión de energía potencial se sabe que $E_p = mgh$ con $g = 32{,}2\ \text{ft/s}^2$,

por tanto:

$$E_C = 85\ lb_{masa} \times 32{,}2\ \frac{ft}{s^2} \times 10\ ft \times \frac{1}{32{,}174\ \frac{ft\ lb_{masa}}{lb_{fuerza}\ s^2}}$$

$$= 850\ ft\ lb_{fuerza}.$$

Así, el transporte de materiales en cualquier estado de agregación de la materia se define como el principio que determina el movimiento, traslado o flujo de cualquier sólido o fluido (líquido o gas) desde un punto a otro.

6.2.1 Transporte de gases

Los fluidos industriales, gases y líquidos, son transportados y almacenados en envases y tuberías sujetos a presión en contenedores construidos principalmente de aleaciones metálicas, los gases se transportan a través de conducciones fijas que forman un circuito de fluidos constituido de elementos funcionales (bombas o compresoras, válvulas, cambiadores de calor, filtros, entre otros elementos).

Por lo general, los contenedores y tuberías empleados son pintados con colores que corresponden a un código preestablecido. En la tabla 6.1 se presenta dicho código de colores.

Desde el punto de vista de sus características físicas y de envasado, los gases se dividen en: comprimidos, licuados, disueltos y criogénicos.

Los gases comprimidos permanecen en estado gaseoso dentro del envase, a diferencia de los gases licuados que dentro del recipiente están en forma de mezcla líquido-gas. Las sustancias gaseosas que son muy inflamables, como el acetileno, se envasan en cilindros

Tabla 6.1. Colores usados para el transporte de sustancias industriales.

Propiedad del fluido	Sustancia	Colores utilizados
Inflamable y combustible	Acetileno	café, rojo
	Etano	blanco, rojo
	Etileno	azul, rojo
	Hidrógeno	rojo, rojo
	Metano	gris, rojo
	Aceite	anaranjado, anaranjado
	Gasolina	anaranjado, rojo, anaranjado
	Gas	anaranjado, amarillo, anaranjado
Oxidantes e inerte	Anhídrido carbónico	gris, negro
	Argón	amarillo, negro
	Helio	café, negro
	Nitrógeno	negro, negro
	Oxígeno	blanco, negro
Tóxicos y venenosos	Amoníaco	verde, verde
	Anhídrido sulfuroso	amarillo, verde
	Monóxido de carbono	rojo, verde
	Óxido de etileno	azul, verde
Corrosivos	Cloro	blanco, amarillo
	Ácido clorhídrico	café, amarillo
	Flúor	verde, amarillo
	Fosgeno	verde, blanco, amarillo
Mezclas industriales	Oxígeno/anhídrido carbónico	blanco, gris
	Argón/metano	gris, amarillo
	Helio/argón	café, amarillo
	Freón/óxido de etileno	gris, azul
	Argón/hidrógeno	rojo, amarillo

que en su interior contienen un material sólido de alta porosidad, en forma de panal, con miles de pequeñas cantidades que contienen acetona líquida. Al ingresar el gas, éste se disuelve en acetona, con lo cual desaparece el riesgo de explosión, pudiendo ser transportado y almacenado con seguridad.

Los gases criogénicos se encuentran a temperaturas inferiores a –100 °C y se transportan y almacenan en contenedores térmicamente aislados.

Entre las formas para el transporte de gases por tierra se encuentran los camiones con diversas capacidades, los trenes con contenidos variados por vagón, la distribución de gases en redes domiciliarias, los gasoductos para gas natural utilizado como combustible y para la calefacción doméstica, y la distribución de diferentes gases como oxígeno y óxido nitroso dentro de cilindros (véase figura 6.1).

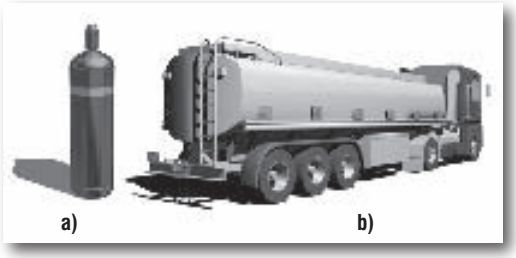


Figura 6.1 *Contenedores de sustancias gaseosas: a) cilindro de gas; b) camión con recipiente contenedor de gas.*

También es posible transportar los gases por medio de tuberías y bombas, por ejemplo el transporte del gas doméstico.

La mayor parte de las sustancias se transportan por tuberías, en especial los líquidos y los gases, pero si los sólidos están en forma de granos o de polvos se les puede transportar por tuberías empleando la inyección neumática.

6.2.2 Transporte por tuberías

En la industria química se pueden enviar diferentes líquidos por la misma tubería haciéndolos circular uno tras otro y sin que se mezclen, por medio de un compresor. Técnicas como las que se utilizan para medir densidad del producto hacen posible que el receptor ubicado en un lugar determinado conozca la longitud exacta de los tramos de líquido que llegan uno tras otro (véase figura 6.2).

Figura 6.2 *Tramo de tubería para el transporte de fluidos (Jupiter Images Corporation).*

Físicamente se han construido tuberías con diámetros de hasta 48 in y longitudes de 3 200 km para petróleo y gas, pero en el caso del agua lo más común es que no se transporte a distancias superiores a 320 km.

Para lograr tuberías de grandes longitudes, éstas se montan uniendo diversos tubos por soldaduras o con empalmes denominados anillos de bridas (véase figura 6.3).

Con el fin de identificarlas con facilidad, las tuberías se señalan con anillos de colores normalizados en lugares visibles de la instalación, indicando la clase de material (véase la tabla 6.2).

Figura 6.3 *Empalmes de tuberías para el transporte de fluidos.*

Tabla 6.2. Colores utilizados para la identificación de tuberías.

Color característico	Índice	Clase de materia
Verde	1	agua
Rojo	2	vapor
Azul	3	aire, oxígeno
Amarillo	4	gases combustibles, CO, H_2, C_2H_2
Amarillo	5	gases no combustibles, CO_2, SO_3, Cl_2, N_2
Naranja	6	ácidos inorgánicos y orgánicos, aguas residuales ácidas
Violeta	7	lejías alcalinas y otros líquidos alcalinos
Café	8	líquidos combustibles peligrosos, clase A - B, aceites
Café	9	líquidos y disoluciones no combustibles
Gris	0	vacío

Para regular el flujo es preciso que en varios lugares las tuberías estén provistas de llaves, válvulas, bombas y compresores, de los cuales hay diferentes modelos; entre los que se encuentran las llaves de tres vías, las válvulas de hilo, válvulas de compuerta, válvulas de descompresión y válvulas de reducción.

La maniobra de una llave o válvula consiste en girarla cierta cantidad de veces para provocar la apertura o cierre del flujo (véase figura 6.4); en este caso no es recomendable utilizarla en tuberías de gran diámetro, pues la manipulación de la llave exige mucha fuerza corporal, y tampoco deben emplearse altas presiones pues no garantizan un cierre hermético.

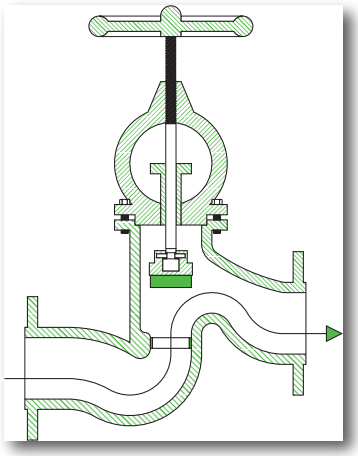


Figura 6.4 *Esquema de una válvula de compuerta.*

6.2.3 Transporte por bombas

Las bombas son medios de propulsión para el transporte de fluidos y sólidos finos por tuberías; cuando se requiere aumentar la presión de materiales gaseosos se habla de compresores. Las bombas se emplean en el abastecimiento de agua en la agricultura, la industria, la minería y más, así como en fuentes y surtidores públicos; son indispensables para la elevación de aguas en pozos profundos de diámetro reducido (véase figura 6.5).

Figura 6.5 *Las bombas son muy utilizadas en operaciones industriales.*

Un equipo de bombeo es un transformador de energía, recibe energía mecánica que procede de un motor eléctrico o térmico y la convierte en energía que un fluido adquiere, en forma de posición, presión y velocidad. Su utilidad fundamental es la de trasladar fluidos (gases y líquidos) o materiales sólidos del tamaño de partículas muy finas, de un sector a otro con la aplicación de una fuerza externa, ya sea elevando los fluidos o sólidos finos o movilizándolos de forma horizontal.

Las bombas sumergidas, diseñadas especialmente para trabajos duros en la elevación de aguas sucias y fangosas son idóneas para conservar excavaciones en seco en obras públicas, construcción, minas, inundaciones, industrias, marina y más (véase figura 6.6).

La bomba sirve para trasvasar líquidos o gases o cambia la posición de cierto fluido. Un ejemplo de esto puede ser una bomba de pozo profundo, que adiciona energía para que el agua del subsuelo salga a la superficie.

La capacidad de una bomba es el volumen de fluido que se maneja por unidad de tiempo; la carga se refiere a las presiones que se aplican para el traslado de los fluidos; la potencia se refiere al trabajo realizado para el movimiento de los fluidos y su traslado posterior, por unidad de tiempo.

Figura 6.6 *Bombas sumergibles.*

Debido a las condiciones de operación a las que se ven sujetas las bombas, se requiere que los materiales con los que se construyen cumplan ciertos requisitos, como son una adecuada resistencia a la corrosión en ambientes alcalinos o ácidos a temperaturas variables, que soporten la abrasión y fricción, así como choques e impactos (véase tabla 6.3).

Tabla 6.3. Materiales para la construcción de bombas.

Material utilizado	Principales características del material
Hierro con alto contenido de silicio	Posee excelente resistencia a la corrosión. Este tipo de material es duro y frágil, por lo que no resiste bien los choques y los impactos, es muy difícil de maquinar. Es adecuado para los servicios que combinen la corrosión con la erosión y se utiliza ampliamente en los servicios de ácido sulfúrico en todas las concentraciones, incluso en el punto de ebullición.
Acero inoxidable	La base del material es el hierro además de 12 a 30% de cromo, de 0 a 22% de níquel y cantidades menores de carbono, cobre y molibdeno. Se utilizan mucho en las industrias de procesamiento debido a sus propiedades mecánicas y a su resistencia tanto a las condiciones oxidantes como a las reductoras. Son resistentes al calor y a la corrosión, no contaminantes y de fabricación sencilla.
Vidrio	Posee excelente resistencia a los ácidos excepto al ácido fluorhídrico y está expuesto al ataque de soluciones alcalinas, en caliente. El acero vidriado combina la resistencia del vidrio a la corrosión con la fuerza estructural del acero, por lo que los recubrimientos de vidrio son resistentes al ácido clorhídrico a cualquier concentración hasta 148,91 °C. Este material se utiliza para tuberías, cuando se requiere que éstas sean transparentes.
Plásticos	El uso de estos materiales está limitado a presiones y temperaturas bajas. La ventaja es que tienen un peso ligero, resultan buenos aislantes térmicos y eléctricos, y son resistentes ante los ácidos minerales débiles, otra característica es que no se corroen y permanecen resistentes a los cambios ligeros de pH y al contenido de oxígeno. En general se utilizan en el revestimiento de ciertas estructuras o piezas de un mecanismo, pero su principal desventaja es que pierden su resistencia cuando se exponen a altas temperaturas de bombeo.
Resina de fluorocarbono	Entre los materiales que integran este grupo se encuentra el tetrafluoruro de etileno (teflón); esta resina se utiliza para sellos mecánicos y conectores para tuberías flexibles. Casi ningún ácido o álcali afecta a esta resina, con excepción del flúor, el gas de cloro a temperaturas altas y, por supuesto, los metales fundidos. Este material conserva sus propiedades hasta 260 °C.
Cermets	Este material es muy resistente a todos los ácidos excepto al ácido fluorhídrico; también al cloro y al dióxido de azufre hasta 648,9 °C. Su resistencia a los impactos es 18 veces mayor que la del vidrio de seguridad y tiene de 3 a 4 veces la resistencia a los choques térmicos que el material vidriado.

Los factores principales que se consideran para determinar si se usa un tipo de bomba u otro son: la presión, el gasto volumétrico, las características de los líquidos (acidez o alcalinidad, densidad), la temperatura, la presión de vaporización del líquido a la temperatura de bombeo, las materias en suspensión, el desgaste por roce o fricción y la viscosidad.

6.2.4 Clasificación de las bombas

Los tipos de bombas que es posible encontrar son tan variados que es conveniente realizar una clasificación adecuada; para lograrlo, es posible hacerlo respecto a su principio de funcionamiento que puede ser un proceso estático o dinámico (rotodinámico).

En el proceso estático el líquido recibe, mediante un émbolo o pistón, un repentino aumento de presión; hay varios tipos de bombas que integran esta clasificación (véase tabla 6.4).

Tabla 6.4. Tipos de bombas de acuerdo con el tipo proceso estático.

Tipo	Bomba	Principales atributos
Membrana	membrana	El manejo de productos químicos agresivos y de mal olor; la membrana sirve para evitar el contacto entre el líquido y el émbolo.
Dorrco o de émbolo	dorrco o de émbolo	Es un accesorio de los espesadores y ayuda a que su funcionamiento sea satisfactorio; se fabrican de dos tipos: a) aspirante o de succión: capaz de bombear lodos contra una carga hidrostática equivalente a 4,27 m de agua; b) empelente o de presión: puede funcionar contra una presión equivalente a 13,72 m de agua.
	simplex de doble efecto	Se distinguen de las simplex en que tienen dos cilindros para agua, cuyo funcionamiento está coordinado; pueden ser de accionamiento directo, impulsadas por vapor o accionadas en forma mecánica con una manivela o volante, pueden ser de acción directa o accionamiento mecánico.
	dúplex de doble efecto	Se distinguen de las simplex en que tienen dos cilindros para agua, cuyo funcionamiento está coordinado; pueden ser de accionamiento directo, impulsadas por vapor o accionadas en forma mecánica con una manivela o volante.
	triplex de simple efecto	Están compuestas por tres émbolos buzos y tres cilindros de simple efecto que se utilizan para obtener una corriente uniforme y su diseño suele ser vertical. Se accionan por medio de un motor eléctrico, por banda o con una máquina de vapor.
	de diafragma	Tienen una membrana elástica a la que se da un movimiento alternante, en cuyo centro se halla la válvula de presión; la válvula de aspiración se encuentra en la parte inferior. Funcionan de manera similar a las de pistón o émbolo pero su construcción es distinta debido a que el miembro impulsor de movimiento alternativo es un diafragma flexible de metal, caucho o material plástico. La ventaja principal de este dispositivo es que elimina todos los sellos y empaques expuestos al líquido bombeador.

En el proceso dinámico se observa en el líquido una transformación de energía; primero se produce un aumento paulatino de velocidad y de la presión.

Algunas bombas incluidas en esta categoría son las que se conocen como bombas centrífugas, que a su vez se agrupan en los tipos mostrados en la tabla 6.5.

6.3 Transporte de líquidos

En el transporte de este tipo de sustancias deben tomarse en consideración sus propiedades fisicoquímicas, con el propósito de evitar accidentes durante su operación de transferencia, algunas de ellas son: alta combustibilidad (impedir la producción de chispas eléctricas), elevada volatilidad (utilizar medios de control de temperatura o aislados térmicamente), entre otros.

El transporte puede llevarse a cabo por vagones o por cisternas, de acuerdo con el medio en el que se efectúa:

6.3.1 Transporte por vagones

Se clasifican por usos generales y de presión; la capacidad varía de 7 500 hasta 180 000 L aproximadamente, y un vagón puede ser simple o de unidades múltiples.

6.3.2 Transporte por camiones cisterna

Los camiones cisterna pueden tener tanques simples, de compartimientos o múltiples. Una característica importante es que todos los estanques llevan en su interior separadores perforados asimétricamente para minimizar las fuerzas de impacto (véase figura 6.7).

Tabla 6.5. Tipos de bombas de acuerdo con el tipo proceso estático.

Bombas	Nombre	Principales atributos
Centrífugas	centrífugas	Están constituidas por un impulsor o rodete compuesto por una serie de aletas radiales de diversas formas y curvaturas que giran dentro de una caja circular. Se usan en general para los servicios que exigen cargas mayores que las que se consiguen con bombas de un solo salto; entre éstos están las bombas de alta presión para el abastecimiento de agua, las que se usan para combatir incendios, las de alimentación de calderas y las de carga para refinería.
	hélice	Son conocidas como bombas de turbina. El término de "bombas de turbina" se aplica a unidades con hélice de flujo mixto. Estas unidades se encuentran en capacidades de 100 galones/minuto y superiores, para cargas de hasta aproximadamente 100 pies/etapa. Las bombas de hélice suelen ser casi siempre verticales, aunque se conocen algunas horizontales de un solo salto.
	achique	Este tipo se puede construir en tamaños reducidos, con dimensiones tales que pueden proyectarse unidades de múltiple efecto que quepan en una carcasa de sólo 4 pulgadas (10 cm) de diámetro. Puede trabajar sumergida en el agua; también es posible sumergir el motor eléctrico junto con la bomba o dejarlo sobre el nivel del agua a fin de que actúe sobre la bomba sumergida gracias a un largo eje.
	múltiple efecto de etapas	La carga proporcionada por un simple rotor (o por dos en paralelo) se determina por las limitaciones prácticas de sus propias dimensiones y velocidad. Para conseguir presiones o cargas elevadas, se recurre a la conexión de dos o más bombas en serie, o a dos o más rodetes montados sobre un eje común que actúan en serie, una bomba de cuatro etapas está representada en corte longitudinal.
	para compuestos químicos	Son adecuadas para trabajar sustancias corrosivas, disolventes orgánicos, líquidos orgánicos de transferencia calórica y aceites ligeros, así como también muchos líquidos limpios, tóxicos o peligrosos.
Especiales	rotatorias	Constituyen un grupo de máquinas que, debido al movimiento rotatorio de sus piezas motrices, provocan el desplazamiento del fluido que impulsan. Las partes que giran se mueven dentro de la caja en la que están contenidas, de tal forma que primero crean un espacio estanco que aumenta de volumen absorbiendo líquido procedente de la tubería de succión, y después reducen dicho volumen, forzando la salida de fluido con la precisión necesaria por el orificio o tubería de impulsión.
	aleta o paleta	Un disco provisto de ranuras, en las cuales se insertan unas aletas deslizantes, constituye el mecanismo esencial de este tipo de bombas; las aletas mantienen contacto y se deslizan por la superficie de una caja elíptica; la fuerza centrífuga lanza las aletas hacia fuera y, por el giro del rotor, el espacio posterior a cada una de ellas, primero aumenta y aspira fluido, luego disminuye y lo impele hacia afuera. Las paletas son las que soportan todo el desgaste y pueden desplazarse con facilidad.

Figura 6.7 *Transporte de líquidos en un camión cisterna (Jupiter Images Corporation).*

6.3.3 Transporte por botellas o tambores

Las botellas o los tambores están diseñados de modo que puedan enviarse por camiones remolque y transferirse a barcos o vagones de ferrocarril.

6.3.4 Transporte por vía marítima

Los buques cisterna son útiles cuando se trata de tonelajes elevados. Por su estructura parecida a la de un tanque pueden transportar más de un producto; un sistema elaborado de tuberías conecta los tanques a una planta de bombeo que puede descargar o transferir el cargamento.

Para transportar gases licuados a bajas temperaturas se emplean barcos especiales dotados de aislamiento entre el casco y un tanque interno. Los materiales tóxicos se embarcan en tanques separados construidos en el interior del barco; esto evita que las fugas contaminen los puertos. También se utilizan tanques separados para el transporte de gases a presión.

Las normas internacionales prohíben arrojar al mar desechos tóxicos o radiactivos, aun en los almacenajes más seguros.

6.3.5 Transporte por ductos

Los ductos son tuberías de 15 a 100 cm de diámetro y pueden alcanzar cientos de kilómetros de longitud; a lo largo de ellos hay estaciones de bombas que impulsan el líquido transportado.

Los ductos sirven para enviar el petróleo crudo desde el lugar de la extracción hasta las refinerías, así como para la distribución de gasolina desde una refinería hacia los grandes depósitos. Es importante señalar que durante la realización del tendido de los ductos para el traslado de líquidos y gases deben controlarse 100% las uniones soldadas a lo largo de toda la línea mediante radiografías, antes de ser enterrados.

6.4 Transporte de sólidos

El término de transporte de sólidos se aplica en la actualidad a los productos manufacturados, que con frecuencia se convierten en materias primas para otras industrias.

El transporte de sólidos se subdivide en las siguientes categorías: transporte de partes embaladas o semiembaladas y transporte a granel.

6.4.1 Transporte de partes embaladas o semiembaladas

Las unidades pequeñas como bolsas, cajas, cajas de cartón, botellones, latas, tambores o bidones, suelen ser transportadas en vehículos cerrados. Se consideran hasta aproximadamente 1 m^3 como transporte de partes embaladas.

Entre los transportes más conocidos de partes embaladas se encuentran las camillas, las tarimas, los tableros o pallets, las carretillas, los remolques y tractores, y el transporte a granel.

Camillas, tarimas, tableros o palets

Son plataformas portátiles sobre las que es posible manejar y almacenar materiales empacados; los hay en una gran variedad de tamaños estándar o hechos a la medida; sin embargo, las dimensiones se establecen de acuerdo con los vehículos de transporte que las conducirán (véase figura 6.8).

El material tradicional para la construcción de tarimas es la madera dura de pino. Para unir las piezas y los componentes se emplean adhesivos y clavos. También hay tarimas de

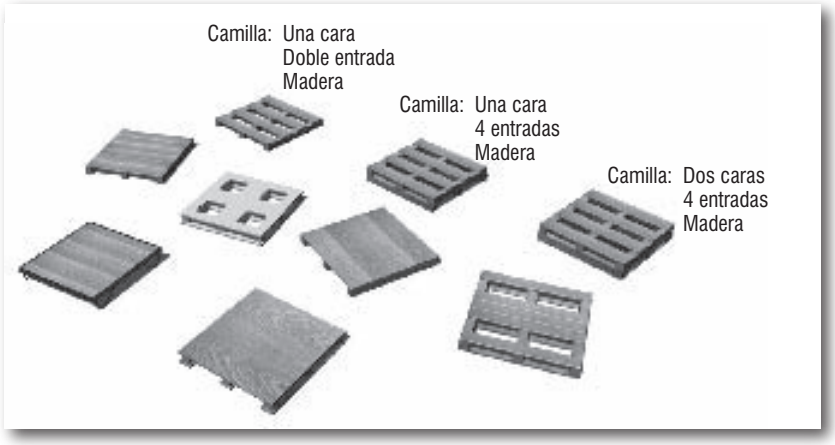


Figura 6.8 *Diferentes tipos de camillas.*

láminas de acero, combinación de madera y metal, aleaciones de aluminio, y las más modernas están hechas de papel prensado o laminado y se usan una sola vez.

Carretillas

Transporte dedicado a volúmenes más pequeños; es uno de los recursos que se usan con más frecuencia y de menor costo; pueden ser de varios tipos, siempre debe tenerse en consideración la capacidad máxima de carga de la grúa para no correr riesgos de accidentes. En la tabla 6.6 se presentan las características de las carretillas.

Tabla 6.6. Características de las carretillas.

Transporte por carretilla	Particularidades
manuales de 1 a 4 ruedas	Tienen una capacidad variable y, a pesar de tener ventajas por el volumen que pueden transportar, se ven limitadas por la capacidad del operario; son de muy bajo costo y su rendimiento es cuantificable fácilmente.
con gato hidráulico o traspaleta	Se utilizan para el transporte de carga de gran peso para aligerar el trabajo de los operarios; están compuestas por cuatro ruedas y un bastidor horizontal elevador u horquilla, que en su posición más baja está a 20 cm del suelo. Para levantar su bastidor u horquilla debe accionarse un gato hidráulico mediante bombeo; de manera ideal se usa en el traslado de tarimas.
elevadora automotriz con plataforma	Propulsadas por un motor eléctrico o gasolina y operada desde el exterior, corresponde a la versión automotriz de la carretilla con gato elevador o traspaleta.
con horquillas	Propulsadas por un motor eléctrico, de gasolina, diesel o de gas licuado, se controlan desde el interior de una cabina. Se usan para cargar, descargar y colocar artículos en estantes más que para trasladar mercancía debido a su gran peso y alto costo de manutención. Las horquillas son dos prolongaciones que emergen desde la parte delantera de la carretilla, con éstas toma la carga cuyo peso puede variar entre 0 y 16 toneladas (se dividen en cinco categorías de tonelaje soportado) levantando a una altura de 4,9 m máximo. Para mantener el equilibrio de la carretilla y su carga, se construyen de manera tal que entre 90 y 95% del peso total sea soportado por las ruedas delanteras. Además, las carretillas disponen de un contrapeso en el extremo opuesto de la carga; alcanzan velocidades máximas de 19 km/h.

Remolques

Para acelerar el movimiento de materiales, en especial con arrastres o rampas largas, se usan dispositivos de enganche a las carretillas y camiones o tractores automotrices para mover trenes de remolques.

Hay varios tipos de remolque y los que se usan con mayor frecuencia son el de roldana Caster, de quinta rueda, con dirección en las cuatro ruedas, para camiones, por acoplo de tractor (véase tabla 6.7).

Tabla 6.7. Clasificación y usos de los tipos de remolques.

Tipo de remolque	Usos y características
de roldana Caster	Sus ruedas o roldanas delanteras giran en forma independiente mientras las dos traseras van montadas sobre un eje fijo. Es el que más se usa, pues se adapta tanto al uso manual como al sistema de remolque.
de quinta rueda	Consta de un eje fijo y otro giratorio (quinta rueda) que puede acoplarse a un tractor con una lengüeta.
con dirección en las cuatro ruedas	En este caso las ruedas van montadas sobre articulaciones de dirección conectadas por barras articuladas, de modo que las cuatro ruedas se orientan de manera simultánea.
para camiones	Son medios de transporte automotriz acondicionado con un contenedor en la parte trasera y que sirve para efectuar maniobras de carga y descarga del material.
por acoplo de tractor	También es un medio de locomoción por motor para envío y traslado de pequeñas cantidades de materiales, a través de la incorporación de contenedores de materiales.

Transporte a granel

Este tipo de transporte se utiliza para mover cualquier volumen superior a 16 toneladas.

La selección del transportador correcto para un material específico a granel en una situación dada se complica debido al gran número de factores interrelacionados que es preciso considerar, entre los cuales se encuentran la pendiente del transportador (entre 0 y 90 grados), la longitud de desplazamiento, la velocidad de arrastre, el tipo de material, los efectos residuales químicos y el volumen a trasladar.

Entre los transportadores a granel más conocidos están los transportadores de tornillo sin fin, el transportador de banda, los transportadores vibratorios, los transportadores de flujo continuo, los transportadores neumáticos, los transportadores hidráulicos, los elevadores de capachos o cangilones, las palas mecánicas y los camiones tolvas.

Transportador de tornillo sin fin

Es uno de los más antiguos y versátiles transportadores; consiste en un sistema de aspas helicoidales (una hélice laminada a partir de una barra plana de acero o secciones individuales cortadas y formadas en hélice, a partir de una placa plana), montadas en una tubería o eje, que giran en una artesa o canoa a velocidades relativamente lentas (véase figura 6.9)

El ingreso de material puede ser en uno de los extremos o cualquier punto de ella y se define como “alimentador o compuerta de entrada”. La descarga del material puede

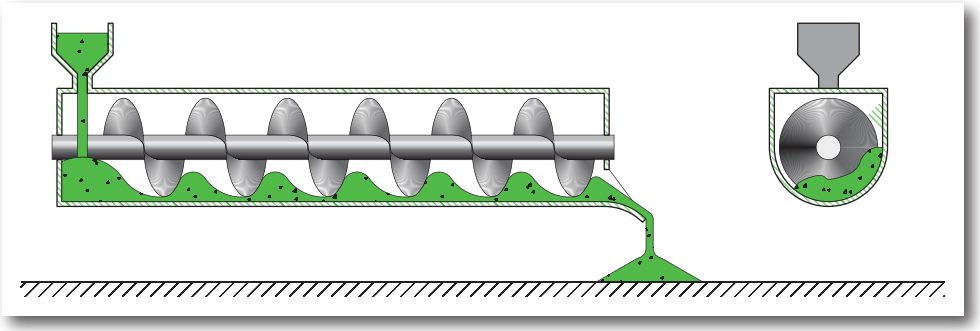


Figura 6.9 *Transportador de tornillo sin fin.*

ocurrir en el otro extremo o en cualquier punto que se desee y se define como "compuerta de descarga".

El movimiento es producido por un motor conectado al eje por medio de una polea; este movimiento es continuo y, por tanto, proporciona material en forma ininterrumpida al proceso. Debe evitarse que la longitud final sobrepase los 30 m por el efecto de torsión que puede sufrir el eje.

Es fácil sellar por completo un transportador de tornillo sin fin de la atmósfera exterior, con el fin de que funcione en su propia atmósfera con una presión mayor.

Además de su capacidad de transporte, los transportadores de tornillo sin fin pueden adaptarse a una gran variedad de operaciones de procesamiento según el tipo de aspa y canoa o artesa.

Transportadores de banda

Se utilizan de manera casi universal; pueden recorrer kilómetros a velocidades de hasta 300 m/min y manejar hasta 5 000 ton/h de material. También funcionan en distancias cortas a velocidades suficientemente lentas para la recolección manual, con una capacidad de sólo unos cuantos kilogramos por hora (véase figura 6.10).

Figura 6.10 *Transportador de banda.*

Las pendientes de los transportadores de banda se limitan a un máximo de 30 grados, y las más comunes se encuentran en la gama de 18 a 20 grados. Sólo es posible producir cambios de dirección en el plano vertical de la trayectoria de la banda, está puede ser de lona, caucho, balata reforzada o filetes de acero a fin de que puedan pasar por los hornos y resistir altas temperaturas.

La banda está sostenida por rodillos, en grupos de tres para formar un canal central y distanciados de tal manera que no produzcan deformaciones. El ancho de la banda varía entre 40 y 150 cm.

Los transportadores de banda pueden tener costos iniciales más elevados que otros transportadores y, según el diseño de los rodillos locos, pueden necesitar o no un mayor mantenimiento; sin embargo, es posible esperar que un transportador de banda con un buen mantenimiento de rutina supere a casi todos los otros. Así, en funcionamiento-costo por tonelada de material manejado, los transportadores de banda han tenido historiales económicos sobresalientes.

La descarga de la banda puede ocurrir en uno de los extremos o bien en cualquier punto usando los siguientes sistemas:

- Raspador en ángulo de 45 grados.
- Rodillos oblicuos.
- Distribuidor o volteador.

Raspador en ángulo de 45 grados

Consiste en instalar un raspador que forme un ángulo de 45 grados con la dirección del movimiento de la banda; la deficiencia del sistema se refleja en el desgaste de la banda (véase figura 6.11).

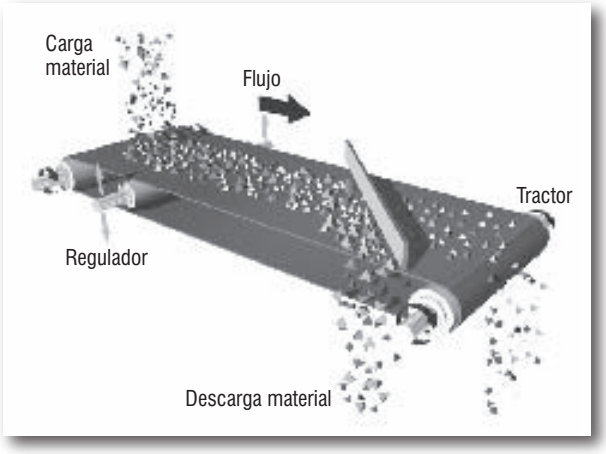


Figura 6.11 *Transportador con raspador.*

Rodillos oblicuos

Este sistema está formado por un grupo de rodillos en forma oblicua que sirven para inclinar la banda que pasa sobre ellos y provocar que la carga se derrame por uno de sus bordes (véase figura 6.12).

Figura 6.12 *Transportador con rodillos oblicuos.*

Distribuidor o volteador

Consiste en una polea inferior montada bajo otra y algo más atrás, de modo que la banda se dobla a sí misma provocando la caída del material desde la polea superior a un canal que permite enviar todo el material a uno de los costados del transportador.

Transportador de banda deslizante

Es una variación del transportador de banda, donde los rodillos son reemplazados por plataformas como las que se encuentran en supermercados y salas de embalaje.

Cintas transportadoras

Se utilizan para el transporte de envases de todo tipo, en túneles de pasteurización y enfriamiento y mesas de acumulación de envases.

Transportadores vibratorios

El movimiento impartido a las partículas del material es hacia arriba y hacia adelante, a fin de que se desplace por la trayectoria del transportador en una serie de saltos cortos. La mayoría de los transportadores vibratorios consiste en una placa horizontal que yace sobre resortes y vibra por causa de un brazo excéntrico de conexión directa.

Transportadores de flujo continuo

El transportador de flujo continuo es una unidad completamente encerrada; utiliza elementos en su cadena de distribución para arrastrar o levantar el material. El movimiento es operado por un motor que va unido a una de las ruedas en los extremos del transportador; su velocidad es baja. Algunos transportadores de este tipo son:

Máquinas flow

a) **Master flow:** el empuje lateral de las cargas es producido por la posición y la forma de las paletas; la descarga del material residual se facilita por la prolongación voladiza de los eslabones a los que están unidos las paletas.

b) **Bulk flow:** se caracteriza por sus paletas en ángulo, que facilitan la descarga del material residual por sus superficies inclinadas delanteras y traseras.

c) **Uni flow:** las paletas están pivoteadas en su borde exterior y se inclinan hacia arriba por medio de una leva rotativa en el punto de salida o descarga (véase figura 6.13).

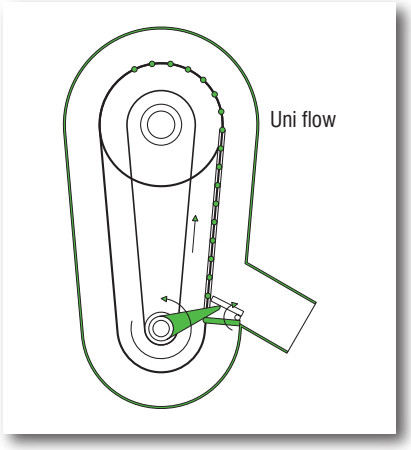


Figura 6.13 *Transportador flow.*

d) **Matt flow:** no necesitan un alimentador pues regulan de manera automática su carga; además, tienen la ventaja de que no hay polvo en la atmósfera pues son completamente cerrados.

Las paletas, semejando bandejas suspendidas con una guía fija, oscilan volviendo hacia arriba su parte inferior para descargar los residuos que quedan en ella.

Transportador de banda cerrada

Este dispositivo con cremallera, cuyos dientes se engranan para formar un tubo cerrado, es en particular adaptable al manejo de materiales frágiles que no pueden sufrir degradaciones. Puesto que la banda envuelve con firmeza al material, este último se desplaza con ella y no se ve sujeto a movimientos internos, excepto en los puntos de alimentación y descarga. Además, la banda puede funcionar en muchos planos, con torsiones y vueltas para afrontar casi cualquier condición de disposición dentro de los límites fijos de curvatura de la banda cargada. No se adapta con facilidad a los materiales pegajosos (véase figura 6.14).

Figura 6.14 *Transportador de banda cerrada.*

Transportador de paletas

Hay una variedad casi infinita de estos dispositivos; la mayoría de las aplicaciones son diseños abiertos para operaciones de transporte en bruto.

Transportador de mandil

Son quizá los más comunes dentro de los transportadores de cadena; su diseño típico es una serie de plataformas montadas entre dos tramos de cadena de rodillos con placas sobrepuestas para eliminar el goteo y placas en los extremos para cargas más profundas.

Transportadores neumáticos

Una de las técnicas más importantes para el manejo de materiales es el desplazamiento de los mismos suspendidos en una corriente de aire, sobre distancias horizontales y verticales. Existen dos sistemas:

- **Sistema de presión:** se deja caer el material en una corriente de aire por encima de la presión atmosférica por medio de un alimentador giratorio de compuertas. La velocidad de la corriente mantiene al material a granel en suspensión hasta que llega al contenedor receptor donde se separa del aire mediante un filtro (véase figura 6.15).

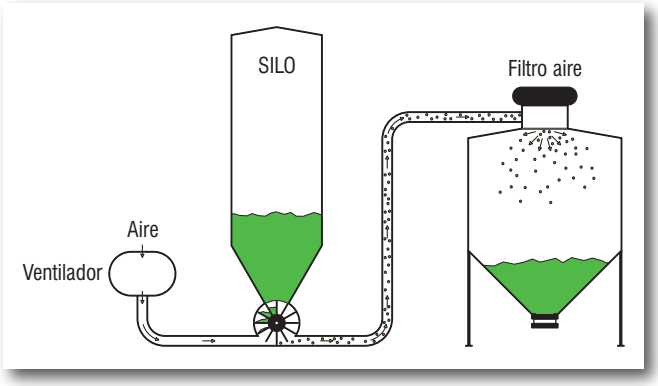


Figura 6.15 *Transportador neumático.*

- **Sistema de vacío:** se caracteriza por el desplazamiento de materiales en una corriente de aire de presión menor que la ambiental; el material permanece suspendido en la corriente de aire hasta que llega a un receptor y un filtro separa al material del aire.

Transportador hidráulico

Transporta materiales que no fluyen con facilidad en distancias cortas; su uso es limitado ya que requiere gran cantidad de líquido para funcionar; a cada 15 m de las tuberías o conductos se ubican chorros auxiliares para permitir un arrastre eficaz del material.

Elevador de capachos o cangilones

Son las unidades más sencillas y seguras para desplazamientos verticales de materiales; se encuentran en una gama amplia de capacidades y pueden funcionar al aire libre o en espacios cerrados.

El motor impulsor se ubica en la parte inferior, la velocidad que desarrolla es lenta pero esto no es un inconveniente para su buen desempeño. Hay tres tipos de elevadores de capacho:

- **De descarga centrífuga:** son los más comunes; los capachos están montados sobre la banda o cadena y los cubos se separan con espacios para evitar la interferencia en la carga y la descarga. Los capachos se cargan parcialmente por medio del material que fluye de manera directa a ellos, para luego ser lanzado fuera de los capachos por acción de la fuerza centrífuga cuando pasan sobre la rueda superior (véase figura 6.16a).

- **De descarga por gravedad:** son iguales que los de descarga centrífuga en los aspectos esenciales, con excepción de que los capachos se montan en dos tramos de cadenas y se inclinan hacia atrás bajo la rueda superior, efectuando así una descarga eficaz por medio de la gravedad. Estas unidades se diseñan en particular para materiales pegajosos o que tienen tendencia a apelmazarse (véase figura 6.16b).

- **De descarga continua:** los capachos están asociados con distancias cortas, de modo que la parte posterior del cangilón precedente sirve como vertedero de descarga para el que se vacía, al dar la vuelta sobre la polea principal. Estos elevadores trabajan con velocidades mucho menores que los de descarga centrífuga (véase figura 6.16c).

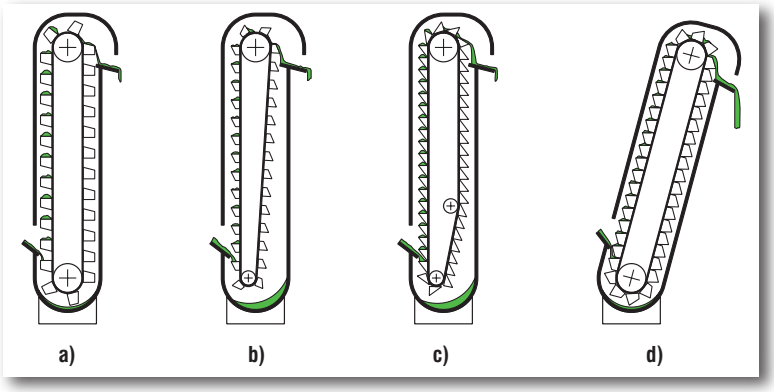


Figura 6.16 *Tipos de elevadores de cangilones.*

6.5 Almacenamiento

Es una operación unitaria relacionada con las funciones de reunir, guardar y acumular materiales en los diferentes estados de agregación y corresponde a la etapa del manejo de materiales que requiere especial atención en un proceso industrial.

Tanto las materias primas como los productos elaborados y semielaborados se almacenan a granel o en recipientes adecuados para cada uno ellos, considerando ciertos factores, como las características fisicoquímicas y bioquímicas del producto, su grado de automatización, las condiciones atmosféricas y climatológicas, el valor de los materiales, la capacidad de carga o descarga por hora, las vías de acceso y las condiciones de transporte, entre otros, lo cual determina el tipo de embalaje, la forma y el lugar de almacenaje (véanse figuras 6.17, 6.18 y 6.19).

Figura 6.17 *Apilamiento o almacenamiento a granel de materiales sólidos.*

Figura 6.18 *Almacenaje de líquidos mediante recipientes apilados.*

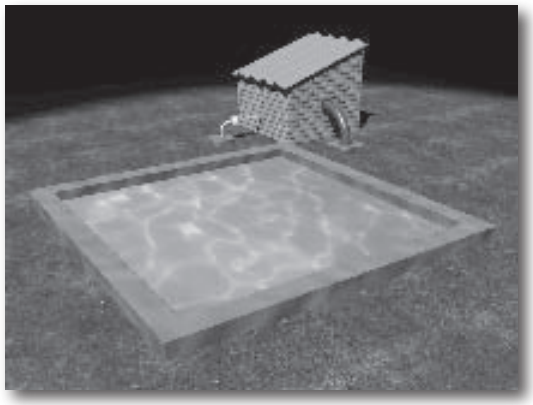


Figura 6.19 *Almacenaje de líquidos a granel o en masa en piletas.*

La construcción de almacenes y depósitos está supeditada a la conveniencia de disponer de materias primas en cantidad suficiente y guardar los productos elaborados según se requiera debido a oscilaciones de los precios en el mercado; la capacidad de aquellos es una parte importante del estudio de la investigación de operaciones y de la eficiencia de los inventarios (véase figura 6.20).

Figura 6.20 *Edificios de depósito de materiales (Jupiter Images Corporation).*

Los requerimientos de almacenaje dependerán de las propiedades de los materiales a almacenar y las características de almacenaje. Así, las sustancias orgánicas y el carbón no se guardan en capas altas para evitar el peligro de inflamación por autocalentamiento; las sales inorgánicas se apelmazan fácilmente y requieren disposiciones de vaciado adecuado.

Hay diferentes tipos de almacenes: al aire libre, con cubiertas, con murallas, en edificios (graneros) y silos, entre otros.

El almacenamiento adecuado tiene diversas ventajas que inciden tanto en el factor económico como en la seguridad; entre las cuales están: la utilización adecuada del espacio, lo que indica una mejor organización; la expedición de materiales con mayor rapidez, evitando gastos de demora; el material no está expuesto a daños; mejores condiciones de trabajo, por tanto, la fatiga del personal disminuye. Por todo lo anterior, se reduce la frecuencia de los accidentes.

En general la actividad de preparación y asignación de las áreas de almacenamiento debe realizarse con la debida anticipación, considerando los siguientes factores, que el piso destinado sea de construcción resistente, evitar la cercanía de circulación del personal y

los equipos de movimiento, que estén a poca distancia, en lo posible, del lugar donde habrá de ocuparse el material, que permita el fácil acceso de las diferentes clases de materiales y su retiro, sin riesgo de accidentes, no debe apilarse material contra las murallas, no debe haber maquinaria sin defensas ni equipos eléctricos sin aislamiento y que los materiales queden bien seguros y no se caigan o desmoronen por falta de apoyo.

Ejemplo 3

Mobil Oil de México tiene un almacén para producto terminado que mide 18 m de largo, 26.5 ft de ancho y 138 in de alto. En el almacén hay cajas, las cuales ocupan 75% de la capacidad del almacén. Cada caja contiene 24 botes de aceite SAE-40 listo para usarse, los botes miden 0,09 m de diámetro y su altura es de 7 in y contienen aceite a 90% de su capacidad. El gerente de almacén desea saber:

a) ¿Cuántas cajas hay en el almacén?

b) ¿Cuántos litros de aceite hay en el almacén?

c) ¿Cuántos trailers de 12 m^3 de capacidad necesita para enviar toda la producción a Querétaro?

Solución:

a) Utilizando la siguiente relación:

$$\frac{\text{volumen del almacén}}{\text{volumen de botes de aceite}}$$

es posible calcular la cantidad de botes que hay con la capacidad de almacenamiento, además teniendo la cantidad de botes por caja, se calcula la cantidad de cajas en el almacén.

Realizando el cambio de unidades para los datos proporcionados se tiene la siguiente tabla con las cantidades obtenidas:

Dimensiones	Largo	Ancho	Alto
almacén	18 m	26,5 ft	138 in
(unidades del SI)	18 m	8,082 m	3,505 m
Dimensiones	**Diámetro**	**Radio**	**Altura**
botes	0,09 m	0,045 m	7 in
(unidades del SI)			0,1778 m

$$\text{Volumen del almacén} = \text{largo} \times \text{ancho} \times \text{alto}$$
$$= 18\ \text{m} \times 8{,}082\ \text{m} \times 3{,}505\ \text{m}$$
$$= 509{,}89\ \text{m}^3$$

$$\text{Volumen corregido} = 509{,}89\ \text{m}^3 \times 0{,}75$$
$$= 382{,}42\ \text{m}^3$$

$$\text{Volumen del bote} = \pi r^2 h$$
$$= 3.1416\ \text{m} \times (0{,}045\ \text{m})^2 \times 0{,}1778\ \text{m}$$
$$= 0{,}001\,13\ \text{m}^3$$

$$\text{Número de botes de aceite} = \frac{382{,}42\ \text{m}^2}{0{,}00113\ \text{m}^2}$$
$$= 338\,424\ \text{botes}$$

$$\text{Número de cajas de aceite} = \frac{338\,424\ \text{botes}}{26\ \frac{\text{botes}}{\text{caja}}}$$
$$= 13\,016\ \text{cajas}$$

b) Haciendo las conversiones necesarias se tiene:

$$\text{volumen de aceite} = \text{número de botes} \times \text{volumen del bote} \times \text{capacidad}$$
$$= 338\,424\ \text{botes} \times 0{,}00113\ \text{m}^3 \times \frac{1000\ \text{L}}{\text{m}^3} \times 0{,}90$$
$$= 344\,177\ \text{L}$$

c) $$\text{trailers necesarios} = \frac{\text{capacidad del almacén}}{\text{capacidad del trailer}}$$
$$= \frac{382\,420\ \text{L}}{12\,000\ \frac{\text{L}}{\text{trailer}}}$$
$$= 32\ \text{trailers}$$

6.6 Características de los materiales almacenados

Todos los problemas relativos al manejo y al movimiento de materiales comprenden también, en alguna medida, el almacenamiento de los mismos, salvo en algunos casos en que el movimiento sea inherente al proceso, o sea, el que el traslado de las materias primas o de los productos acabados sea directo. Por ello es necesario estudiar los métodos de almacenamiento que las industrias en general usan.

De acuerdo con sus características fisicoquímicas es posible agrupar los materiales en sólidos, líquidos y gaseosos, los que a su vez se pueden almacenar a granel o en recipientes.

6.6.1 Almacenamiento de materiales sólidos

Para almacenar materiales a granel se utilizan almacenes de planta (al aire libre, patios, muelles o vertederos), carboneras (centrales termoeléctricas), almacenes cubiertos (tinglados o naves para almacenes), edificios de depósitos (almacenes de piso y graneros) y silos (unicelulares, multicelulares o grandes cámaras).

6.6.2 Almacenes de planta

Si las condiciones del clima lo permiten, y sin mermar las condiciones del producto, los materiales sólidos (como las tierras, el carbón, las piedras, los minerales, la madera, la hulla coque, el azufre, la sal, el pellet de maderas, entre otros) se almacenan en pilas o montones, en general al aire libre, en patios, muelles y vertederos, los cuales deben estar ubicados en las proximidades de los medios de transporte (ferrocarril, barco, buenas vías de acceso para camiones, etc.). Estos almacenes pueden proveerse de techos bien acondicionados, paredes laterales de madera o cemento armado.

En el caso de grandes volúmenes, hay métodos comunes para realizar esta clase de almacenamiento en forma económica. La elección entre estos métodos depende del material que se guarda, de su cantidad, del método seguido para su entrega al almacén y del sistema de utilización que concuerde mejor con las demás operaciones de la fábrica de que se trate. Estos métodos están sujetos a variaciones para hacer frente a las necesidades individuales del problema de almacenamiento y son:

Almacenes en pila o montón debajo de un puente-grúa o de una grúa móvil

Este almacenamiento es adecuado para el trabajo dentro o fuera del establecimiento; se realiza con una cuchara que funciona desde la grúa.

La cuchara puede descargar desde cualquier medio de transporte (vagones, barcazas u otros), transportando el material uno de estos vehículos, colocándolo directamente en un almacenamiento secundario, en un transportador u horno o apilarlo por montones al aire libre; si el almacén se ha provisto de paredes laterales débiles resultan los llamados "de montón" que se cargan por el centro, para reducir los empujes laterales.

Almacenamiento en pilas a cada lado de una vía servida por un puente-grúa locomotriz

Esta grúa se utiliza para apilar en su almacenamiento el material tomándolo desde un lugar específico (que puede ser un camión, una barcaza, un vagón o una tolva) en el que se han descargado los vagones tolvas, transportándolo hasta su punto de destino.

El retiro del material del almacén se efectúa cargándolo con una grúa en los vagones, para luego depositarlo en una tolva servida por un transportador en la caja de pie de un elevador de capachos o bien en la tolva de un montacargas de cajón.

Para el almacenamiento pueden utilizarse dos tipos de sistemas:

- **Sistemas aéreos:** utilizan una vagoneta y su cangilón de monta carril o un cable carril con sus correspondientes capachos. Estos sistemas pueden controlarse desde un punto central, o bien el operador puede desplazarse en una cabina que lleva el cangilón; hacen posible descargar el material, desde cualquier medio de transporte y sirven a cualquiera de éstos o a un transportador para sacar el material del lugar de almacenamiento. Pueden usarse también para entregar el material directamente en el punto de fábrica en que se utiliza, en silos o depósitos de la industria.

- **Sistemas de pala de arrastre:** son útiles para solucionar muchos problemas de almacenamiento a granel al aire libre. Consisten en un cucharón recogedor o traílla a cuyos dos extremos se ha unido un cable que pasa sobre una polea y se enrolla en el tambor de una máquina elevadora. La polea se monta, de manera que pueda desmontarse sobre uno de los diversos postes situados en la zona de almacenamiento, así el cucharón puede desplazarse por toda la zona, apilando y sacando el material, entregándolo luego a un transportador o elevador de capachos o a un montacargas de cajón.

Volumen de material

En general no es posible calcular con exactitud el contenido de los montones al aire libre; a menos que estén entre paredes y tengan una altura uniforme.

Los montones grandes formados al azar pueden calcularse con exactitud suficiente para la mayoría de los fines obteniendo los contornos de sus secciones a intervalos regulares, por ejemplo, a distancias de 1,5 a 3 m, y calculando luego el volumen de material entre las secciones. Estas secciones se determinan con facilidad empleando instrumentos topográficos.

Las pilas más pequeñas se calculan a menudo con sondeos, pero este método deja mucho que desear en cuanto a su exactitud, por muy cómodo que resulte.

6.6.3 Almacenes cubiertos

Cuando es indispensable mantener las materias almacenadas inalterables (por ejemplo, cerámica, chatarras de metal, granos, arena para la fabricación de vidrios, cal o productos agrícolas) es común el uso de un gran tinglado o de una sala en uno de los edificios de la fábrica para cada material; o cuando las cantidades son pequeñas se divide un local de almacenamiento en varias secciones, los que cuentan con un servicio de puente grúa o montacarga que facilitan la operación de traslado de material, o bien, con transportadores de banda.

Tinglados y naves para materias a granel

Los tinglados y las naves para materias a granel (carbón, briquetas de lignito, sales, entre otros) y para empaque (tinglados de mercancías en muelles y en estaciones de ferrocarril). Los tinglados se construyen de madera, acero o de hormigón armado.

El servicio de almacenamiento a granel en interiores puede realizarse por completo con transportadores, por ejemplo, utilizando dos de banda, uno en la parte superior (que saca el material del elevador y los distribuye) y el otro en la parte inferior sacando el material bajo el suelo desde una tolva cargadora o de otro tipo de transporte.

Al almacenar cantidades pequeñas resulta antieconómico manipular el material con otro método distinto al manual; para ello se recomienda el uso de carretillas.

En caso de almacenar cantidades medianas es factible utilizar carretillas eléctricas, industriales o tractores y remolques. Es recomendable que estos equipos estén equipados con volquetes, ya que permiten eliminar mucha mano de obra y disminuye la merma.

Volumen de material

Las cantidades almacenadas bajo techo se calculan con facilidad al obtener el contorno de la pila por medio de sondeos. Este método no es exacto pero es suficiente para determinar un volumen aproximado. Cuando el almacenamiento puede mantenerse nivelado, es decir, con el material distribuido de manera uniforme sobre todo el suelo del almacén, pueden realizarse cálculos más exactos partiendo de las dimensiones de dicho espacio y de la altura que el almacenamiento alcanza sobre la pared. Cuando se emplea este método, es conveniente pintar una escala en el muro para indicar la altura del material.

6.6.4 Edificios de depósitos

Es frecuente el almacenamiento de sólidos a granel bajo techo en depósitos. Este sistema es económico, en especial cuando se trata de almacenamiento de materiales que pueden transportarse por gravedad a los equipos de fabricación que los utilizan por medios de expedición o embarque. Los fondos en tolva o parabólicos son de uso corriente en estos depósitos; entonces, el material pasa por medio de gravedad directamente a un vertedero o a un con-

ducto siempre que se abre la compuerta de salida. En el almacenamiento por este método es probable que algunos materiales obstruyan la salida, por lo que se acostumbra instalar agitadores mecánicos o por aire con el fin de mantenerlos sueltos y permitir que fluyan con facilidad. El vertedero o conducto de salida puede alimentar directamente al equipo que utiliza el material, como suele hacerse en los hornos, o bien carga el material en vagonetas y otro aparato de transporte similar que lo traslada al punto de utilización como se hace en las fábricas de coque. Los depósitos también pueden disponerse de manera que alimenten a un transportador de banda u otro sistema, o para cargar carretillas o vagones industriales.

El material se carga a los depósitos por la parte superior descubierta, o por compuertas. Los métodos de uso común, para este fin, consisten en:

a) Emplear una grúa o un montacarga aéreos con una cesta.

b) Utilizar un transportador de banda que pase por encima del almacenamiento, con dispositivos apropiados para descargar el material y alimentado por un elevador de cestas o un montacargas de cajón.

c) Utilizar un transportador de cestas con pivotes, que puede servir también para sacar el material del almacén.

6.6.5 Silos

Las ventajas de los silos consisten en que economizan el espacio de piso para almacenar una cantidad dada de material y su construcción es poco costosa. Hacen posibles, con poca mano de obra y de una manera casi automática, las operaciones de almacenaje, remoción mezclado, limpieza, extracción y envío de materiales a granel (cereales, carbones, coque, minerales, gravilla, cemento, harina, etc.), así como la clasificación por calidad, tamaño y más. Para almacenar materias en trozos gruesos (minerales o carbón) se emplean “silos de grandes cámaras”.

Para el vertido de productos transportados en sacos, cajas o materiales a granel sensibles al choque se emplean los llamados “silos de sacos” que consisten en grupos de toboganes helicoidales de 1 a 3 vueltas, frenando la caída.

Debido a su gran altura suele ser necesario cargar los silos con un elevador u otro dispositivo similar, y como sus fondos rara vez están por encima del nivel del terreno, su descarga tiene que efectuarse por medio de un transportador o de carretillas que penetran en un foso.

Las cámaras de estos silos tienen 10 a 35 m de altura; su sección transversal puede ser rectangular, cuadrada, hexagonal o circular. Los materiales que se emplean en su construcción pueden ser madera, ladrillos con refuerzos de hierro, hormigón armado o hierro. La carga útil es de 10 000 a 20 000 kg/m^2. Los locales de recepción, pesado y limpieza previa e instalación de elevadores se establecen generalmente en un cuerpo separado.

El servicio de los equipos de transporte está centralizado por el mando a distancia de los mecanismos de repartición. Una variación de los silos para cereales son los de celosía, en los cuales el aire exterior puede penetrar en las cámaras cuyas paredes son de celosía. Tienen el inconveniente de que el grano absorbe la humedad.

Volumen de material

La cantidad de material almacenada en un depósito o en un silo, se calcula con suficiente exactitud para la mayoría de los fines, partiendo de las dimensiones conocidas de la sección horizontal de dichos elementos y de la altura del material almacenado. Otro método exacto consiste en pesar primero el material que se almacenará y luego las cantidades que se sacan.

Este procedimiento exige una considerable inversión inicial en equipos para el pesado, pero a menudo se justifica cuando se desea una comprobación estrecha de las cantidades manipuladas.

6.6.6 Recipientes

Para este tipo de almacenamiento se utilizan con frecuencia los siguientes almacenes:

- Almacenes de planta (almacenes al aire libre, patios, muelles o vertederos).
- Almacenes cubiertos (tinglados o naves para almacenes).

Los materiales sólidos suelen ser almacenados en recipientes (como cajas, sacos, barriles o tambores de acero) en pilas al aire libre cuando el material y las condiciones atmosféricas lo permiten o bajo techo en otros casos.

Para manejar estos materiales se emplean carretillas eléctricas industriales, equipadas con el dispositivo elevador a gran altura cuando son apiladas y si las cargas son pesadas, se equipan con una grúa.

Otro método está basado en el uso de un puente-grúa o un montacarga que manipula varios sacos al mismo tiempo con una eslinga.

Para manipular barriles o tambores se utilizan elevadores de barriles y los apiladores de tambores. Hay que tener cuidado de no sobrecargar el piso del almacén cuando se almacenan bajo techo.

Volumen de material

El número de barriles, sacos o tambores se calcula contando los que hay en unidades en un área determinada y extendiendo el cálculo a la totalidad de la superficie ocupada, teniendo en cuenta los espacios en los que el material no llegue al nivel normal.

6.6.7 Contenedores

Son de plástico, reutilizables, reciclables, inalterables y resistentes, y han sido concebidos para aplicaciones estándar o específicas. A continuación se describen por categorías (véase figura 6.21).

a) **Contenedores apilables:** contenedores para paredes verticales para un máximo de volumen útil cerrados o rejados, de 2 a 162 L para paletización estándar; 60 modelos diversos adaptados a múltiples aplicaciones.

Figura 6.21 *Contenedores de plástico apilables y encajables.*

b) **Contenedores encajables y apilables sobre tapa:** contenedores de tapa solidaria o separada; encajables a 75% para un ahorro óptimo de espacio en vacío o de retorno y la mejor prestación en la distribución.

c) **Contenedores apilables:** destinados para el almacenaje, contención y expedición de materiales.

d) **Contenedores de almacenaje de pieza pequeña:** de apertura frontal de 1/3 y hasta 72 L, superponibles y compartimentables; útiles para la clasificación y el aprovisionamiento de piezas pequeñas.

6.6.8 Palets

Palets plásticos reutilizables y reciclables; son durables, inalterables y personalizables. De dimensiones estándar o específicas. Útiles para el almacenaje, la manutención, el transporte, la expedición o la retención de 200 a 2 000 kg de carga útil.

6.6.9 Estanterías

Son limpias, imputrescibles, inalterables y resistentes; de construcción modular fijas o móviles. Algunas son fabricadas de plástico o metal, y son adecuadas para el almacenaje de productos terminados o piezas, se pueden utilizar por ejemplos en cámaras de frío y laboratorios (véase figura 6.22).

Figura 6.22 *Estantes para almacenamiento de materiales.*

6.7 Almacenamiento de líquidos

El almacenamiento de sustancias líquidas se realizan a granel empleando albercas, estanques y piletas; cuando el material estará expuesto a los agentes atmosféricos son preferibles los estanques cerrados. En todos los demás casos las albercas son pocas, ya que la mayoría de los líquidos pueden protegerse de la contaminación o la dilución. El agua es el líquido que en general se almacena de este modo en la industrias química.

Cuando la cantidad del líquido que se va a almacenar es pequeña, son adecuadas las piletas que se construyen haciendo una excavación y defendiéndola con muros de hormigón.

Un estanque es una extensión de terreno, construida con paredes definidas e impermeables para impedir que los materiales líquidos fluyan o se derramen del sitio donde son confinados.

6.7.1 Tanques

La cantidad de un líquido almacenada en un tanque se averigua con facilidad partiendo de las dimensiones del mismo y de la altura del líquido en él, la cual se obtiene con un indicador de nivel. El área de la sección horizontal de un tanque vertical es la del círculo de diámetro igual al del tanque, mientras que la de un tanque rectangular es el producto del largo por el ancho.

Cuando se trata de un tanque horizontal, la forma de sus extremos, que puede ser convexa, plana y cóncava, influye en su volumen. Sin embargo, para las estimaciones ordinarias se considera despreciable este efecto de los extremos. El contenido de un tanque horizontal lleno, en litros, se halla multiplicando el área de uno de sus extremos por su longitud, tomando todas las dimensiones en decímetros. Cuando el tanque está parcialmente lleno, hay que deducir de la capacidad total anterior el volumen de la parte ancha del tanque.

6.7.2 Estanques

Si el estanque está lleno, hasta un punto situado por encima de su eje, hay que sustraer de la capacidad total un volumen igual al producto de su longitud por el área del segmento no mojado del extremo del tanque. Si el tanque está lleno hasta un punto situado por debajo de su eje, el contenido es igual al producto de su longitud por el área del segmento mojado del extremo del tanque.

Cuando se desea calcular con mayor exactitud el contenido de un tanque horizontal con sus extremos curvados, es necesario averiguar el radio de curvatura del extremo, u obtenerlo del fabricante. Esto a menudo presenta dificultades y por ello se recomienda el método de la calibración, que consiste en llenar por completo el tanque con agua y dejarla salir después por pasos sucesivos, reduciendo la profundidad del líquido en cantidades iguales y midiendo con exactitud la cantidad de líquido retirado en cada una de esas reducciones unitarias de la profundidad. De esta manera puede compilarse una tabla que dé el contenido del tanque para cada unidad de profundidad del líquido en el tanque. En la práctica, con una tabla de esta naturaleza y un indicador de nivel del líquido, puede obtenerse fácilmente la cantidad de líquido que hay en un tanque.

El método de calibración, recomendado para los estanques horizontales, es también el mejor que puede emplearse en los esféricos, ya que su empleo evita tener que realizar cálculos laboriosos.

Materiales de construcción de estanques

Los estanques de almacenamiento se fabrican de casi todos los materiales estructurales, dentro de éstos encontramos el acero, concreto reforzado, hormigón armado. Éste se reviste en su interior de caucho o algún otro material protector en caso de que el líquido que se almacena pueda atacar el material; en general estos estanques se someten a un tratamiento previo para impedir las fugas. Además se usan materiales plásticos con refuerzos de vidrio para estanques de 60 000 galones, cuyas principales ventajas son la resistencia a la corrosión, su peso ligero y su bajo costo.

Un buen diseño para aprovechar mejor el material es el de usar siempre planchas enteras tanto en el manto como en el techo. Para este objeto hay planchas de muy diversas medidas dentro de las cuales el ingeniero puede elegir las más convenientes.

Un buen diseño económico es el de dimensionar el estanque de modo que la altura sea igual al diámetro, siempre que esto se pueda efectuar, ya que en estanques de gran tamaño

esto es imposible y en esos casos resulta más conveniente hacerlos de mayor diámetro y menor altura y generalmente provistos de techo cónico.

En general los estanques de gran tamaño se construyen ***in situ***, se llevan las planchas y elementos de soldadura al terreno y se van armando desde la base hacia la parte superior.

En todo estanque debe instalarse en la parte superior un respiradero, que por lo común es un tubo con la punta encorvada hacia abajo o con un sombrero, a fin de que al bombardear un líquido hacia su interior, los gases y el aire puedan ser evacuados hacia el exterior, lo mismo para el caso de vaciarlos y evitar que se produzcan deformaciones por contracción de las paredes. La sección del tubo de respiración debe ser por lo menos igual a la sección de la cañería de entrada del líquido.

En algunos casos, cuando se trata de almacenar líquidos que pueden evaporarse a la temperatura ambiente, en especial en el verano, es necesario colocar sobre los estanques un techo flotante a fin de compensar el aumento de presión debido a la evaporación. Éste es el caso típico del almacenaje de gasolina y productos livianos en las refinerías de petróleo.

6.7.3 Recipientes

Los líquidos suelen, por lo general, estar contenidos en recipientes cerrados como barriles, tambores, bidones o recipientes de vidrio. El almacenamiento de los barriles y los tambores se hará de la manera descrita para los sólidos envasados en recipientes similares; en lo que respecta a los bidones o latas, uno de los métodos más convenientes es apilarlos sobre tableros o plataformas con patines y manipularlos después para almacenarlos y sacarlos del almacén por medio de carretillas eléctricas o manuales. Cuando hay que apilar a gran altura pequeños bidones resultará útil, tanto para las entradas como para las salidas, la maquinaria desarrollada para este servicio en las fábricas de conservas.

El almacenamiento de los recipientes de vidrio, como botellas, puede hacerse sobre camillas o patines, o bien directamente sobre el suelo. La entrada y la salida de estos envases en el almacén se realizan mejor por medio de carretillas industriales eléctricas o manuales. Hay carretillas especiales en el mercado para manipular fácilmente las botellas.

La carga aplicada a los pisos es un punto que por supuesto hay que considerar en cualquier clase de almacenamiento en edificios, pero es en particular importante cuando se trata de pequeños recipientes, como latas o bidones, por la facilidad con que éstos pueden apilarse hasta una altura que sobrecargue el piso.

De ordinario los pisos de edificios pueden cargarse hasta un máximo de 730 kg/m^2. Las construcciones del tipo de fábrica y hormigón armado pueden soportar cargas hasta de 1,220 kg/m^2. En muchos casos, edificios de construcción especial pueden resistir cargas mayores. En todo caso, el ingeniero químico debe averiguar la carga de seguridad de los pisos de los edificios y tomar las medidas necesarias para no sobrepasarla.

Volumen de material

La cantidad de líquido almacenada en recipientes de gran tamaño se calcula contando el número de recipientes que hay en una determinada área y extendiendo después este cálculo hasta abarcar toda la superficie de almacenamiento. Este método no resulta tan conveniente cuando se trata de latas u otros envases pequeños, en cuyo caso es preferible emplear alguna clase de indicador en la pila. Estos marcadores pueden, por ejemplo, señalar cada gruesa contenida en la pila, y luego se obtiene la cantidad total contando el número de indicadores y multiplicando por la magnitud unidad.

6.7.4 Cuba de almacenaje

Para el almacenaje de productos químicos, incluso los más peligrosos, se usan cubas de 250 L hasta 50 000 L, fabricadas por extrusión enrollamiento, en polietileno alta densidad o en polietileno (véase figura 6.23).

Figura 6.23 *Cuba de almacenaje construida de polímeros.*

6.7.5 Recipientes y contenedores estándar

Este tipo de recipientes están fabricados en polietileno para el almacenaje de líquidos alimentarios o químicos. A continuación se presentan algunos ejemplos: a) recipientes monoblock: de 1 500 hasta 15 000 L, b) dosificadores: de 100 hasta 1 000 L y c) grandes recipientes cilíndricos, troncocónicos, rectangulares: de 80 hasta 2 000 L.

6.8 Almacenamiento de gases

Los gases almacenados a granel suelen colocarse en gasómetros o en tanques. Los gasómetros pueden ser telescópicos y estacionarios.

6.8.1 Gasómetros telescópicos

Constituyen el tipo usual empleado para almacenar el gas de alumbrado; su estructura se compone de cierto número de bandas o anillos de láminas de acero dispuestos de manera concéntrica. El anillo inferior es el de mayor diámetro, es fijo y su fondo está herméticamente cerrado; el anillo superior es de menor diámetro y su parte superior está cerrada del mismo modo. Los anillos intermedios tienen un diámetro que disminuye de forma gradual, de abajo hacia arriba. Estos anillos encajan unos en otros y están provistos de cierres líquidos para impedir el escape de gas.

Toda la construcción está dentro de una armadura soportadora con columnas, sobre las que corren las ruedas y los rodillos unidos a los anillos, y que los mantienen en una posición fija horizontal respecto de la armadura. Con todo, esos anillos pueden moverse con libertad hacia arriba y hacia abajo impulsados por la presión del gas en el gasómetro.

En general, es importante señalar que de acuerdo con la estructura total, son construidos con capacidades muy amplias, que oscilan entre 280 000 m^3 y 425 000 m^3.

6.8.2 Gasómetros estacionarios

Son más modernos que los gasómetros telescópicos; se les denomina gasómetro sin agua, aunque este nombre es poco apropiado debido a que se emplean cierres hidráulicos. Con-

sisten en tanques cilíndricos de eje vertical; el fondo y los costados son de construcción hermética mientras que la cubierta, por lo general redondeada o un poco cónica, tiene ventosas o respiraderos. Dentro del estanque hay un tabique horizontal que se apoya en un cierre líquido (hidráulico) en el punto en que su circunferencia está en contacto con la pared del recipiente y dispuesto de manera que pueda flotar desplazándose en sentido vertical hacia arriba y hacia abajo sobre el gas. A medida que entra el gas en el tanque y se eleva el tabique por la presión creada y, cuando se saca el gas, el tabique baja de manera automática, manteniendo una presión constante en el gas.

El almacenamiento en grueso de gases suele efectuarse en tanques como los que se acaban de describir, los cuales permiten mantener una presión bastante uniforme. Cuando el almacenamiento se hace en tanques ordinarios hay que tomar medidas para impedir que el gas se diluya con aire y que se cree una presión excesiva dentro del tanque. De ordinario, estos tanques sólo se emplean para almacenar aire comprimido, en cuyo caso se llaman recipientes de aire.

El almacenamiento de un gas en gasómetros o tanques se lleva a cabo por medio de compresores rotativos o de émbolo, que aspiran el gas de la fuente donde se produce y lo envían al gasómetro o al tanque por medio de tuberías. La utilización del gas desde su almacenamiento puede hacerse con un compresor rotativo o de émbolo, o utilizando la propia presión del gas, cuando ésta es suficiente. Su distribución se realiza a través de sistemas de tuberías; su presión en el gasómetro o el tanque de almacenamiento es a menudo suficiente para servir de modo parcial al sistema que alimenta y, en caso necesario, puede suplementarse con la presión adicional comunicada al gas por un compresor rotativo o de émbolo.

La cantidad de gas almacenado en un gasómetro tiene que calcularse para determinadas condiciones normalizadas, debido a los cambios que se producen en su volumen cuando varían la presión y la temperatura. Es, por tanto, fundamental un control estricto de estas condicionantes.

El gas que entra en el depósito de almacenamiento y el que sale de éste puede medirse con algunos de los numerosos tipos de contadores de gas existentes en el mercado, y de esta manera es posible verificar siempre la cantidad de gas almacenado (véase figura 6.24).

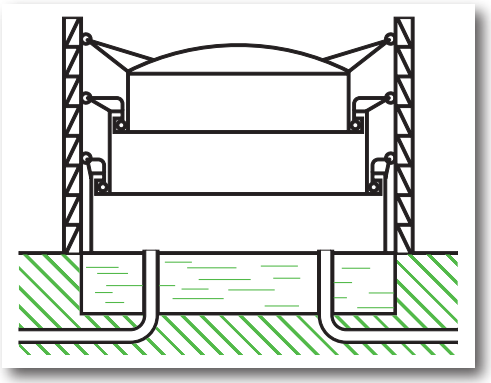


Figura 6.24 *Diagrama básico de un gasómetro.*

6.8.3 Recipientes

Los gases que se almacenan en recipientes suelen colocarse en cilindros de gas, que son tanques de acero de paredes gruesas en forma de tambor o de botella. Las paredes tienen que ser gruesas para poder admitir el gas a presión y almacenar así una cantidad relativamente grande del mismo (considerando su volumen a la presión ordinaria) en un recipiente re-

lativamente pequeño. Esta clase de recipientes suele emplearse para el almacenamiento y el transporte de gases como oxígeno, anhídrido carbónico, acetileno, propano, butano e hidrógeno y debido a sus características hacen muy cómodo el traslado de estas sustancias. Cuando se almacenan esos recipientes en la fábrica, debe tenerse presente su peso relativamente grande, debido a su robusta construcción, con el fin de no sebrecargar los pisos de los locales.

6.8.4 Almacenamientos en recipientes de presión, botellas y líneas de tuberías

La distinción entre recipientes de presión, botellas y tuberías es arbitraria; todos ellos se pueden utilizar para el almacenamiento de gases a presión. Un recipiente de presión de almacenamiento suele ser casi siempre una instalación permanente. El almacenamiento de gas a presión no sólo reduce el volumen del mismo sino que, en muchos casos, lo licúa a la temperatura ambiente. Algunos gases que se encuentran en esta categoría son el dióxido de carbono, varios gases de petróleo, el cloro, el amoníaco, el dióxido de azufre y algunos tipos de freón. Los tanques de presión se instalan con frecuencia subterráneos.

El término "botella" se aplica en general a un recipiente de presión suficientemente pequeño para ser portátil. Las botellas son adecuadas para las cantidades pequeñas de muchos gases incluyendo el aire, el hidrógeno, el nitrógeno, el oxígeno, el argón, el acetileno, el freón y el gas de petróleo; algunos de los cuales son utilizables una sola vez.

6.8.5 Almacenamiento de gas en cilindros

Los cilindros están cargados de alta presión, por lo que deben tratarse con cuidado para evitar daños mecánicos (golpes o caídas) o físicos (calentamiento excesivo, arcos eléctricos, entre otros), por tanto, es fundamental tomar en cuenta las siguientes precauciones:

- Es preciso manipular con cuidado los cilindros para no dejarlos caer ni permitir que choquen unos contra otros.
- Los cilindros deben protegerse contra todo desperfecto mecánico mientras están en uso.
- Deben adoptarse las precauciones necesarias para impedir que los dispositivos de seguridad de que están provistos los cilindros se desajusten.
- Si los cilindros no están en uso, las válvulas de salida deben mantenerse herméticamente cerradas, aunque se crea que aquellos están vacíos.
- Cuando se hayan agotados los cilindros deben cerrarse las válvulas de descarga y atornillarse con firmeza los casquetes de protección.
- Antes de unir al cilindro el regulador de presión necesario, debe abrirse ligeramente la válvula y cerrarse luego para asegurarse de que está en buen estado de funcionamiento.
- Para manipular las válvulas sólo deben emplearse las llaves y las herramientas especiales proporcionadas por el fabricante.
- Hay que asegurarse de que las roscas del cilindro y la de los reguladores coinciden, ya que es posible que sus filetes varíen para los diferentes gases.
- Los reguladores y los manómetros que se utilizan con un gas determinado no deben emplearse en los cilindros que contengan otros gases.
- Deben protegerse todos los cilindros contra las elevaciones excesivas de temperatura y los climas extremosos; no deben exponerse a una humedad prolongada.

- Para evitar confusiones, los cilindros llenos deben almacenarse en un sitio aparte de los vacíos.
- Los cilindros que contengan gas comprimido no deben almacenarse cerca de materiales muy inflamables.
- En las operaciones de soldadura y cortes de metales, no debe permitirse que las chispas choquen contra los cilindros.
- El acetileno se transporta en cilindros llenos de un material poroso empapado con un disolvente apropiado (por lo general, acetona).
- Deben tomarse todas las precauciones posibles para impedir que el oxígeno se ponga en contacto con el aceite y las grasas.
- Los cilindros recibidos en la fábrica deben tener una etiqueta normalizada bien visible que indique la clase de gas que contienen; el color de la etiqueta muestra si el gas es inflamable, corrosivo o inerte.
- El oxígeno nunca debe utilizarse como sustituto del aire comprimido.
- Almacenar los cilindros en áreas destinadas sólo para ellos.
- Si se almacenan en interiores deben estar en un lugar seco, ventilado y con las señalizaciones adecuadas.
- Cuando se almacenan en el exterior, es necesario protegerlos del ambiente y del sol.
- Los cilindros siempre deben estar en posición vertical, encadenados a una pared o baranda.
- En general un cilindro nunca debe calentarse a más de 50 ºC.

6.8.6 Tipos de cilindros

Los cilindros para almacenar gases pueden encontrarse en diversas formas y tamaños (véase figura 6.25).

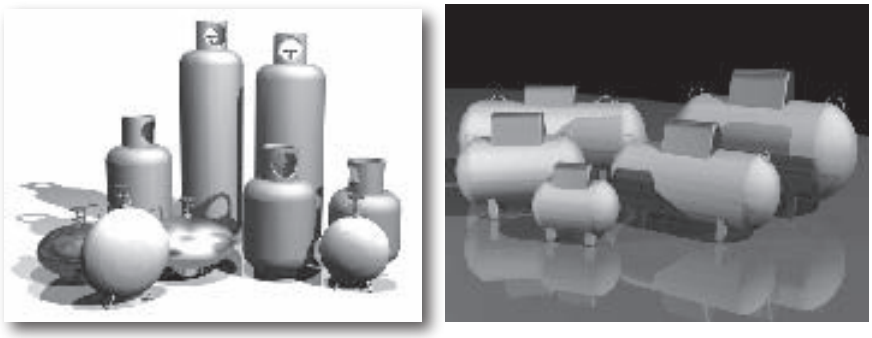


Figura 6.25 *Diferentes diseños y tamaños de contenedores para gases.*

6.8.7 Precauciones generales de seguridad en el manejo de gases

Todos los gases, en especial si son más pesados que el aire, pueden causar asfixia al desplazar al oxígeno en el aire atmosférico, o reducir el porcentaje de oxígeno a un nivel muy bajo. Esto casi siempre en ambientes cerrados o poco ventilados.

Debido a que los gases son incoloros y muchas veces inodoros, no es posible apreciar los escapes a simple vista y quizá los síntomas de asfixia se detecten demasiado tarde, por ello deben tomarse precauciones, verificando todas las posibles causas de escape y controlando de manera regular el estado de las válvulas, conexiones, tuberías y demás.

Cuando sea necesario abrir la válvula, la persona nunca debe colocarse frente al flujo de gas ni interponer las manos. En el caso de gases medicinales (de uso médico) es indispensable que quién los administre conozca bien los efectos de cada gas y los porcentajes correctos de mezclas de aire y otros gases. Por ejemplo, el anhídrido carbónico es más pesado que el aire, por lo cual, puede acumularse en lugares bajos y cerrados. Deben mantenerse precauciones respecto de la ventilación adecuada en los lugares en que se use o almacene algún elemento gaseoso, debido a que desplaza al aire y actúa sobre los centros respiratorios.

6.8.8 Almacenamiento de materiales específicos

El almacenamiento de ciertos materiales puede hacerse utilizando determinados tipos de contenedores que a continuación se explican.

a) **Envases rígidos.** Pueden ser de tiras y alambres, cajas de madera y cartón. Un buen método es colocarlos sobre plataformas o paletas, a fin de que sea posible manejarlos con equipos mecánicos y preservarlos de la humedad.

b) **Herramientas y equipos.** Su disposición adecuada en las bodegas facilita su entrega y mantenimiento, con lo cual se disminuye el riesgo de accidentes.

c) **Tubos y equipos.** Su almacenamiento debe efectuarse en caballetes especiales construidos en lugares secos, que no estén expuestos a la excesiva circulación de personas y tan amplios como para facilitar su retiro y depósito.

d) **Explosivos.** Su almacenamiento debe realizarse de acuerdo con las normas legales establecidas.

e) **Sacos.** Deberán almacenarse cruzados, con la abertura o boca hacia adentro de la pila.

f) **Tambores.** Pueden almacenarse en forma de costado y piramidal. Si se apilan en forma vertical sobre su base, entre cada ítem de tambores deberán colocarse tablones para su mayor estabilidad. Si se almacenan sobre su costado, en forma no piramidal, deberán colocarse bastidores especialmente construidos.

Ejemplo 4

El patio de almacenamiento de un ingenio azucarero tiene las siguientes dimensiones 131,23 ft de largo y 1181,1 in de ancho. La capacidad de almacenamiento es de 25 Ton/día. Al procesar la caña se obtiene un subproducto que es la melaza. Se reporta el dato técnico de que por cada tonelada de caña se obtienen 23,78 kg de melazas (densidad = 1,44 kg/L). La melaza se envía a tanques de almacenamiento con una capacidad de 254,550 gal.

Determine:

a) Área del patio de almacenamiento.

b) Volumen de melaza obtenida si se procesará toda la materia prima en un mes.

c) ¿Cuántos tanques se requieren para almacenar el subproducto al procesar toda la materia prima en un año?

Solución:

a) Las dimensiones del patio en m^2 son:

$$\text{largo} = 131{,}23\ \text{ft} \times \frac{30{,}5\ \text{cm}}{1\ \text{ft}} \times \frac{1\ \text{m}}{100\ \text{cm}} = 40\ \text{m}$$

$$\text{ancho} = 1181{,}1\ \text{in} \times \frac{2{,}54\ \text{cm}}{1\ \text{in}} \times \frac{1\ \text{m}}{100\ \text{cm}} = 29{,}99\ \text{m}$$

y sabiendo que

$$\text{superficie} = \text{largo} \times \text{ancho}$$

$$= 40\ \text{m} \times 29{,}99\ \text{m} = 1\,199.6\ \text{m}^2$$

b) Para calcular la masa de melaza se utiliza la relación:

$$\text{masa de maleza} = 25\ \frac{\text{Ton}}{\text{día}} \times \frac{30\ \text{días}}{1\ \text{mes}} = 750\ \frac{\text{Ton}}{\text{mes}}$$

1 Ton caña $\longrightarrow$ 23,78 kg de melaza

750 Ton caña $\longrightarrow$ masa de melaza

$$\text{masa de melaza} = \frac{750\ \text{Ton caña} \times 23{,}78\ \text{kg de melaza}}{1\ \text{Ton caña}} = 17\,835\ \text{kg}$$

y de la definición de la densidad se tiene

$$\text{densidad} = \frac{\text{masa de melaza}}{\text{volumen de melaza}}$$

$$\text{volumen de melaza} = \frac{\text{masa de melaza}}{\text{densidad}} = \frac{17\,835\ \text{kg}}{1{,}44\ \frac{\text{kg}}{\text{L}}} = 12\,385{,}416\ \text{L}$$

c) Para el cálculo del número de tanques se parte de la cantidad en litros de cada tanque

$$254{,}550\ \text{gal} \times \frac{3{,}785\ \text{L}}{1\ \text{gal}} = 963{,}347\ \text{L}$$

Por lo cual:

$$\text{número de tanques} = \frac{12\,385{,}416\ \text{L}}{963{,}347\ \frac{\text{L}}{\text{tanque}}} = 13\ \text{tanques}$$

6.8.9 Prevención de accidentes directamente relacionados con la contaminación en los almacenamientos

Todos los recintos habilitados para almacenar diversos materiales deben contar con señales de prevención de accidentes laborales y siniestros y, por ende, debería darse al personal que labora en ellos un entrenamiento adecuado para tales efectos.

Todas las señales de prevención deben estar ubicadas en los recintos de almacenaje a la vista, obligando al personal hacer uso de todas las medidas y dispositivos de seguridad dispuestos por la empresa.

Es necesario, además, programar las operaciones de limpieza ordinaria y extraordinaria, como la higiene de bodegas, la eliminación de polvo, los residuos y los productos en deterioro, las emanaciones gaseosas y más.

Capítulo

7

Operaciones unitarias (segunda parte)

(*Jupiter Images Corporation*)

7.1 Formación de mezclas

Entre las operaciones unitarias de formación de mezclas están las que permiten obtener mezclas homogéneas y las que se emplean para generar mezclas heterogéneas. Las primeras tienen una sola fase (por ejemplo, las soluciones salinas o salmueras que están constituidas por sales disueltas en agua, y las soluciones azucaradas, formadas por azúcares disueltos en agua, y que

se clasifican en almíbares, mieles, melazas y néctares, entre otros). Las mezclas heterogéneas tienen más de una fase (por ejemplo, emulsiones, suspensiones y mezclas gasificadas). Por tanto, es posible clasificar las operaciones unitarias que forman mezclas (véase tabla 7.1).

Tabla 7.1. Clasificación general de la formación de mezclas.

Tipo de mezcla	
Homogéneas	**Heterogéneas**
Mezclado	Dispersión
Agitación	Emulsiones
Homogenización	Amasado
	Mezclas gasificadas

7.2 Formación de mezclas homogéneas

7.2.1 Mezclado

El **mezclado** es una de las operaciones unitarias de la ingeniería química más difíciles de someter a un análisis científico. Hasta el día de hoy no se ha desarrollado ninguna fórmula o ecuación aplicable al cálculo del grado de realización al que se verifica la mezcla, o la velocidad con que se realiza, en determinadas condiciones.

Se dice a veces que sólo el consumo de energía eléctrica de un mezclador proporciona una medida real del grado en que se ha completado una mezcla, porque se necesita una cantidad definida de trabajo para mezclar las partículas del material dentro del recipiente que lo contiene. Con todo, esto nunca es verdad en la práctica debido a las interferencias que no es posible evaluar, como las corrientes transversales, las corrientes parásitas que se generan (incluso en las mezclas de plásticos y sólidos) dentro del recipiente.

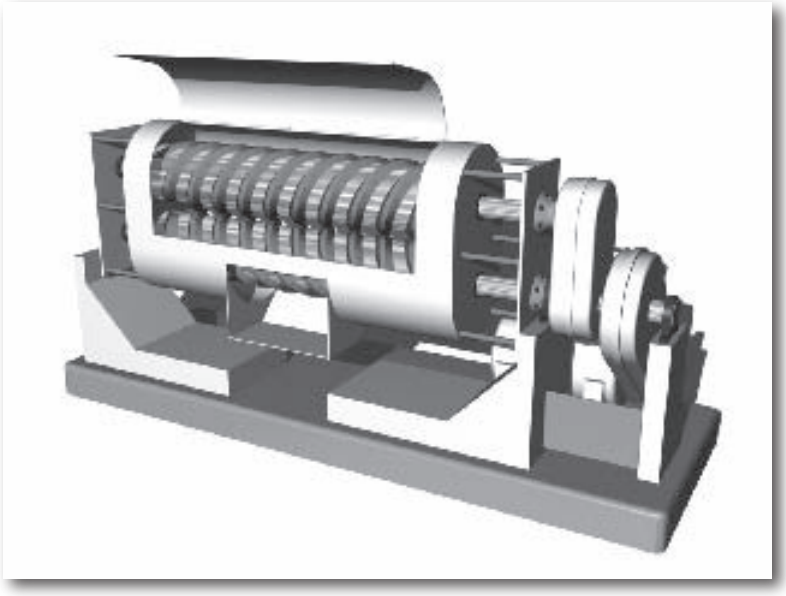


Figura 7.1 *Mezclador para plásticos.*

Tipos de mezcladores

Para diseñar un mezclador adecuado hay que considerar no sólo el elemento mezclador sino también la forma del recipiente. Un elemento mezclador eficaz resultará inútil en un recipiente inadecuado. Además, no debe perderse de vista el resultado exacto que se quiere alcanzar, de modo que pueda obtenerse con un coeficiente de seguridad amplio. De ordinario, el costo adicional que exige aumentar la capacidad del mezclador es insignificante comparado con el costo de toda la instalación que interviene en el proceso. Puesto que el mezclado es una parte fundamental de muchos procesos, es importante que se realice adecuadamente. Un mezclador bien diseñado puede evitar problemas posteriores durante el proceso.

El número de dispositivos que se utilizan para mezclar los materiales es muy grande, y muchos de ellos no se distinguen por su perfección. Para que la tecnología de mezclado pueda avanzar será necesario tomar en cuenta varios modelos fundamentales. Esto no excluye, por supuesto, el desarrollo futuro de modelos nuevos y mejores, pero brinda una base para conseguir cierta normalización, sumamente necesaria.

Los mezcladores se agrupan en cinco clasificaciones primarias:

a) **Mezcladores de flujos o de corrientes:** En este tipo de mezcladores, los materiales se introducen casi siempre por medio de una bomba y la mezcla se produce por interferencia de sus flujos corrientes. Sólo se emplean en los sistemas continuos o circulantes para la mezcla completa de fluidos miscibles.

Tabla 7.2. Tipos de mezcladores de flujo de corrientes.

Nombre del mezclador Flujo de corrientes	Generalidades	Ejemplo de uso industrial
De chorro	Se basan en el choque de un chorro contra otro, ambos a presión.	A veces se emplean para líquidos, pero su mayor aplicación se encuentra en la mezcla de combustibles gaseosos antes de inflamarlos. Un ejemplo son los sopletes oxhídricos.
Inyectores	Son sencillos y poco costosos, se emplean para mezclar cualquier proporción de gases con gases, gases con líquidos, y líquidos con líquidos.	Se usan en la mezcla de combustibles gaseosos antes de inflamarlos. Algunos ejemplos de estos mezcladores son: los mecheros Bunsen, los quemadores de petróleo, las pistolas pulverizadoras, los carburadores, el cañón lanzacemento, los atomizadores y los mezcladores de tobera.
De columna con orificios o de turbulencia	Se basan en la transformación de la energía de presión en energía de velocidad turbulenta.	Se utilizan cuando la viscosidad es lo suficientemente pequeña para permitir que se complete el mezclado en el menor tiempo disponible.
Sistema de circulación mixta	Se emplean para producir una renovación lenta del contenido de grandes depósitos de líquidos por medio de equipos mezcladores relativamente pequeños.	Entre ellos están los elevadores de agua por aire comprimido, los tubos “vomit” (vomitadores), los tubos de tiro largos y las bombas exteriores de circulación.
Bombas centrífugas	Se emplean éstas sin recirculación para mezclar líquidos previamente medidos y a menudo resultan útiles cuando sólo se desea obtener una mixtura.	El tiempo de “retención” suele ser menor de un segundo, que solamente es suficiente para que se produzcan reacciones instantáneas entre materiales inmiscibles.

b) **Mezclador de paletas o brazos:** Éste es quizá el tipo de mezclador más antiguo y consiste en una o varias paletas horizontales, verticales o inclinadas unidas a un eje horizontal, vertical o inclinado que gira axialmente dentro del recipiente (aunque no siempre está centrado con éste). De esta manera, el material que se mezcla es empu-

jado o arrastrado alrededor del recipiente siguiendo una trayectoria circular. Cuando se trata de líquidos poco espesos en recipientes sin placas desviadoras, las paletas imprimen siempre un movimiento de remolino a todo el contenido. En todos los casos, el material que se encuentra directamente en la trayectoria de las paletas es empujado más rápido que el que se encuentra entre ellas. Este hecho tiene gran influencia para cambiar la relación existente entre las láminas (o estratos) paralelas a las paletas. Sin embargo, una vez que se ha realizado este importante paso, las paletas carecen de medios eficaces para generar, en dirección perpendicular a ellas, fuerzas que corten de manera transversal esos estratos y que los mezclen unos con otros. Éste es su principal defecto: la estratificación se destruye en gran parte instalando en el recipiente placas desviadoras; las paletas pueden trabajar entonces con mayor lentitud, acortándose para que la potencia necesaria sea baja. Al doblar las paletas aumenta la circulación axial en un recipiente con placas desviadoras, pero no tiene efecto con un líquido de baja viscosidad en un contenedor sin dichas placas.

Los mezcladores de paletas o brazos se emplean más que los de ningún otro tipo porque 1) son los más antiguos, los más conocidos y los primeros en los que se piensa; 2) a menudo son de construcción casera; 3) su costo inicial es muy bajo; y 4) dan un resultado satisfactorio en muchas clases de trabajos. Por ejemplo, es indispensable para la mezcla o amasado de pastas espesas o plásticas. Con todo, cuando es fácil que se produzca una estratificación (como sucede en la suspensión de sólidos bastante densos en líquidos ligeros o en la mezcla de pastas poco espesas o líquidos bastante viscosos) el mezclador de paletas es ineficaz, por muy bien diseñado que esté, desde los puntos de vista de la potencia necesaria y de la calidad de los resultados obtenidos (véase tabla 7.3).

Tabla 7.3. Tipos de mezcladores de paleta o brazos.

Nombre del mezclador De paletas o brazos	Generalidades	Ejemplo de uso industrial
De brazos rectos o de paletas en forma de remos	Es el modelo más común de mezclador, y puede ser horizontal o vertical, el mezclador de rastrillo es una modificación a este tipo de mezclador.	Produce un empuje ascendente o descendente en el líquido.
Paletas con lengüetas o dedos fijos intercalados	Puede ser horizontal o vertical, impiden la formación de un remolino en toda la masa y contribuye además a producir corrientes más o menos en ángulo recto con las lengüetas, facilitando así la mezcla.	Para mezclar líquidos densos, pastas y amasados como pinturas, pastas de almidón y colas.
Tipo herradura	El elemento mezclador se amolda siempre a las paredes del recipiente, barriéndolas o incluso rascándolas.	Se utilizan en las marmitas, por lo general en trabajos rudos como la mezcla de grasas, las fusiones de cáusticos, el amasado de pastas espesas.
Paletas corredizas	Para cargas muy grandes de pastas aguadas de sedimentación lenta.	Mantienen en suspensión el material y los tamaños de los recipientes usados en la lechada de cemento y la pulpa de papel.
Cubetas giratorias con paletas excéntricas	El recipiente gira sobre una mesa giratoria y las paletas excéntricas giran también dentro del mismo.	Para mezclar pequeñas cantidades de pintura espesa y de pasta para tintas.
Paletas de doble movimiento	Para materiales pastosos, como los adhesivos, las grasas y los cosméticos, y también para la confección de helados. Dos grupos de paletas giran en direcciones opuestas.	Una mejor transmisión del calor hace posible calentar o enfriar cargas en la cuarta parte del tiempo necesario en recipientes no provistos de agitadores con rascadores.

Continúa

Continuación

Paletas de movimiento Planetario	Una paleta gira alrededor de un eje situado excéntricamente con respecto al caldero o recipiente y, al mismo tiempo, el eje gira alrededor de una línea central del caldero.	Se usa para pastas y masas, especialmente en las industrias alimenticias, pastelerías y fabricación de mayonesas.
Batidor o emulsificador	Funciona siempre a gran velocidad; debido al efecto de batido real de los dos fluidos se produce una fina división o emulsión.	Tiene dos rejillas que se entrelazan y giran en sentidos opuestos. Se usa mucho para la preparación de la crema batida (líquido y gas), la mayonesa (líquidos inmiscibles).
Elevador por aire	El aire a presión obliga al líquido más o menos espeso a subir por el tubo central hasta llegar al tubo distribuidor giratorio situado en la parte superior. La lechada sale de este último y se distribuye por toda la superficie.	Este tipo resulta útil para mantener en suspensión grandes masas de limos.
Amasador	Con dos brazos que giran en sentido opuesto en un recipiente.	Se usa para mezclar masas espesas, plásticas y gomosas.

c) **Mezcladores de hélices, incluidos algunos de tipo helicoidal:** Son poco costosos, sencillos y compactos; se utilizan para mezclar materiales en un gran número de casos. Su acción mezcladora se deriva de que sus aletas helicoidales al girar empujan constantemente hacia delante, lo que para todos los fines puede considerarse un cilindro continuo de material, aunque el deslizamiento produce corrientes que modifican bastante esta forma cilíndrica. Puesto que la hélice hace que un cilindro de material se mueva en línea recta, es evidente que la forma del recipiente decidirá la disposición subsiguiente de esta corriente. Por esta razón, es importante la forma del recipiente, no obstante, este factor se descuida a menudo. Las hélices son eficaces con los líquidos cuya viscosidad aparente no sea superior a 2 000 centipoises, con sólidos ligeros o sin ellos, aunque pueden utilizarse con viscosidades hasta de 4 000 centipoises. Con sólidos, cuya densidad es diferente a la de los líquidos, se presentan dificultades para impedir la sedimentación, ya que es casi imposible dirigir la corriente producida por la hélice a todas las partes del tanque. La situación de la hélice dentro del tanque influye sobre la naturaleza de la mezcla producida (véase tabla 7.4).

Tabla 7.4. Tipos de mezcladores de hélice.

Tipo de mezclador Flujo de corrientes	Generalidades	Ejemplo de uso industrial
Para mezclar gases	Activar la circulación de los gases y mezclarlos.	Para mezclar gases en circulación continua.
Ejes verticales	El empuje de las hélices puede ser ascendente, descendente o bien de doble efecto, o sea ascendente y descendente.	
Hélice descentrada	La hélice se monta en el costado del recipiente o cerca de él con su eje inclinado respecto a la vertical.	Se emplea un motor eléctrico directamente conectado al eje de la hélice para que funcione a su plena velocidad, pero para viscosidades mayores deberá usarse una máquina con transmisión por engranajes.
Hélice al costado del recipiente	El remolino producido hace que la hélice influya gradualmente en todo el contenido del recipiente. Este movimiento es útil cuando se mezclan grandes cargas de líquido ligero.	Para sustancias como gasolina o soluciones acuosas, sin que sea necesaria una mezcla muy rápida.
Hélice en un tubo de aspiración	Una o varias hélices están rodeadas por un tubo, quedando por lo general un pequeño espacio entre él y las aletas de la hélice.	Tiene lugar una circulación muy completa de gran intensidad con la consiguiente uniformidad de la acción mezcladora.

d) **Mezcladores de turbina o de impulsor centrífugo:** Consiste en una o varias bombas centrífugas trabajando en un recipiente casi sin contrapresión; el material entra en el impulsor de manera axial por su abertura central. Los álabes aceleran el material y lo descargan del impulsor o rodete más o menos de modo tangencial y a una velocidad bastante elevada. La turbina puede llevar una corona directriz con paletas curvas fijas (difusores) que desvían esas corrientes tangenciales hasta hacerlas radiales. Todo el cambio de dirección de vertical a horizontal y radial se realiza suavemente con la menor pérdida posible de energía cinética y, en consecuencia, las corrientes radiales llegan a gran velocidad aun a las partes más alejadas del recipiente; todo el contenido se mantiene en movimiento vigoroso y dirigido.

La potencia que necesita un mezclador de turbina es aproximadamente 30 veces menor que la que requiere una bomba centrífuga exterior circulante que mueva el mismo volumen de líquido, y el impulsor mezclador gira con una velocidad moderada. Por ejemplo, un rotor de 91,5 cm (36") gira a unas 75 rpm. Los mezcladores de turbinas son útiles para mezclar líquidos viscosos o lodos espesos, suspender sólidos pesados, efectuar disoluciones rápidas, realizar buenas dispersiones y hacer mezclas en recipientes de formas irregulares (véase tabla 7.5).

Tabla 7.5. Tipos de mezcladores de turbina o de impulsor centrífugo.

Nombre del mezclador De turbina o de impulsor centrífugo	Generalidades	Ejemplo de uso industrial
Soplante de turbina o ventilador centrífugo	Mezcla gases muy íntimamente cuando se les hace llegar a él en forma continua y en las proporciones deseadas.	Manipulación de grandes volúmenes de gases con un consumo de potencia pequeño.
Sencillo de turbina	Es particularmente conveniente para mezclar líquidos de viscosidad media o baja, en especial cuando se le coloca excéntrico en el recipiente.	En la manipulación de limos de consistencia baja o media y con materiales fibrosos de consistencia media, como la pasta de papel en suspensión.
Con paletas directrices fijas	Pueden usarse uno o más impulsores o rodetes.	Adecuado para los materiales de viscosidad baja o media.
Turbo dispersador	Consiste en un rodete de turbina que gira con un tamiz o una placa perforada, interpuesto entre dichos rodetes y las paletas directrices fijas.	Contribuyen a la realización de dispersiones y a la disolución de materiales que serían difíciles en mezcladores en otros aparatos más sencillos.
Absorbedor turbogas	Estimula el contacto entre gases y líquidos.	Las hidrogenaciones, las oxidaciones, las cloraciones, las purificaciones, etc., se facilitan muchísimo a causa del largo recorrido del gas a través del líquido sometido a una violenta agitación.

e) **Mezclador de tambor o de volteo:** Este mezclador es sencillo pero útil, consiste en un recipiente cilíndrico montado sobre un eje horizontal y que gira con él. El contenido se mezcla a medida que el cilindro o tambor gira; se usa mucho para integrar polvos y hormigón o concreto. No tiene igual para los trabajos que implican dos o tres fases con materiales tan diferentes como piedras, polvos y agua. Hay varias modificaciones de esta categoría; a veces el tambor está montado sobre el eje de manera oblicua, para que el impulso irregular acelere y facilite la mezcla; otras, como sucede en el mezclador de hormigón, se construye con placas desviadoras, rascadores o aradores internos que desvían el contenido hacia la salida. En otras variantes el recipiente gira en un sentido y las aletas interiores en el opuesto. Una modificación que se emplea, por ejemplo, en la mezcla del fieltro de pelo, tiene aletas desviadoras longitudinales. Al colocar las aletas desviadoras en discos perpendiculares al eje para que dividan al tambor en varios compartimientos puede adaptarse este tipo para funcionamiento continuo (véase tabla 7.6).

Tabla 7.6. Tipos de mezcladores de tambor o de volteo y tipos diversos.

Nombre del mezclador	Generalidades	Ejemplo de uso industrial
De tambor o de volteo		
De doble cono	Consiste en un anillo cilíndrico horizontal a cuyas bases están unidos dos conos; el conjunto gira con lentitud sobre cojinetes laterales. El interior suele estar pulido y libre de obstrucciones para facilitar su limpieza.	Como no hay dos partículas que sigan trayectorias paralelas y puesto que además hay una gran diferencia de velocidades entre las diferentes partículas, se logra pronto una gran homogeneidad.
Otros tipos		
Molino coloidal	Se usa cuando es necesario producir dispersiones muy finas.	Los pigmentos pueden dispersarse en aceites con el tamaño inicial de las partículas molidas, pero es dudoso que en el aparato tenga lugar una molienda efectiva.
Homogeneizador	Puede describirse como una bomba positiva de alta presión en la que ésta se descarga de manera radial pasando por un disco o válvula fuertemente oprimido contra el extremo de la tubería de descarga por medio de un resorte.	Se usa para dividir las grasas en las mezclas destinadas a la elaboración de helados, en la leche evaporada y otros productos alimenticios, y también para la fabricación de emulsiones. No es recomendable utilizarlo con materiales que produzcan un efecto abrasivo.
Votator	Se emplea cuando se requiere una transmisión de calor rápida, además de un producto acabado suave y de alta consistencia.	En la parafina, la manteca de cerdo y los helados.
De conos giratorios	Está compuesto de uno o más conos truncados huecos que giran alrededor de su eje.	Para agitar materiales de alta viscosidad o consistencia aparente, en especial los que exhiben seudoplasticidad o tixotropía.

7.2.2 Agitación

Es una operación unitaria importante previa a cualquier proceso químico cuyo propósito sea unir corrientes; puede ser una operación separada o bien integrada al mismo proceso, como en un sistema reactivo, un burbujeador donde ocurra la absorción de un gas, un tanque donde haya un intercambio de calor, entre otros.

Hay diferentes propósitos para agitar, mismos que dependen directamente del objetivo del proceso en sí, y puede ser:

1. Suspender partículas sólidas.
2. Mezclar líquidos miscibles, como alcohol y agua.
3. Dispersar un gas en un líquido con la formación de pequeñas burbujas.
4. Dispersar un segundo líquido, inmiscible con el primero, para formar una emulsión o una suspensión de gotas muy finas.
5. Promover la transferencia de calor entre un líquido y otro fluido por medio de un serpentín o una chaqueta.

Un sistema de agitación consiste de tres partes principales:

- El tanque donde ocurre el mezclado.
- Los impulsores.
- Los deflectores.

El tanque es el recipiente donde ocurrirá el mezclado de las sustancias que se desea poner en contacto y debe tener las dimensiones necesarias para proveer un tiempo de residencia

adecuado. Los impulsores tienen la función de promover el mezclado, y de acuerdo con los fluidos de trabajo, se decidirá si son de turbina, de propela marina, o bien, de paletas. Estos impulsores estarán sujetos a una flecha que se mantendrá en movimiento gracias a la energía suministrada por un motor eléctrico; la posición de dicha flecha puede ser centrada o excéntrica. En la literatura general es posible encontrar información más detallada acerca de los distintos impulsores, tanto de sus configuraciones como de sus aplicaciones.

Los deflectores en general son 4 o 6, situados en las paredes del tanque, y su función es destruir zonas muertas que se presentan cuando se aplican altos regímenes de turbulencia. También se emplean para evitar la formación de vórtices.

Las variables de interés en un proceso de agitación son:

1. El nivel de agitación, para que se desarrolle el mezclado correctamente.
2. Con lo anterior, se implica cierta superficie de contacto (en caso de ser fluidos heterogéneos), o bien, un tiempo adecuado de agitación en el que se asegure que el mezclado se realiza en la medida deseada.
3. La potencia del motor que se necesita para desarrollar el mezclado.
4. Los impulsores correctos.

Agitadores de paletas

Suelen girar con lentitud puesto que tienen una amplia superficie de acción sobre el fluido; se emplean como elementos de floculación cuando deben añadirse al agua residual o a los fangos coagulantes como el sulfato férrico o de aluminio, o adyuvantes a la coagulación, como los polielectrolitos y la cal.

La coagulación se promueve, de modo mecánico, con una agitación moderada de las palas girando a velocidades bajas. Esta acción se complementa, en ocasiones, con la disposición de unas hojas o láminas estáticas entre las palas giratorias a fin de reducir el movimiento circular de la masa de agua y favorecer el mezclado. El aumento del contacto entre partículas conduce a un incremento del tamaño del flóculo, pero una agitación demasiado vigorosa puede producir tensiones que podrían destruir los flóculos formando partículas de menor tamaño. Es importante controlar la agitación, de modo que los tamaños de los flóculos sean los adecuados y sedimenten pronto. La producción de un buen flóculo requiere un tiempo de detención de entre 10 y 30 minutos.

Los fabricantes de equipos han llevado a cabo numerosos estudios para obtener las configuraciones idóneas de las dimensiones de las paletas, la separación entre ellas y la velocidad de rotación. Se ha constatado que una velocidad lineal de aproximadamente 0,6 a 0,9 m/s en los extremos de las paletas crea suficiente turbulencia sin romper los flóculos.

7.3 Formación de mezclas heterogéneas

7.3.1 Dispersión

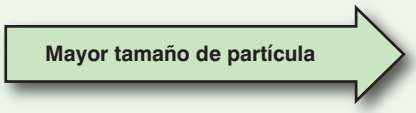
Si en un sistema heterogéneo los componentes están “bien mezclados” se dice que hay una dispersión, puesto que un componente se encuentra disperso en el seno de otro.

En una solución, las partículas son aproximadamente del tamaño de las moléculas del soluto, es decir, del orden de 1 a 10 Å, en cambio en una mezcla heterogénea las partículas son grandes y a veces pueden detectarse a simple vista.

Como se observa, no hay una frontera precisa entre la suspensión coloide y la solución; la diferencia no reside sólo en el tamaño de las partículas dispersas, aunque sea el

carácter principal, sino también en sus propiedades especiales. A continuación en la tabla 7.7 se presenta la comparación de estos sistemas.

Tabla 7.7. Comparación entre los principales sistemas encontrados en la formación de mezclas homogéneas y heterogéneas.



Propiedades características	Homogéneas	Heterogéneas	
	Soluciones	Dispersiones coloidales	Suspensiones
Tamaño de partícula	del tamaño de los átomos, iones o pequeñas partículas (1-10 Å)	con grandes grupos de átomos, iones o moléculas (clusters) (10-10 000 Å)	pueden observarse con un microscopio de baja resolución (>10 000 Å)
Homogéneas	sí	sí (pero en límite)	no
Efecto de Tyndall	sí	sí	no
Estabilidad a la gravedad	estables a la gravedad	el movimiento browniano evita la deposición de las partículas	las partículas se depositan
Separación por filtración	no	no	sí

7.3.2 Emulsión

Las emulsiones se obtienen a partir de la mezcla y la agitación prolongada de líquidos no miscibles entre sí, como el agua y el aceite, elementos que al estar en reposo, acaban por separarse en dos capas. Una *emulsión* se define como **toda dispersión formada por dos sustancias líquidas no miscibles, una de las cuales se halla dispersa en la otra en forma de gotas pequeñísimas**, de 10^{-4} a 10^{-5} cm. Algunas emulsiones conocidas son la leche, la mayonesa, la crema, la mantequilla, los aderezos para ensaladas, los insecticidas con base en petróleo, el aceite de hígado de bacalao, entre otros.

La separación de emulsiones es muy común en las industrias; por ejemplo, al separar la mantequilla de la leche, el petróleo y el agua en los pozos petroleros, y en la industria de lavado al separar la grasa y la suciedad de la ropa, por mencionar algunos usos.

Cuando se quiere que una mezcla conserve su estado de emulsión se utilizan agentes emulsionantes como la yema de huevo, que actúa como tal en muchas salsas semilíquidas. Otros son las soluciones jabonosas y los detergentes, que hacen que la grasa y el agua se emulsionen, lo que permite la limpieza de trastos y ropa.

El término coloide viene del griego *kolla* (cola) y *eidos* (semejante), que significan "especie de cola", debido a que primero se designó de este modo a las sustancias como cola de pegar, gelatina, jaleas, albúminas, engrudo de almidón y otros compuestos orgánicos integrales de los seres vivos. Los coloides son muy importantes en la industria, por ejemplo, en el comportamiento de los plásticos. El hule, las pinturas, el cemento, la cerámica, los detergentes y los aerosoles se relacionan también de alguna manera con ellos.

Los *coloides* son **dispersiones heterogéneas de dos fases intermedias entre soluciones y precipitados**, con partículas dispersas de tamaño comprendido entre 10^{-4} y 10^{-7} cm, no sedimentables por la gravedad, dotadas de movimiento browniano, que presentan el fenómeno de Tyndall, con fases no separables por métodos mecánicos ordinarios.

7.4 Separación de mezclas

Las operaciones unitarias relacionadas con la separación de mezclas se clasifican, en forma general, en las que separan mezclas homogéneas en las que sólo existe una fase, ya sea sólida, líquida o gaseosa (por ejemplo, salmueras, almíbares, alcohol y otras) y las que separan mezclas heterogéneas en las que se observa más de una fase, ya sea sólido-líquido, sólido-gas, líquido-gas o la combinación de fases líquido-líquido, sólido-líquido-gas, entre otras; por ejemplo, sólidos suspendidos en líquidos, gases suspendidos en líquidos o en sólidos, líquidos miscibles o líquidos inmiscibles, entre otros.

A continuación se presentan las operaciones unitarias utilizadas en la separación de mezclas.

- Separación de mezclas heterogéneas.
  - Filtración.
  - Centrifugación.
  - Decantación.
  - Tamizado.
  - Prensado.
  - Sedimentación.
  - Flotación.
  - Extracción.

7.4.1 Separación de mezclas homogéneas

Destilación

Es un proceso de separación que consiste en concentrar uno o más de los componentes de una mezcla volátil por medio de la transferencia simultánea de calor y masa. Para llevar a cabo la operación se aprovecha la diferencia de volatilidad de los constituyentes de la mezcla, separándolos o fraccionándolos en función de su temperatura de ebullición. Se usa para concentrar mezclas alcohólicas y separar aceites esenciales así como componentes de mezclas líquidas que se deseen purificar (véase tabla 7.8).

Tabla 7.8. Generalidades de la destilación.

Tipo de mezcla	
Homogénea	
La destilación elimina uno o más de los componentes de una mezcla volátil por medio de la transferencia simultánea de calor y masa, se aprovecha la diferencia de volatilidad de los constituyentes de la mezcla, separándolos, fraccionándolos en función de su temperatura de ebullición.	
Por arrastre de vapor	Se emplea vapor para provocar el arrastre de la sustancia volátil que se desea concentrar, esta sustancia debe ser insoluble en el agua, se usa principalmente para obtener esencias aromáticas.
Diferencial	La mezcla se hace hervir y el vapor generado se separa del líquido, condensándolo tan rápidamente como se genera. Los aparatos usados para este fin reciben el nombre de alambiques.
Instantánea o flash	Implica la evaporación de una fracción del líquido, en general por calentamiento manteniendo al vapor y al líquido el tiempo necesario para que el primero alcance el equilibrio con el segundo, separando ambos al final.
Fraccionada	Es el método que más se usa en la actualidad para separar los componentes de una mezcla líquida, incluye el retorno de una parte del vapor condensado al equipo, de tal manera que el líquido que regresa entra en contacto íntimo a contracorriente con los vapores que se dirigen al condensador.

Los equipos empleados en este tipo de destilación son torres o cilindros metálicos por los que pasan los vapores y los líquidos generados. Dentro de estas columnas se encuentran pla-

tos con perforaciones o empaques de cerámica para tener un mayor contacto líquido-vapor. Los productos en esta operación se localizan como sedimentos o lodos y, en algunos casos, breas en el fondo de las torres o tanques de destilación; como cabezas líquidas o gaseosas en lo alto de las torres y como colas líquidas en la parte baja de éstas (véase figura 7.2).

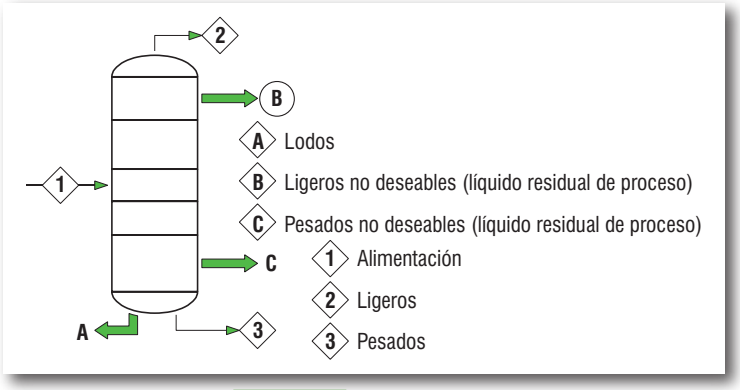


Figura 7.2 *Destilación.*

En una mezcla simple de dos líquidos solubles entre sí, la volatilidad de cada uno es perturbada por la presencia del otro. El grado de separación producido por una destilación simple depende sólo de la presión de vapor o la volatilidad de los componentes de la mezcla a esa temperatura y de la presión a la que se realice la separación. Esta sencilla relación la enunció por primera vez el químico francés François Marie Raoult (1830-1901) y se llama **ley de Raoult**; sólo se aplica a las mezclas de líquidos muy similares en su estructura química, como el *benceno* y el *tolueno*. En la mayoría de los casos se producen amplias desviaciones de esta ley; si un componente sólo es ligeramente soluble en el otro, su volatilidad aumenta de modo anormal. Por ejemplo, la volatilidad del alcohol en disolución acuosa diluida es varias veces mayor que la predicha por la ley de Raoult. En disoluciones de alcohol muy concentradas, la desviación es aún mayor: la destilación de alcohol de 99% produce un vapor de menos de 99% de esta sustancia; por esta razón no puede ser concentrada por destilación más de 97%, aunque se realice un número infinito de destilaciones.

Una de las aplicaciones industriales de la destilación es la obtención de bebidas alcohólicas de muy variadas características (véase tabla 7.9).

Tabla 7.9. La operación de destilación y sus productos representativos.

País o zona geográfica	Fermentación obtenida	Materia prima principal	Nombre del destilado obtenido
Asia	kumiss	leche de burra o yegua	arika
Cárpatos	fermentado	papas y cereales	vodka
Ceilán e India	toddy	arroz y melaza	arrack
China	tchoo	arroz y mijo	sutchú
Escocia	cerveza	malta de cebada	whisky
España	vino	uvas	aqua vini
España y Francia	melaza de caña	caña de azúcar	ron
Francia	fermentado	uvas	champagne
Inglaterra	aguamiel	miel	aguamiel destilada

Continúa

Continuación

Irlanda	cerveza	malta, avena y cebada	usquebaugh
Italia	vino	uvas	brandy
Japón	sake	arroz	sochu
México	fermentado agua miel	agave maguey	tequila pulque
Países eslavos	brandy de ciruela	ciruelas	slivovitza
Tartaria Caucásica	kefir	leche de burra o yegua	skhou

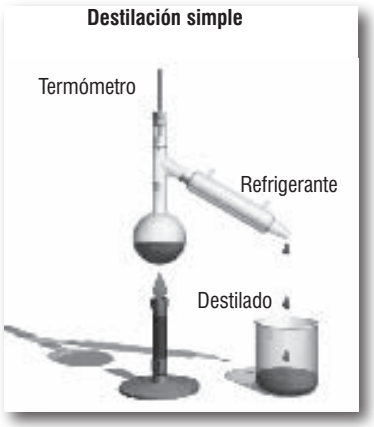


Figura 7.3 *Destilación simple.*

Figura 7.4 *Destilación fraccionada.*

Otras operaciones unitarias se explican en la tabla 7.10.

Tabla 7.10. Generalidades de las operaciones unitarias para separación de mezclas homogéneas.

Tipo de mezcla
Homogénea
Evaporación: es necesario dar calor a la disolución para que llegue a su temperatura de ebullición, y para que se evapore parte de la disolución, se utiliza para eliminar el vapor formado por la ebullición de una solución líquida para así obtener una solución más concentrada.
Secado: reduce la humedad que contienen los productos a fin de hacerlos más aceptables para su comercialización o su empleo posterior.
Cristalización: consiste en obtener sólidos en forma cristalina a partir de una solución líquida saturada, el amplio uso de los materiales en forma de cristales se basa en el hecho de que un cristal que se ha formado a partir de una solución es prácticamente puro, lo que es el fundamento de un método práctico de obtención de sustancias químicas de alta pureza, las cuales, además se pueden almacenar y empacar de manera satisfactoria.
Condensación: es la operación por la cual se hace pasar un vapor, al estado líquido por medio de la transferencia de calor.
Absorción: se utiliza de manera amplia en la industria química para la purificación de corrientes gaseosas, uno o varios de los gases presentes en una corriente gaseosa se disuelven en un líquido llamado absorbente.
Adsorción: es una operación de transferencia de masa, comprende el contacto de líquidos o gases con sólidos, uno o varios componentes de la mezcla líquida o gaseosa se adhieren a la superficie del sólido, es decir, se explota la capacidad de cienos sólidos para hacer que sustancias específicas de una solución se concentren en su superficie.

Para el caso de sistemas donde se encuentran multicomponentes como es el caso de una mezcla de gases en contacto con un líquido, la solubilidad en el equilibrio de cada gas será, en ciertas condiciones, independiente de la de los demás, siempre y cuando el equilibrio se describa en función de las presiones parciales en la mezcla gaseosa. Si todos los

componentes del gas, excepto uno, son básicamente insolubles, sus concentraciones en el líquido serán tan pequeñas que no podrán modificar la solubilidad del componente soluble; entonces es posible aplicar la generalización. Si varios componentes de la mezcla son solubles de manera evidente, la generalización será aplicable sólo si los gases que se van a disolver son indiferentes ante la naturaleza del líquido; esto sucederá con las soluciones ideales. Por ejemplo, el propano y el butano gaseosos de una mezcla se disolverán por separado en un aceite de parafina no volátil puesto que las soluciones que se obtienen son básicamente ideales.

Soluciones líquidas ideales

Una fase líquida se considera ideal cuando es posible calcular la presión parcial en el equilibrio de un gas en la solución sin necesidad de determinaciones experimentales.

Hay cuatro características significativas de las soluciones ideales; todas se relacionan entre sí y son:

- Las fuerzas intermoleculares promedio de atracción y repulsión en la solución no cambian al mezclar los componentes.
- El volumen de la solución varía de manera lineal a la composición.
- No hay absorción ni evolución de calor al mezclar los componentes. Sin embargo, en el caso de gases que se disuelven en líquidos, este criterio no incluye el calor de condensación del gas al estado líquido.
- La presión total de vapor de la solución varía linealmente con la composición expresada en fracción mol.

En particular, los miembros adyacentes o casi adyacentes de una serie homóloga de compuestos orgánicos pertenecen a esta categoría. Así, por ejemplo, las soluciones de benceno en tolueno, de alcohol etílico y propílico o las soluciones de gases de hidrocarburos parafínicos en aceites de parafina, en general, pueden considerarse como soluciones ideales. Cuando la mezcla gaseosa en equilibrio con una solución líquida ideal sigue también la ley de los gases ideales, la presión parcial p^* de un soluto gaseoso A es igual al producto de su presión de vapor p_{sat} a la misma temperatura por su fracción mol en la solución x.

Para el caso de la separación de mezclas heterogéneas se presentan las tablas 7.11 y 7.12.

Tabla 7.11. Operación unitaria de separación de mezclas heterogéneas.

Tipo de mezcla	
Heterogénea	
Filtración: es la separación de los sólidos de un líquido y se efectúa haciendo pasar el líquido a través de un medio poroso, los sólidos quedan detenidos en la superficie del medio filtrante en forma de torta. El medio filtrante deberá seleccionarse en primer término por su capacidad para retener los sólidos sin que se obstruya y sin que haya derrame de partículas al iniciar el proceso.	
Filtro prensa	En éstos se coloca una tela o una malla sobre placas verticales, de manera tal que sean los bordes los que soporten la tela y al mismo tiempo dejen debajo de ella un área libre lo más amplia posible para que pase el filtrado, en general se les llama "filtros de placa y marco", la filtración continúa hasta que el flujo de filtrado es menor que cierto límite práctico o hasta que la presión alcance el valor máximo aceptable.
Filtros espesadores de presión	Su función es separar parte del líquido contenido en una suspensión diluida para obtener otra concentrada, tiene la apariencia de un filtro prensa, sin embargo, no tiene marco y sus placas están modificadas.
Filtros rotatorios	En este tipo de filtros, el flujo pasa a través de una tela cilíndrica rotatoria, de la que es posible retirar la torta de forma continua, la fuerza que se aplica de manera común es la de vacío. En estos sistemas, la tela se soporta sobre la periferia de un tambor sobre el que se forma la torta.

Tabla 7.12. Operación unitaria de separación de mezclas heterogéneas.

Tipo de mezcla
Heterogéneas
Centrifugación: es la operación en la cual se utiliza la fuerza centrífuga para separar los líquidos de los sólidos, en esencia se trata de una filtración por gravedad en donde la fuerza que actúa sobre el líquido se incrementa de modo significativo utilizando la fuerza centrífuga, también es posible aplicarla para efectuar la separación de líquidos inmiscibles.
Decantación: consiste en separar sustancias inmiscibles de distinta densidad, la sustancia más densa va al fondo y se separa en el decantador por la parte de abajo, la sustancia menos densa se queda en la parte superior y es posible observar una división entre las dos sustancias debida a su inmiscibilidad.
Tamizado: separa las partículas sólidas de acuerdo con su tamaño, con coladores de orificios de diferentes tamaños, colocados en forma consecutiva y en orden decreciente, según el tamaño de los orificios, los coladores reciben el nombre de tamiz y están elaborados con telas metálicas.
Prensado: es la separación de líquido de un sistema de dos fases (sólido-líquido) por medio de la compresión, en condiciones que permiten que el líquido escape al mismo tiempo que se retiene el sólido entre las superficies de compresión, el prensado se distingue de la filtración en que la presión se aplica con el movimiento de las paredes de retención en lugar de usar bombeo del material a un espacio fijo.
Flotación: es un medio muy importante para la concentración de los minerales, en especial de los sulfuros. Una suspensión en agua del mineral molido se va agitando en tanto se hace pasar aire a través de la mezcla, pueden agregarse algunas sustancias químicas de tal manera que se formen espumas o burbujas; las partículas del mineral quedan unidas a las burbujas de aire, flotando después con la espuma, la cual se separa en la superficie. Al mismo tiempo, la ganga se sedimenta en el fondo del tanque, los residuos se encuentran en la ganga, pues ésta lleva sólidos residuales, surfactantes, aceite y otros productos químicos.
Extracción: hay dos tipos de extracción: líquido-sólido y líquido-líquido, los dos se usan mucho en casi todas las industrias. La extracción sólido-líquido consiste en tratar con disolvente un sólido formado por dos o más sustancias, así se disuelve preferentemente uno de los dos sólidos, que recibe el nombre de soluto, la operación también se denomina lixiviación, nombre que se usa más al disolver y extraer sustancias inorgánicas en la industria minera, otra de sus denominaciones es la de "percolación", en este caso, la extracción se hace con disolvente caliente o a punto de ebullición. La extracción líquido-líquido es una operación unitaria que consiste en poner una mezcla líquida en contacto con un segundo líquido miscible, que selectivamente extrae uno o más de los componentes de la mezcla, el líquido que se emplea para extraer parte de la mezcla debe ser insoluble para los componentes primordiales. Después de poner en contacto el disolvente y la mezcla se obtienen dos fases líquidas que reciben los nombres de extracto y refinado.

Es importante mencionar el material por el cual se efectúa la operación de filtración; éste puede ser de tela, papel, material poroso o tejido; su función es formar una torta de sólidos y debe cumplir con los siguientes requerimientos:

1. Hacer un filtrado claro que permita remover la fase sólida con facilidad.
2. Ofrecer la mínima resistencia al flujo para la formación rápida de la torta de filtración.
3. Resistir las condiciones del proceso, es decir, ser lo suficientemente fuerte para soportar la torta y aguantar bajo las condiciones extremas del proceso.
4. Tener un alto rendimiento del líquido para un ΔP dado (es decir, no debe obstruirse o sesgarse).
5. Ser químicamente inerte y no tóxico.
6. Permitir el fácil retiro de la torta limpia y completa.
7. No ser costoso en exceso.

7.5 Manejo de sólidos

En la industria son numerosas las operaciones que ameritan el desmenuzamiento, la trituración o la molienda de los sólidos, entre otros procesos. En otras palabras, una **reducción**

de tamaño. Por ejemplo, el trigo y la cebada se muelen para fabricar harinas, las semillas de soya se muelen y trituran para obtener aceite y harina y el azúcar se muele durante su procesamiento industrial. La trituración es un proceso ineficaz ya que del total de la energía utilizada en el proceso, sólo una pequeña porción se enfoca en la obtención de superficies más pequeñas del sólido.

La obtención de partículas pequeñas es de gran interés industrial ya que presentan gran superficie de contacto o bien por su forma, tamaño y número. Debido a que se trabaja con el equipo de trituración o molienda, el producto varía en tamaño, desde un máximo a un mínimo submicroscópico. Es por esto que al realizar el análisis granulométrico las partículas se dividen en dos grandes grupos: las **gruesas** y las **finas**.

En la medida en que el tamaño de las partículas disminuye se incrementa de manera considerable el aporte de energía. Por ello, es importante determinar antes la distribución adecuada de los tamaños de las partículas en el producto con el fin de evitar un despilfarro de tiempo y energía. De aquí que el cálculo de la potencia de una máquina de trituración y molienda sea de mucha importancia, aunado a que sólo una pequeña parte de la energía suministrada por la máquina es absorbida por el sólido.

7.5.1 Reducción de tamaño

Es la operación unitaria en la que el tamaño medio de los sólidos es reducido por la aplicación de fuerzas de impacto, compresión, cizalla (abrasión) o cortado.

La **compresión** se usa para reducir sólidos duros a tamaños más o menos grandes; el **impacto** produce tamaños gruesos, medianos y finos; la **frotación** o **cizalla**, produce partículas finas y el **cortado** se usa para obtener tamaños prefijados (véase figura 7.5).

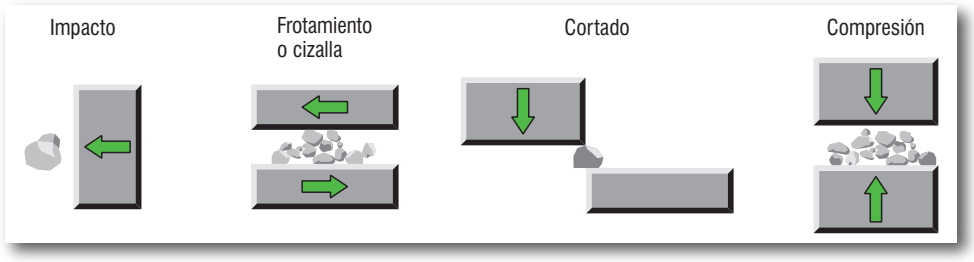


Figura 7.5 *Ejemplo de maneras de reducción de tamaño.*

La reducción de tamaño es muy importante en la industria por las siguientes razones:

1. Facilita la extracción de un constituyente deseado que esté inserto en la estructura del sólido (por ejemplo, la obtención de harina a partir de granos y de jarabe de la caña de azúcar).
2. Es posible obtener partículas de tamaño determinado cumpliendo con un requerimiento específico (por ejemplo, el azúcar para los helados, la preparación de especias y el refinamiento del chocolate).
3. Provoca un aumento de la relación superficie-volumen al incrementar la velocidad de calentamiento o de enfriamiento, la de extracción de un soluto deseado y más.
4. Si el tamaño de las partículas de los productos que se mezclarán es homogéneo y de tamaño más pequeño que el original, la mezcla se realiza de manera más fácil y rápida (como sucede en la producción de formulaciones, sopas empaquetadas, mezclas dulces, entre otros).

Caracterización de las partículas sólidas

Para caracterizar las partículas sólidas hay que hacer énfasis en algunas propiedades de la partícula individual y sobre las cuales se centra el estudio del comportamiento de las partículas sólidas en la reducción de tamaño; entre ellas se encuentra el volumen, el área superficial, la masa, la densidad, el tamaño y la forma de la partícula; estas últimas tres son las de mayor importancia.

- **Densidad:** las partículas de los sólidos homogéneos tienen la misma densidad que el material de origen, mientras que los heterogéneos, al romperse, presentan diferentes densidades entre sí y con relación al sólido de origen.
- **Forma:** la forma de las partículas se usa para formular la ecuación genérica del volumen de la partícula y de su superficie.
- **Tamaño:** esta propiedad es importante ya que es la característica que se le dará al producto.

Maquinaria utilizada en la reducción de tamaño

La tabla 7.13 muestra la maquinaria que se emplea en la reducción de tamaño de las partículas de diferentes materiales, que pueden ser fibrosos (pulpas) y sólidos secos.

Tabla 7.13. Maquinaria utilizada para la reducción de tamaño y diferentes tipos de material.

Máquina	Tipo de producto					Tamaño de partícula			
	1	2	3	4	5	a	b	c	d
Rebanadora			x	x	x	x			
Formadora de cubos			x	x	x	x			
Ralladora				x	x	x	x		
Cortadora de taza			x	x	x		x	x	
Preaplastadora	x			x	x		x		
Molino de martillo	x	x		x	x		x	x	
Molino de impacto fino	x				x		x	x	x
Molino clasificador	x				x				x
Molino de chorro de aire	x	x			x				x
Molino de bola		x							x
Molino de disco	x							x	x
Molino de rodillo	x			x	x			x	x
Formadores de pulpa				x				x	x

1: blando, quebradizo, cristalino; 2: duro, abrasivo; 3: elástico, resistente, cortable; 4: fibroso; 5: termolábil, graso.

a. grumos granujientos; b. particularmente grandes; c. de semifinos a finos; d. de finos a ultrafinos.

Fuente: Fellows, Peter (2000). *Tecnología del procesamiento de los alimentos*. (p. 78).

Molienda

Los términos **trituración** y **molienda** están asociados con el de subdividir en mayor o menor medida, pero ninguno de los dos se utiliza sólo con una connotación precisa aunque, en general, moler implica una mayor subdivisión.

Los residuos generados son los mismos sólidos que se esparcen por algún motivo en el lugar donde se lleve a cabo esta operación. Así también, en el momento de su limpieza se producen lodos por el lavado de los equipos (véase figura 7.6).

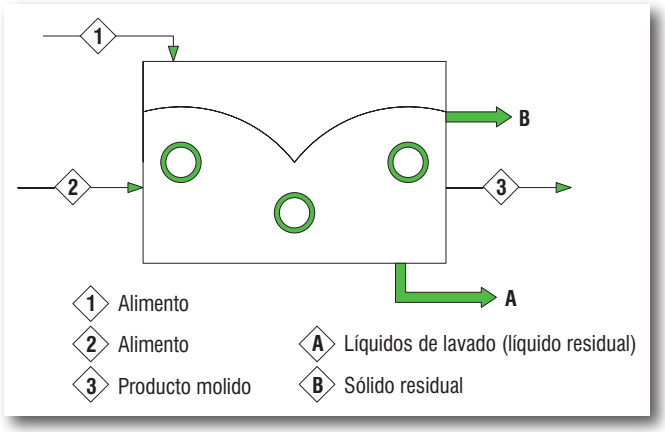


Figura 7.6 *Molienda.*

Molino de bolas o cilindros: es un cilindro de acero lleno hasta la mitad con bolas o cilindros del mismo metal y, para ejercer su efecto reductor, se le aplica un lento movimiento rotacional. A bajas velocidades y con bolas pequeñas reduce el tamaño por medio de la cizalla (o frotamiento) y al utilizar bolas grandes y altas velocidades predomina el impacto.

Molino de martillos: es una cámara cilíndrica cubierta con una plancha perforada de acero que en su interior tiene un rotor con una serie de vástagos pegados a su eje (martillos) girando a gran velocidad. La fuerza utilizada es la de impacto, cuando el material es golpeado e impulsado contra la plancha de acero.

Molino de rodillo: está constituido por dos o más rodillos de acero paralelos entre sí y girando concéntricos que impulsan al alimento a pasar por el espacio que hay entre ellos. La principal fuerza ejercida es la de compresión.

Trituración

Triturador de mandíbula: está constituido por dos placas de acero, una móvil y la otra fija; se utiliza para la trituración de partículas grandes, a tamaño mediano y fino. Trabaja con compresión y frotación (véase figura 7.7).

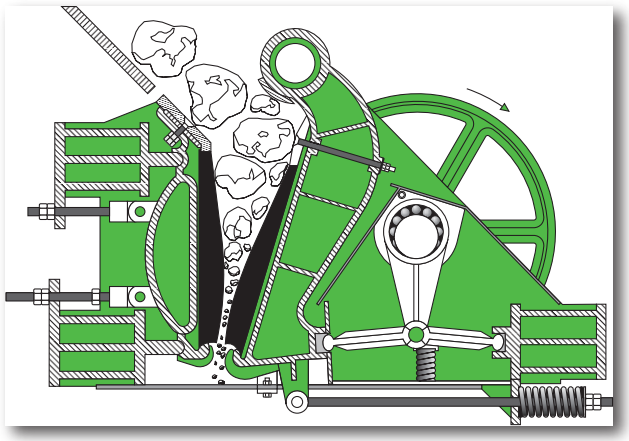


Figura 7.7 *Triturador de mandíbula.*

Quebrantado

Los quebrantadores son máquinas de baja velocidad que se usan en la reducción gruesa de grandes canti-

dades de sólidos. Los principales son los de rodillos lisos y los dentales; ambos operan por compresión y pueden romper grandes trozos de materiales muy duros, como es el caso de la reducción primaria y secundaria de rocas y minerales. Los quebrantados dentados trocean y separan la alimentación blanda como carbón, huesos y pizarras blandas.

Quebrantadores de mandíbulas

La alimentación se produce entre dos mandíbulas que forman una V, abierta por la parte superior. Una de las mandíbulas, que recibe el nombre de yunque, está fija y está situada en posición casi vertical; la otra, que recibe el nombre de oscilante, se mueve alternativamente en un plano vertical, y forma un ángulo de 20 a 30 con la mandíbula fija. Está accionada por una excéntrica, de forma que aplica una gran fuerza de compresión a los trozos situados entre las mandíbulas. Las caras de éstas son planas o ligeramente combadas, y pueden tener muescas en forma de hendiduras horizontales. Los trozos grandes atrapados entre las partes superiores de las mandíbulas se rompen y descienden hacia el contenedor.

7.6 Representación gráfica de los procesos industriales

Los diagramas de flujo son una manera útil de representación e identificación del equipo utilizado en un proceso industrial, además sirven para indicar la secuencia de actividades dentro de un proceso o procedimiento determinado, asimismo mediante su uso se puede mostrar el lugar donde la materia prima es transferida en forma conveniente y económica, así como expresar las condiciones bajo las cuales se ha de efectuar una reacción o separación de una o varias sustancias, por lo cual este documento, una vez autorizado, se emplea para definir, construir y operar los procesos industriales (véase figura 7.8).

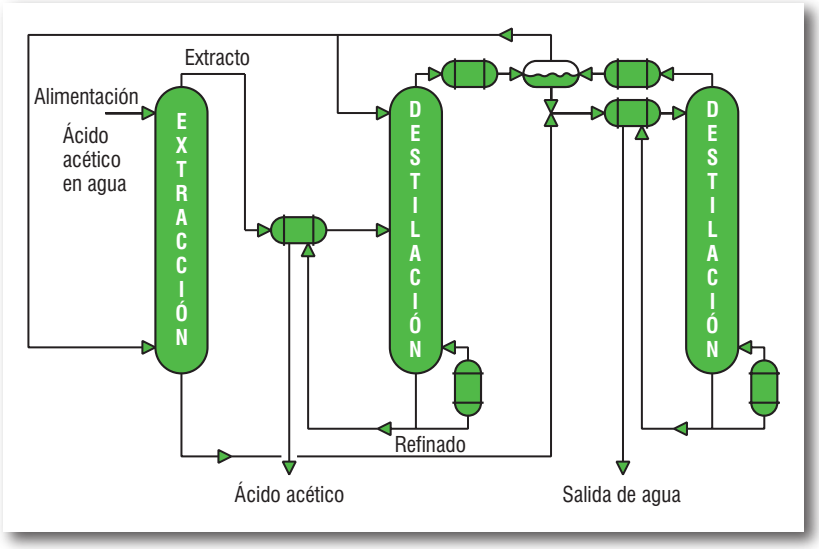


Figura 7.8 *Diagrama de flujo para la extracción de un solvente.*

Se pueden considerar tres clases generales de diagramas de flujo:

a) Básico.

b) De los pasos del proceso.

c) Del equipo.

El siguiente ejemplo permite ilustrar los tres tipos de diagramas: el proceso en consideración consiste en la fabricación de un producto a partir de la reacción de A con B; las materias primas se disuelven en agua por separado y se mezclan, agitando durante dos horas. La suspensión de cristales se centrifuga, se lava con ácido sulfúrico diluido y se seca, el producto crudo que se obtiene se puede almacenar durante algunos días; para refinarlo se vierte en agua, se centrifuga, se lava por segunda vez en la centrífuga y después se seca. La figura 7.9 muestra el diagrama de flujo, que presenta los puntos esenciales del proceso pero a un nivel de abstracción, con fundamento en el método de módulos básicos, que todavía no influye al equipo de diseño sobre qué alternativa seguir.

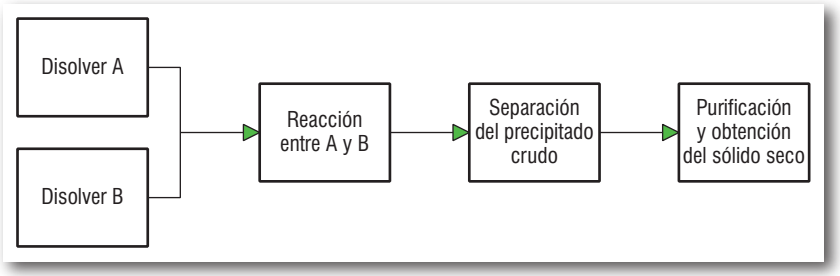


Figura 7.9 *Diagrama de flujo básico.*

Una vez elegida la alternativa, se prepara un diagrama de flujo de los pasos del proceso, que interpreta gráficamente la descripción verbal que se dio en los párrafos de arriba, especificando además, cantidades, concentraciones, temperaturas, presiones, etc. (véase figura 7.10).

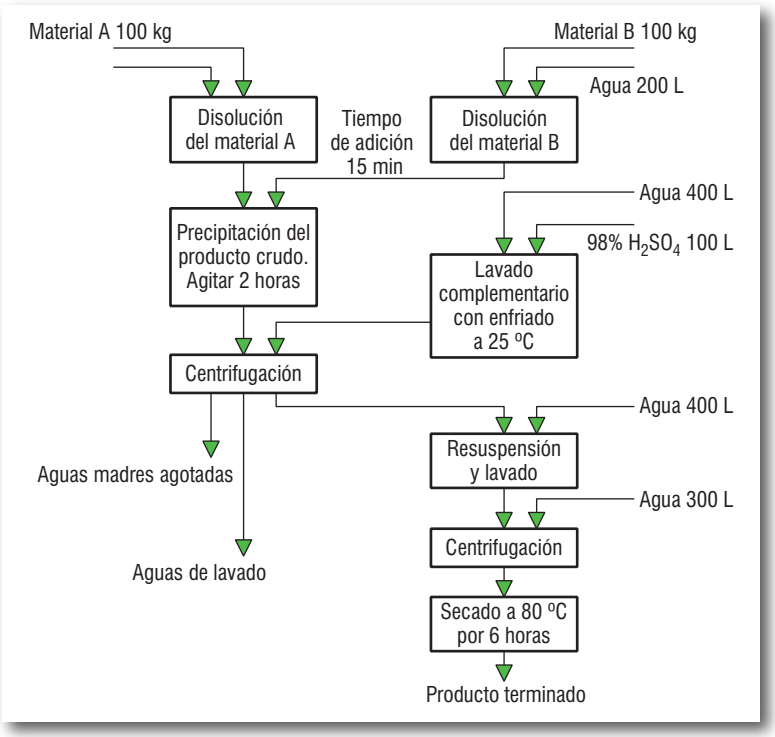


Figura 7.10 *Diagrama de flujo de los pasos del proceso.*

El diagrama de flujo del equipo, de la figura 7.11, muestra un bloque para cada pieza de equipo e incorpora los pasos del proceso, con números consecutivos encerrados en círculos; este tipo de diagrama es muy útil hasta para preparar procedimientos de operación de la planta final.

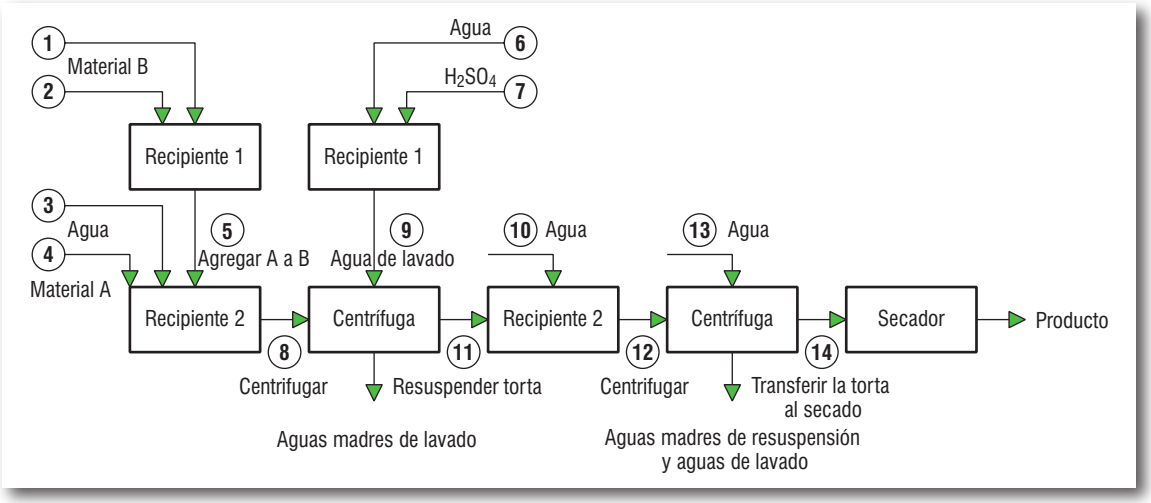


Figura 7.11 *Diagrama de flujo del equipo.*

El contenido de un diagrama de flujo, además de símbolos y líneas, incluye los números y nombres de identificación del equipo, propiedades del proceso a controlar como la presión y la temperatura, identificaciones de servicios, flujo molar y volumétrico de las corrientes seleccionadas, así como una tabla de balance de materia ligada por medio de una clave a las líneas del proceso, puede contener otra clase de información, como la rapidez de intercambio de energía y la instrumentación (véase figura 7.12 y tabla 7.14).

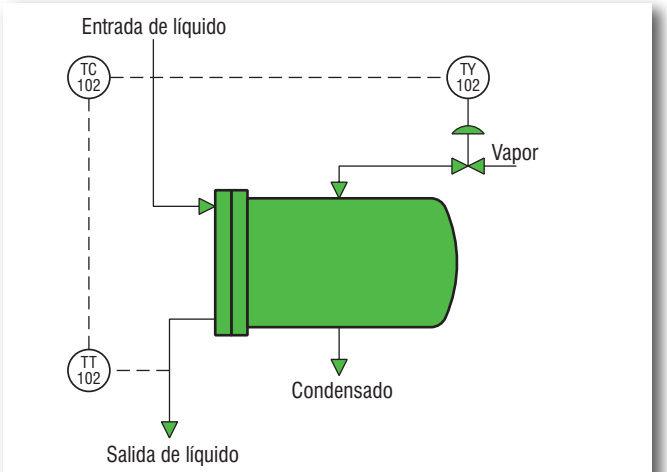


Figura 7.12 *Algunas variables consideradas en un diagrama de flujo.*

Tabla 7.14. Componentes básicos de un diagrama de flujo de procesos.

Constituyentes esenciales
Símbolo del equipo.
Líneas de flujo de las corrientes del proceso.
Número de los equipos.
Nombre de los equipos.
Designación de los servicios.
Designación de presión y temperatura de las líneas del proceso.
Flujos seleccionados molares y volumétricos.
Tabla de balance de materia de acuerdo con las líneas de flujo.
Constituyentes opcionales
Intercambio de energía.
Instrumentos especiales.
Propiedades físicas de corrientes del proceso.

Cuando los datos de plantas o procesos son muy grandes y exceden la capacidad de una hoja de papel, las relaciones entre las operaciones realizadas en una planta se llevan a cabo por medio de segmentos o módulos de los procesos (en hojas separadas) y mediante un código de eslabonamiento son unidos, de esta forma el tamaño del diagrama puede ampliarse para acomodar los detalles prescritos.

Ello se logra mediante la utilización de símbolos que permiten la reunión y examen de una gran cantidad de información en un espacio pequeño, de tal manera se puede mencionar que el enfoque de los diagramas de flujo es la herramienta que permite visualizar, mapear o bosquejar los pasos racionales conectados para describir un proceso, y cuyo objetivo está encaminado hacia la simplificación, análisis y cálculo de los procesos efectuados en una planta industrial.

Debido a ello se construyen un gran número de tipos de diagramas de flujo; algunos muestran flujos simples, otros balances de materiales, y unos cuantos son tan completos que incluyen drenajes, líneas contra incendios y líneas especiales de arranque. En general, la representación gráfica de procesos industriales tiene como finalidad primordial el mostrar en su máxima simplicidad los principios más que los detalles. Asimismo, los diagramas son utilizados como herramienta en la descripción general del flujo de actividades realizadas en cualquier proceso, ya sea de índole industrial, de servicios, de negocios, entre otros (véase figura 7.13).

Un propósito elemental en la elaboración de diagramas de flujo, es el mostrar los bloques simples que con frecuencia indican flujos de materiales y de energía, así como las condiciones de operación (véase figura 7.14). De ellos se distinguen dos tipos de diagramas de flujo: el esquemático y el constructivo, ambos tipos han sido normalizados.

El diagrama de flujo esquemático reproduce el curso del proceso en forma abstracta, incluye los nombres de los productos de partida y finales escritos dentro de rectángulos, los aparatos y procesos de fabricación se representan por números sucesivos incluidos en cuadrados y las energías como letras en el interior de círculos.

El significado de los números y las letras se expresa en el margen inferior del dibujo, las cantidades de materiales se caracterizan mediante líneas (líneas dobles gruesas o camino principal, líneas finas o caminos secundarios); los pasos de energías con líneas de trazos.

Mediante signos especiales al lado de las líneas o sobre ellas se indica si el producto es sólido (puntos), líquido (línea ondulada) o gaseoso (líneas paralelas), o si es vapor (por un trazo corto y grueso).

El estudio de un diagrama de flujo esquemático se facilita componiendo el dibujo en tres partes, la parte superior presenta las sustancias de partida, y algo más arriba, pero en la

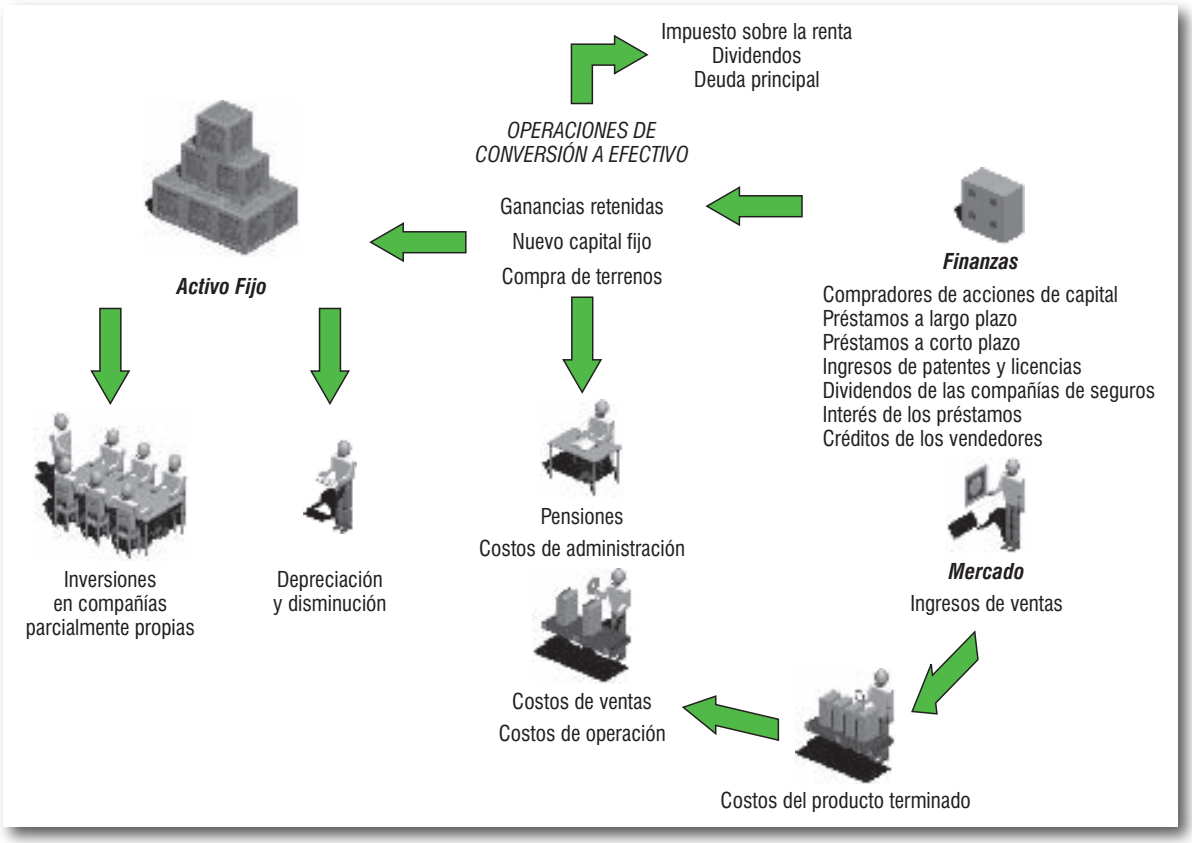


Figura 7.13 *Diagrama de flujo de efectivo de un negocio.*

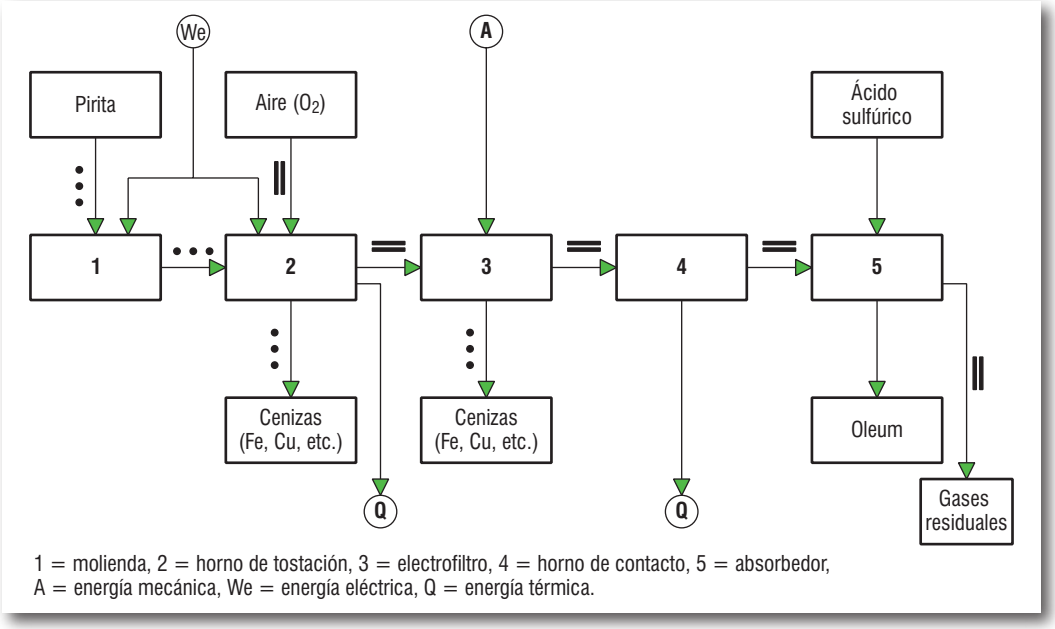


Figura 7.14 *Diagrama de flujo esquemático para la elaboración de ácido sulfúrico.*

misma parte, la energía utilizada; en la parte media se representa el curso de la producción y finalmente en la parte inferior aparecen los productos finales y algo más abajo las energías desprendidas.

El diagrama de flujo esquemático ofrece al conocedor entrenado en la lectura de tales representaciones una panorámica rápida y clara del curso del proceso industrial.

El otro tipo de diagrama de flujo constructivo es más complejo, pero más instructivo (véase figura 7.15).

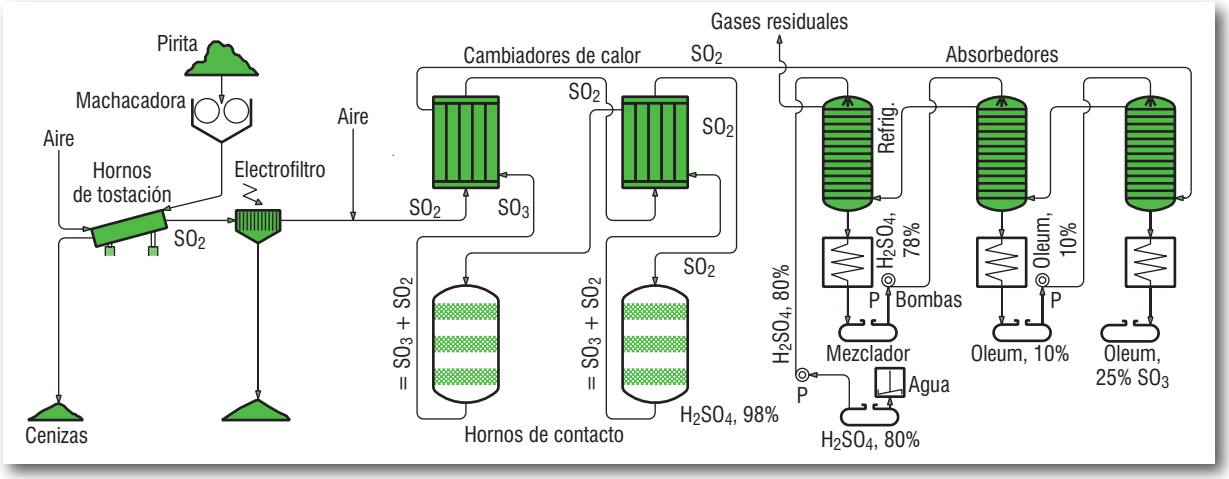


Figura 7.15 *Diagrama de flujo constructivo del método de contacto para la obtención de ácido sulfúrico.*

Utiliza esquemas que representan aparatos y máquinas con simbolismo gráfico, las energías aportadas y obtenidas solamente se incluyen en casos excepcionales.

En general se debe mencionar que los diagramas de flujo de procesos industriales más elaborados muestran a detalle el proceso efectuado y se vuelven extremadamente complicados, los diagramas de flujo especializados, indican líneas de incendio, sistemas instrumentales y de control, líneas de aire, drenaje, combustible, agua, etcétera.

La mayoría coordina la secuencia de operaciones y los procesos unitarios involucrados en las actividades industriales, indican el punto de entrada de las materias primas y de cualquier energía necesaria, así como los puntos de remoción de los productos y subproductos, son muchas las hojas de flujo utilizadas para ilustrar algunas alteraciones propuestas a medida que se procede al diseño.

No hay ninguna otra descripción de un proceso industrial tan concisa ni tan reveladora en cuanto al equipo, detalles de operación, ni a reacciones generales como la presentada en un diagrama de flujo dibujado hábilmente, mismo que debería incluir los datos que estimen no sólo los materiales, sino también la mano de obra y los servicios.

Además, el uso de signos abreviados, tanto para reacciones como representaciones de símbolos de operaciones y aparatos utilizados en la producción de una planta industrial, no son privativos de los ingenieros de procesos, sino de todos los responsables en la producción de un bien o servicio.

Ahora bien, en la mayoría de los casos se prescinde de caracterizar las numerosas variedades de cada tipo de aparato y usualmente se limita a la representación esquemática de lo que sucede en una determinada área del proceso, sin intentar representar el *cómo* se lleva a cabo el proceso y solamente se precisa emplear un número relativamente pequeño de signos representativos.

Por lo cual, cuando se encuentra el mismo signo en la representación de los demás procesos distintos, aquel no representa necesariamente la igualdad del aparato utilizado, así, por ejemplo, un refrigerante representado por una línea ondulada puede significar realmente un refrigerante de serpentín, pero también un refrigerante de tubos, de placas o de otro tipo; en conclusión al dibujar una línea ondulada solamente se quiere expresar que en aquella etapa del proceso, se precisa una operación de refrigeración.

El esquema abreviado se modifica, sin embargo, cuando las propiedades de una determinada sustancia requieren un aparato decididamente especial, servicios específicos y cuando este aparato constituye una característica del proceso en cuestión (véase figura 7.16).

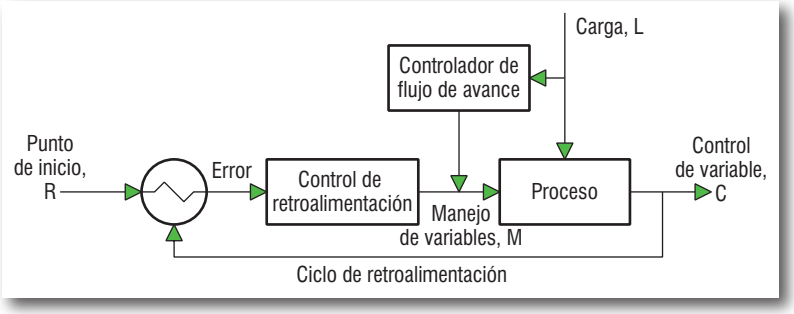


Figura 7.16 *Representación de un diagrama de flujo de un proceso indicando las variables a controlar.*

Con ayuda de los esquemas abreviados puede describirse gráficamente el transcurso de la producción, desde la obtención de las materias primas hasta el envasado final, de tal manera que un diagrama de flujo se debe conceptualizar como compuesto de varios signos abreviados y que representa la marcha de la producción.

Los diagramas de proceso proporcionan una representación gráfica del control del proceso, ya que ilustran los aparatos en el medio ambiente en que trabajarán, involucran las diferentes entradas y salidas, con ello se establece la estrategia a seguir, así como los cálculos a efectuar en las diferentes líneas del proceso.

La simbología empleada en los diagramas de flujo sigue generalmente estándares desarrollados por organizaciones nacionales e internacionales; ello es necesario para poder hacer comprensibles los diagramas a todas las personas, los símbolos se someten a una normalización, es decir, se crean símbolos casi universales, ya que en un principio cada usuario podría tener sus propios símbolos para representar sus procesos en forma de diagrama de flujo; esto trajo como consecuencia que sólo aquél que conocía sus símbolos los podía interpretar.

La simbología utilizada para la elaboración de diagramas de flujo es variable y debe ajustarse a un patrón definido previamente.

En teoría, no es necesario usar un tipo especial de símbolos para crear un diagrama de flujo, pero existen algunos ampliamente utilizados, por lo que es adecuado conocerlos y utilizarlos, ampliando así las posibilidades de crear un diagrama más claro y comprensible para crear un proceso lógico y con opciones múltiples adecuadas.

Se utilizan los símbolos estandarizados según las normas de la International Organization for Standardization (ISO), aunque algunas veces se hacen referencia a otras organizaciones como la American National Standards Institute (ANSI), la American Society of Mechanical Engineers (ASME), o los símbolos del flujograma de ingeniería de la Deutches lnstitut für Normung (DIN) (véase tabla 7.15).

En conclusión, el propósito de cualquier diagrama de flujo es presentar pictóricamente, en forma parcial o total, los aspectos de un proceso, del equipo en que se va a llevar a cabo, o de ambos. El elemento pictórico se incluye porque es útil para:

Tabla 7.15. Algunas organizaciones internacionales dedicadas a la normalización de los diagramas de flujo.

Organización	Actividades principales en la normatividad
ASME	Elabora símbolos para la construcción de diagramas de flujo simples y combinados.
ANSI	Elabora símbolos para la construcción de diagramas de flujo, para procesamiento electrónico de datos y administrativos.
ISO9000	Elabora símbolos para la construcción de diagramas de flujo, verificación e identificación de actividades. Clasifica y recomienda el uso y aplicación de símbolos.
DIN	Representa la ejecución de actividades u operaciones dentro del proceso, método o procedimiento.

- Ayudar al diseño y a la disposición (*layout*) del equipo, mostrando claramente las interrelaciones de los distintos equipos.
- Proporcionar un esquema claro del proceso y de la planta para poder enfocar después el trabajo a los detalles de diseño de cada parte por separado.
- Ayudar a preparar una relación de equipos necesarios y de sus servicios auxiliares que sirva para hacer un estimado preliminar del costo de la planta.
- Proporcionar una base para estimar el tamaño del equipo.
- Estudiar alternativas de disposición del equipo y sus servicios en la planta final.
- Instruir al personal en el proceso y en el equipo.

Todos los puntos anteriores, tienen un elemento en común: el diagrama de flujo, cualquiera que sea su clase, se prepara para simplificar y aclarar algunos aspectos de un proceso con más eficiencia que mediante una explicación verbal o escrita.

Los diagramas de flujo son útiles tanto para el estudio de problemas en plantas existentes como para el diseño de instalaciones nuevas, es también prácticamente indispensable elaborar un diagrama de flujo antes de empezar a trabajar en el desarrollo de un balance de materiales o en mejorar la utilización de un equipo.

7.7 Balance parcial y total de masa en operaciones unitarias

La aplicación del balance de materiales es sencilla, si se tienen los conceptos y el entrenamiento adecuados; por ello, a continuación se muestran las nociones básicas para conocer las técnicas de balance de masa en los procesos industriales.

En general hay dos tipos de procesos químicos con los que se trata a nivel industrial; el a) intermitente o por lotes: los productos químicos se agregan a un recipiente o reactor en una de las operaciones y se lleva a cabo el proceso; en algunos casos, durante este periodo se eliminan los productos, pero en otros esto ocurre después de completar el procesamiento; y el b) continuo: la carga química y los productos entran y salen en forma continua. El balance de materiales puede aplicarse a cualquiera de los dos, por lotes o continuo. La mayor diferencia al aplicar el balance de materiales a estos dos procesos es la consideración del factor tiempo. Un balance de materiales aplicado a un proceso intermitente no incluye la variable tiempo; en este caso, el balance se hace durante un ciclo completo en que se procesa una sola carga. En el caso de un proceso continuo, la variable tiempo debe aparecer en el balance de material, éste debe hacerse a lo largo de un periodo específico.

El balance de materiales se basa en el concepto de la ley de conservación de la materia según la cual, excepto en situaciones en que intervienen reacciones nucleares, los átomos

no se crean ni se destruyen, sólo se transforman. Los átomos que entran a un sistema deben entonces acumularse dentro del sistema o salir de él. Esta observación conduce al balance expresado a continuación, que es válido para todas las especies atómicas en un sistema:

$$\begin{array}{c}\text{Acumulación}\\ \text{de especies atómicas}\\ i \text{ dentro del sistema}\end{array} = \begin{array}{c}\text{Total de especies}\\ \text{atómicas } i \text{ que}\\ \text{entran al sistema}\end{array} - \begin{array}{c}\text{Total de especies}\\ \text{atómicas } i \text{ que}\\ \text{salen del sistema}\end{array}$$

Al sumar todas las especies atómicas que entran y salen de un sistema, se obtiene el balance total de materiales:

$$\begin{array}{c}\text{Acumulación de masa}\\ \text{dentro del sistema}\end{array} = \begin{array}{c}\text{Masa total que}\\ \text{entra al sistema}\end{array} - \begin{array}{c}\text{Masa total que}\\ \text{sale del sistema}\end{array}$$

En los procesos estacionarios, es decir, sin acumulación, el balance de materia se simplifica de la siguiente forma:

$$\begin{array}{c}\text{Acumulación total}\\ \text{dentro del sistema}\end{array} = \begin{array}{c}\text{Masa total que}\\ \text{entra al sistema}\end{array} - \begin{array}{c}\text{Masa total que}\\ \text{sale del sistema}\end{array}$$

7.8 Metodología para resolver problemas de balance de masa con operaciones unitarias

Es recomendable seguir estos pasos:

1. Leer el problema.
2. Analizarlo.
3. Elaborar un diagrama de bloques en donde se incluyan todos los datos, incluyendo las preguntas.
4. Elaborar la tabla de datos a la entrada y salida de cada operación unitaria, hasta llegar a la masa de cada componente.
5. Generar los balances parciales para cada operación unitaria.
6. Generar el balance total del proceso.
7. Resolver las preguntas del problema.

Aplicación de la metodología

La leche fresca tiene la siguiente composición porcentual:

Componentes	% peso
Agua	87,3
Grasa	3,7
Proteínas	3,5
Carbohidratos y minerales	5,5

La densidad de la leche fresca es de 1,2 kg/L. En el proceso de industrialización de la leche, ésta se somete a un descremado total; la leche obtenida se envía a un evaporador para concentrarla hasta obtener leche con 27% peso de sólidos. Después se elimina el agua en un secador por aspersión, hasta que el producto contenga 3% peso de humedad. El producto se envasa en recipientes de 250 g.

Para una alimentación de 3 000 L/h de leche. Determine:

- ¿Cuántos envases se requieren para dos turnos de trabajo de 8 horas diarias?
- Realice los balances de masa parciales y totales.
- ¿Cuánto se fabricaría de una mezcla de helado en un mes? Considere que un mes tiene 28 días laborables, si el helado comercial contiene:

Componentes	% peso
Grasa de leche	12,0
Azúcar	15,0
Estabilizador	0,2
Emulsionante	0,3
Otros aditivos	11,0
Agua	El resto

- ¿Cuánto se agrega de cada uno de los componentes para obtener la mezcla deseada?

1) Leer el problema.

Al leer el problema se observa que se lleva a cabo una operación de descremado, una evaporación y otra de secado por aspersión; se ve la cantidad de leche a la entrada de estas operaciones y las composiciones a la entrada y salida; en la elaboración de helado hay otra operación unitaria de mezclado y se piden las cantidades de los productos, así como los balances de masa parcial y totales.

2) Analizarlo.

La leche tiene la siguiente composición porcentual:

Componentes	% peso
Agua	87,3
Grasa	3,7
Proteínas	3,5
Carbohidratos	5,5

La densidad de la leche fresca es de 1,2 kg/L.

Con estos datos y recordando la lectura total del problema en la que se proporciona el gasto volumétrico de la leche que entra al proceso es posible obtener el gasto másico de la leche de entrada:

$$\rho = \frac{m}{V} \Rightarrow m = \rho V$$

Recuerde que para convertir los gastos a masa o volumen sólo se usa el tiempo como una constante.

La base de cálculo 1 h implicaría que los resultados finales obtenidos corresponderán a cada hora de proceso.

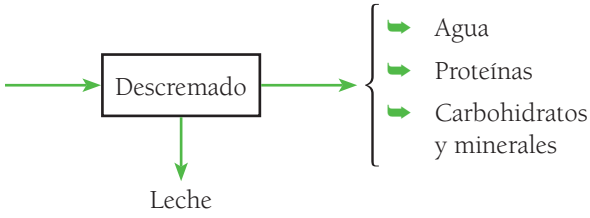
Conociendo la masa total y el por ciento en peso (%) de cada componente es posible conocer las masas parciales o de cada componente:

$$\%\ \text{peso} = \frac{m_i}{m_T} \times 100 \ \Rightarrow\ mi = \frac{\%\ \text{peso}}{100} \times m_T$$

y así se obtendrá la primera tabla de entrada a la operación de descremado:

...En el proceso de industrialización de la leche, ésta se somete a un descremado total.

Esto sugiere que ocurre una operación de descremado en el cual toda la grasa se separa de la leche y sólo sale del descremado una mezcla de agua, proteínas, carbohidratos y minerales; resulta el siguiente diagrama:



y como se conocen las masas de entrada y las de salida es posible determinar en la mezcla de leche descremada la nueva composición porcentual en peso de cada uno de los componentes:

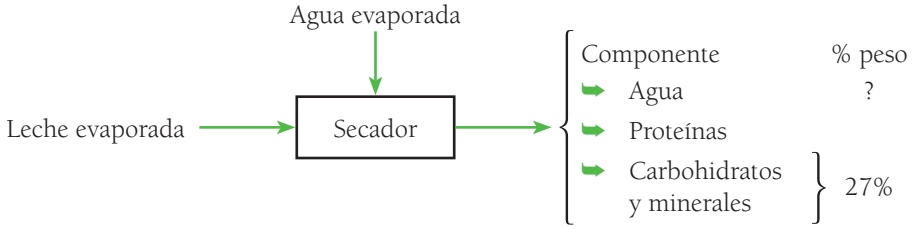
$$\%\ \text{peso} = \frac{m_i}{m_T} \times 100$$

y el balance parcial de la operación unitaria:

$$m_{\text{entrada}} = m_{\text{leche descremada}} + m_{\text{grasa}}$$

la leche obtenida se envía a un evaporador para concentrarla donde se obtiene leche con 27% peso de sólidos.

Esto indica que se separa parte del agua, ya que los demás componentes son sólidos; por lo tanto, su diagrama mostraría las cantidades correspondientes y sus masas:



Por diferencia de los porcentajes sabemos el % peso de agua y con la suma de las masas de los sólidos se conoce la masa total de esta salida:

$$\%\ \text{peso sólidos} = \frac{\sum m_{\text{sólidos}}}{m_T} \times 100$$

$$\Rightarrow m_T = \frac{\sum m_{\text{sólidos}}}{\%\,\text{peso sólidos}} \times 100$$

Para saber la cantidad de agua en la mezcla se tiene que:

$$\%\ \text{peso}_{H_2O} = 100\% - 27\%$$

y con estos datos se obtiene la masa de agua:

$$m_{H_2O} = \frac{\%\ \text{peso}_{H_2O}}{100} \times m_T$$

Para saber cuánta masa de agua se evapora debe realizarse un balance parcial para el agua:

$$m_{H_2O_{entrada}} = m_{H_2O_{mezcla}} + m_{H_2O_{evaporada}}$$

Por diferencia se sabrá la masa de agua que se evapora:

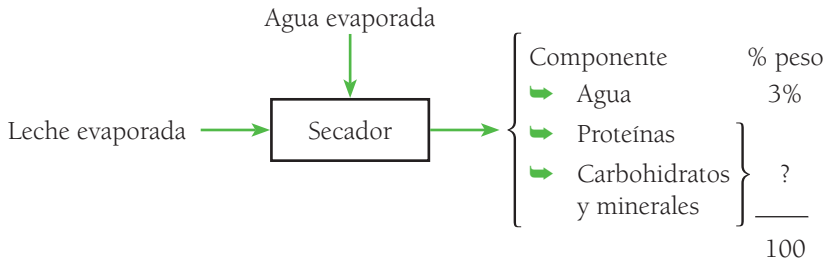
$$m_{H_2O_{evaporada}} = m_{H_2O_{entrada}} - m_{H_2O_{mezcla}}$$

de esta manera, ya se tienen todos los datos para realizar el balance parcial del evaporador:

$$m_{\text{leche descremada}} = m_{\text{mezcla (leche evaporada)}} - m_{H_2O_{evaporada}}$$

...Después se elimina el agua hasta que el producto contenga 3% peso de humedad.

En esta parte del proceso la leche evaporada entra a un secador por aspersión para ser convertida en polvo con 3% peso de agua, por lo que el diagrama quedaría así:



De la misma manera en que se obtuvo en el evaporador el % peso de agua, ahora se hace para los sólidos:

$$\%\ \text{peso}_{\text{sólidos}} = 100\% - \%\ \text{peso de } H_2O$$

Como la masa de los sólidos no varía, será posible conocer la masa total de la leche en polvo:

$$m_T = \frac{m_{\text{mezcla}} \times 100}{\%\ \text{peso mezcla}}$$

Con esta masa total se conocerá la masa de agua en la mezcla:

$$m_{H_2O} = \frac{\%\ \text{peso}_{H_2O}}{100} \times m_T$$

y con un balance parcial de agua se sabrá cuánta agua se elimina en el secado:

$$m_{H_2O_{eliminada}} = m_{H_2O_{entrada}} - m_{H_2O_{mezcla}}$$

Con un balance parcial del secado se confirma que:

$$m_{\text{leche evaporada}} = m_{\text{eliminada}} - m_{\text{leche en polvo}}$$

El producto obtenido se envasa en recipientes de 250 g.

Como ya se conoce la masa final de la leche en polvo sólo resta determinar el número de recipientes requeridos cada hora de proceso:

$$\frac{\text{No. de envases}}{\text{h}} = m_{\text{leche en polvo}} \left| \frac{1\ \text{envase}}{250\ \text{g}} \right|$$

Para una alimentación de 3 000 L/h de leche. Determine:

a) ¿Cuántos envases se requieren para dos turnos de trabajo de 8 horas diarias?

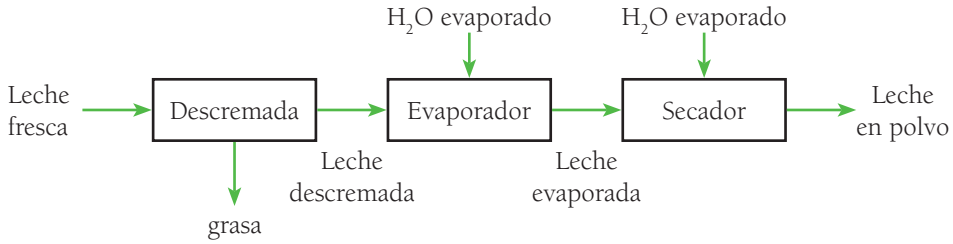
Como ya se conoce el número de envases por hora, hay que hacer las conversiones necesarias de tiempo:

$$\frac{\text{No. de envases}}{\text{día}} = \left|\frac{\text{No. de envases}}{\text{h}}\right|\left|\frac{8\text{ h}}{1\text{ turno}}\right|\left|\frac{2\text{ turnos}}{1\text{ día}}\right|$$

y se obtiene la respuesta al inciso.

b) Realice los balances de masa parciales y totales.

Como se indicó en cada operación unitaria, la única que falta es el balance total:



Éste se realiza sólo con las entradas y salidas reales, por lo que:

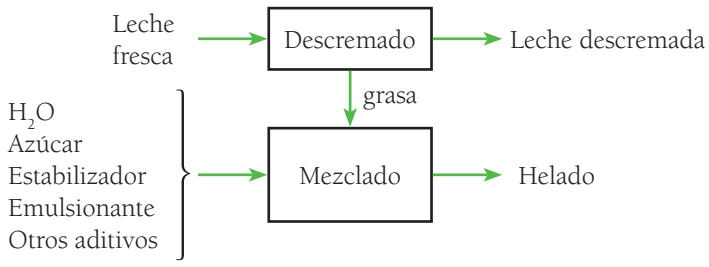
$$m_{\text{leche fresca}} = m_{\text{grasa}} + m_{\text{leche en polvo}} + m_{\text{H}_2\text{O}_{\text{evaporada}}} + m_{\text{H}_2\text{O}_{\text{eliminada}}}$$

Como ya se conocen todas las masas este inciso también ya está resuelto.

c) ¿Qué cantidad de una mezcla de helado se fabricaría en un mes? Considere que un mes tiene 28 días laborales, si el helado comercial contiene:

Componentes	% peso
Grasa de leche	12,0
Azúcar	15,0
Estabilizador	0,2
Emulsionante	0,3
Otros aditivos	11,0
Agua	El resto

Como es posible ver, ahora la grasa obtenida en el descremado entra a una operación unitaria de mezclado con otros componentes para obtener helado, por lo que el diagrama sería:



Como ya se conoce la masa de la grasa y el % peso que tiene en la mezcla de helado es factible saber cuál es la masa total del helado:

$$m_T = \frac{m_i \times 100}{\%\ \text{peso}}$$

Recuerde que se tenía una base de cálculo de 1 hora, por lo que la masa obtenida está por hora de proceso; sólo deben hacerse las conversiones para llegar al resultado:

$$\frac{m_{\text{envases}}}{\text{mes}} = \left| \frac{m_{\text{helado}}}{\text{h}} \right| \left| \frac{8\ \text{h}}{1\ \text{turno}} \right| \left| \frac{2\ \text{turnos}}{1\ \text{día}} \right| \left| \frac{28\ \text{días}}{1\ \text{mes}} \right|$$

d) ¿Cuánto se agregaría de cada uno de los componentes para obtener la mezcla deseada?

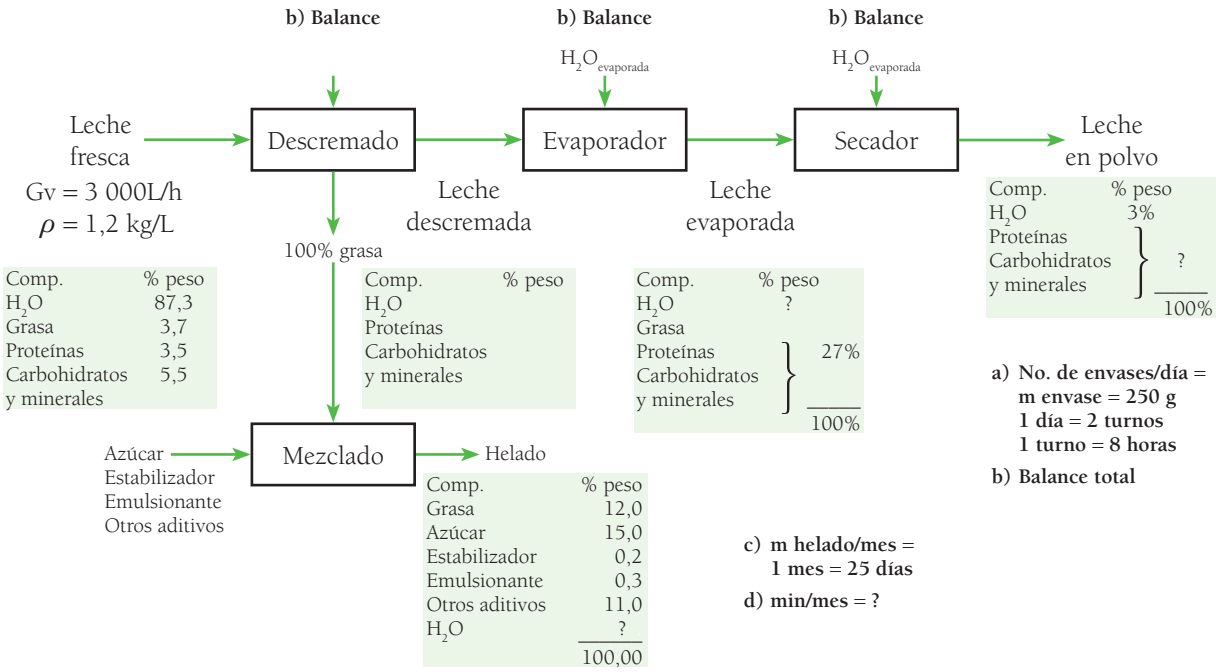
Con la masa del helado obtenida en el inciso anterior y conociendo los porcentajes en peso de cada componente, es posible dar respuesta al inciso con la fórmula:

$$m_i = \frac{\%\ \text{peso}_i}{100} \times m_T$$

En este momento, el problema está resuelto.

3) Elabore un diagrama de bloques en donde se indiquen todos los datos del problema incluyendo las preguntas:

Diagrama:



4) Elabore tablas de datos a la entrada y la salida de cada operación unitaria hasta llegar a la masa de cada componente.

5) Genere balances parciales para cada operación unitaria.

Descremado

Balance cálculo de 1 h:

$Gv = 3\,000$ L/h de leche fresca

$$V = \frac{Gv}{\theta} = \frac{3000 \text{ L/h}}{\text{h}} = 3000 \text{ L}$$

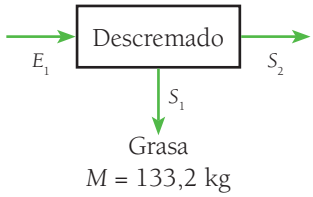
$\rho = 1{,}2$ kg/L

$m = \rho V = (1{,}2 \text{ kg/L})(3\,000 \text{ L}) = 3\,600$ kg

Diagrama:

Leche fresca

Componentes	% peso	$m_i = \frac{\%\text{peso}_i}{100} \times m_T$
Agua	7,3	3142,8
Grasa	3,7	133,2
Proteínas	3,5	126,0
Carbohidratos y minerales	5,5	198,0
Total	100,0	3600,0



Comp.	m_i (kg)
H_2O	**3 142,8**
Proteínas	126,0
Carbohidratos y minerales	198,0
	3 466,8

Balance parcial del descremado:

Entradas = Salidas

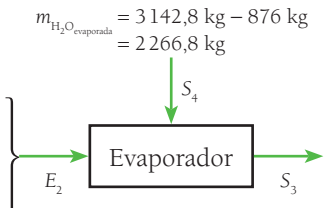
$E_1 = S_1 + S_2$

3 600 kg = 3 466,8 kg + 133,2 kg

3 600 kg = 3 600 kg

Evaporador

Componente	m_i (kg)	$m_i = \frac{\%\text{ peso}_i}{100} \times m_T$
Agua	3142,8	3142,8
Proteínas	126,0	
Carbohidratos y minerales	198,0	324,0
Total	3466,8	



Leche evaporada

Comp.	m_i (kg)	% peso
H_2O	**876,0**	**73**
Proteínas, Carbohidratos y minerales	324,0	27
	1 200	100

$$\% \text{ peso agua} = 100\% - 27\% = 73\% \text{ peso}$$

$$m_T = \frac{\sum m_{\text{sólido}} \times 100}{\% \text{ peso}} = \frac{324 \text{ kg} \times 100}{27} = 1200 \text{ kg}$$

Balance parcial del evaporador:

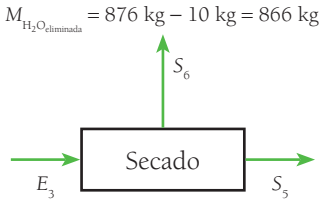
$$\text{Entradas} = \text{Salidas}$$

$$E_2 = S_3 + S_4$$

$$3\,466{,}8 \text{ kg} = 2\,266{,}8 \text{ kg} + 1\,200 \text{ kg}$$

$$3\,466{,}8 \text{ kg} = 3\,466{,}8 \text{ kg}$$

Balance parcial para el secador por aspersión:



Componente	m_i (kg)
Agua	876,0
Proteínas, Carbohidratos y minerales	324,0
	1 200,0

Leche en polvo

Comp.	% peso	m_i (kg)
H_2O	**3**	**10,0**
Proteínas, Carbohidratos y minerales	97	324,0
	100	334,0

$$\% \text{ peso sólidos} = 100\% - 3\% + 97\% \text{ peso}$$

$$m_T = \frac{\sum m_{\text{sólido}} \times 100}{\% \text{ peso}} = \frac{324 \text{ kg} \times 100}{97} = 334{,}0 \text{ kg}$$

$$m_{H_2O} = 334{,}0 \text{ kg} - 324{,}0 \text{ kg} = 10{,}0 \text{ kg}$$

Balance parcial del evaporador:

6) Genere el balance general del proceso:

$$\text{Entradas} = \text{Salidas}$$

$$E_1 = S_2 + S_4 + S_5 + S_6$$

$$3\,600 \text{ kg} = 133{,}2 \text{ kg} + 2\,266{,}8 \text{ kg} + 334 \text{ kg} + 866 \text{ kg}$$

$$3\,600 \text{ kg} = 3\,600{,}0 \text{ kg}$$

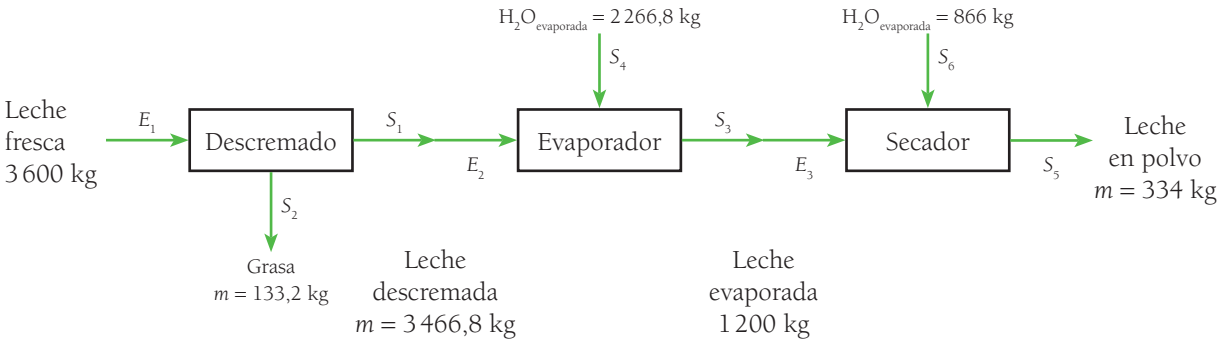
7) **Resuelva las preguntas del problema:**

a) ¿Cuántos envases se requieren para dos turnos de trabajo de 8 horas diarias?

$$Gm_{\text{leche en polvo}} = \frac{m_{\text{envases}}}{\theta} = \frac{m_{\text{envases}}}{\text{mes}} = \left|\frac{334\ \text{kg}}{\text{h}}\right|\left|\frac{8\ \text{h}}{1\ \text{turno}}\right|\left|\frac{2\ \text{turnos}}{1\ \text{día}}\right|\left|\frac{\text{envase}}{250\ \text{g}}\right|\left|\frac{1000\ \text{g}}{1\ \text{kg}}\right| = 21376\ \frac{\text{envases}}{\text{día}}$$

$\therefore$ Respuesta: Se requieren 21 736 $\frac{\text{envases}}{\text{día}}$

b) Realíce los balances parciales y totales, con base de cálculo de una hora:



Balances parciales:

Descremado: $E_1 = S_1 + S_2$

$3\,600\ \text{kg} = 3\,466{,}8\ \text{kg} + 133{,}2\ \text{kg}$

$3\,600{,}0\ \text{kg} = 3\,600{,}0\ \text{kg}$

Evaporador: $E_2 = S_3 + S_4$

$3\,466{,}8\ \text{kg} = 1\,200\ \text{kg} + 2\,266{,}8\ \text{kg}$

$3\,466{,}8\ \text{kg} = 3\,466{,}8\ \text{kg}$

Secado: $E_3 = S_5 + S_6$

$1\,200\ \text{kg} = 334\ \text{kg} + 866\ \text{kg}$

$1\,200\ \text{kg} = 1\,200{,}0\ \text{kg}$

Balance total: $E_1 = S_2 + S_4 + S_5 + S_6$

$3\,600\ \text{kg} = 133{,}2\ \text{kg} + 2\,266{,}8\ \text{kg} + 1\,200\ \text{kg} + 334\ \text{kg}$

$3\,600{,}0\ \text{kg} = 3\,600{,}0\ \text{kg}$

Balances para 1 día:

Conversiones:

$$Gm_{\text{leche fresca}} = \frac{m}{\theta} = \frac{m}{\text{día}} = \left|\frac{3600\ \text{kg}}{\text{h}}\right|\left|\frac{8\ \text{h}}{1\ \text{turno}}\right|\left|\frac{2\ \text{turnos}}{1\ \text{día}}\right| = 57\,600\ \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

$$Gm_{\text{grasa}} = \frac{m}{\theta} = \frac{m_s}{\text{día}} = \left|\frac{133,2\ \text{kg}}{\text{h}}\right|\left|\frac{8\ \text{h}}{1\ \text{turno}}\right|\left|\frac{2\ \text{turnos}}{1\ \text{día}}\right| = 2131,2\ \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

$$Gm_{\text{leche descremada}} = \frac{m}{\theta} = \frac{m}{\text{día}} = \left|\frac{3466,8\ \text{kg}}{\text{h}}\right|\left|\frac{8\ \text{h}}{1\ \text{turno}}\right|\left|\frac{2\ \text{turnos}}{1\ \text{día}}\right| = 55468,8\ \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

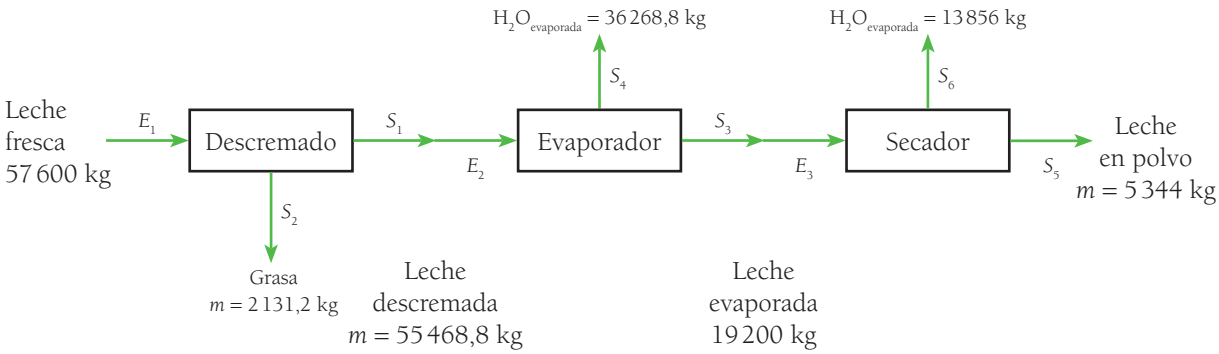
$$Gm_{H_2O\ \text{evaporada}} = \frac{m}{\theta} = \frac{m}{\text{día}} = \left|\frac{2266,8\ \text{kg}}{\text{h}}\right|\left|\frac{8\ \text{h}}{1\ \text{turno}}\right|\left|\frac{2\ \text{turnos}}{1\ \text{día}}\right| = 36268,8\ \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

$$Gm_{\text{leche evaporada}} = \frac{m}{\theta} = \frac{m}{\text{día}} = \left|\frac{1200\ \text{kg}}{\text{h}}\right|\left|\frac{8\ \text{h}}{1\ \text{turno}}\right|\left|\frac{2\ \text{turnos}}{1\ \text{día}}\right| = 19200\ \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

$$Gm_{\text{leche polvo}} = \frac{m}{\theta} = \frac{m}{\text{día}} = \left|\frac{334\ \text{kg}}{\text{h}}\right|\left|\frac{8\ \text{h}}{1\ \text{turno}}\right|\left|\frac{2\ \text{turnos}}{1\ \text{día}}\right| = 5344\ \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

$$Gm_{H_2O\ \text{eliminada}} = \frac{m}{\theta} = \frac{m}{\text{día}} = \left|\frac{866\ \text{kg}}{\text{h}}\right|\left|\frac{8\ \text{h}}{1\ \text{turno}}\right|\left|\frac{2\ \text{turnos}}{1\ \text{día}}\right| = 13856\ \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

Diagrama para la producción por día:



Balances parciales:

Descremado: $E_1 = S_1 + S_2$

57 600 kg = 55 468,8 kg + 2 131,2 kg

57 600 kg = 57 600 kg

Evaporador: $E_2 = S_3 + S_4$

55 468,8 kg = 19 200 kg + 36 268,8 kg

55 468,8 kg = 55 468,8 kg

Secado: $E_3 = S_5 + S_6$

19 200 kg = 5 344 kg + 13 856 kg

19 200 kg = 19 200,0 kg

Balance total: $E_1 = S_2 + S_4 + S_5 + S_6$

$57\,600 \text{ kg} = 2\,131{,}2 \text{ kg} + 36\,268{,}8 \text{ kg} + 5\,344 \text{ kg} + 13\,856 \text{ kg}$

$57\,600 \text{ kg} = 57\,600{,}0 \text{ kg}$

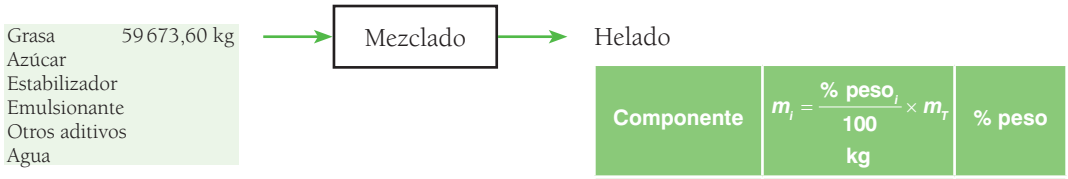
c) ¿Cuánto se fabricaría de una mezcla de helado comercial con el siguiente contenido?

Componentes	% peso	
Grasa de Leche	12,0	38,5%
Azúcar	15,0	
Estabilizador	0,2	
Emulsionante	0,3	
Otros aditivos	11,0	
Agua	61,5 = 100% – 38,5	
Total	100	

Primero se hace la conversión para un mes de producción:

$$Gm_{\text{grasa}} = \frac{m}{\theta} = \frac{m}{\text{mes}} = \left| \frac{2131{,}20 \text{ kg}}{\text{día}} \right| \left| \frac{28 \text{ días}}{1 \text{ mes}} \right| = 59673{,}60 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

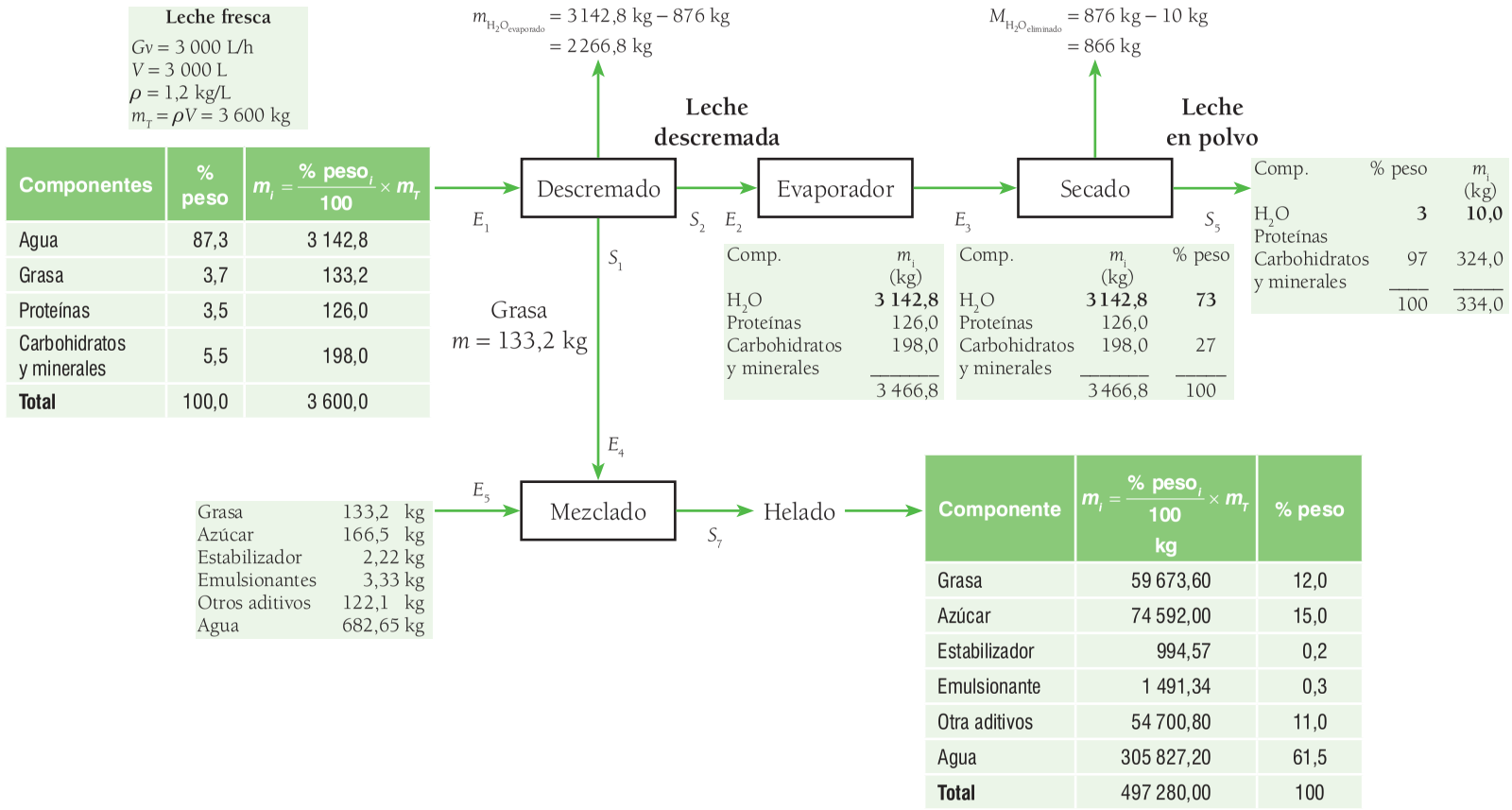
El diagrama para 1 mes de producción de helado:



Componente	$m_i = \frac{\%\ \text{peso}_i}{100} \times m_T$ kg	% peso
Grasa	59 673,60	12,00
Azúcar	74 592,00	15,00
Estabilizador	994,57	0,20
Emulsionante	1 491,34	0,30
Otros aditivos	54 700,80	11,00
Agua	305 827,20	61,50
Total	**497 280,00**	100,00

$$m_{T\ \text{helado}} = \frac{m_{\text{grasa}} \times 100}{\%\ \text{peso grasa}} = \frac{59673{,}60 \times 100}{12} = 497\,280{,}00 \text{ kg}$$

d) ¿Cuánto se agregaría de cada uno de los componentes para obtener la mezcla deseada? La respuesta está en la tabla del diagrama.



Componentes	% peso	$m_i = \frac{\%\ peso_i}{100} \times m_T$
Agua	87,3	3 142,8
Grasa	3,7	133,2
Proteínas	3,5	126,0
Carbohidratos y minerales	5,5	198,0
Total	100,0	3 600,0

Comp.	m_i (kg)
H_2O	**3 142,8**
Proteínas	126,0
Carbohidratos y minerales	198,0
	3 466,8

Comp.	m_i (kg)	% peso
H_2O	**3 142,8**	**73**
Proteínas	126,0	
Carbohidratos y minerales	198,0	27
	3 466,8	100

Comp.	% peso	m_i (kg)
H_2O	**3**	**10,0**
Proteínas Carbohidratos y minerales	97	324,0
	100	334,0

Componente	$m_i = \frac{\%\ peso_i}{100} \times m_T$ kg	% peso
Grasa	59 673,60	12,0
Azúcar	74 592,00	15,0
Estabilizador	994,57	0,2
Emulsionante	1 491,34	0,3
Otra aditivos	54 700,80	11,0
Agua	305 827,20	61,5
Total	497 280,00	100

7.9 Ejemplos de aplicación de operación unitaria

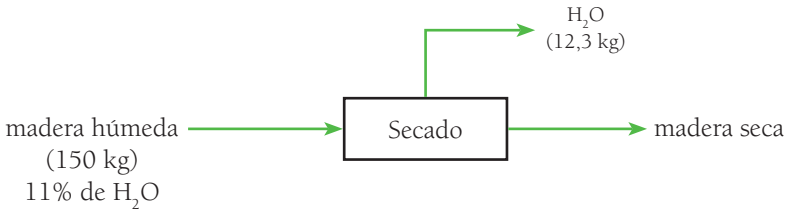
1. Se tiene un lote de 150 kg de madera húmeda que posee 11% en peso de humedad, el cual se envía a un secador para reducir el contenido del agua. Como resultado de esta operación se eliminan 12,3 kg de agua. Con estos datos establezca mediante un diagrama de proceso las operaciones efectuadas y determine la:

   a) masa de madera seca obtenida a la salida del secador.

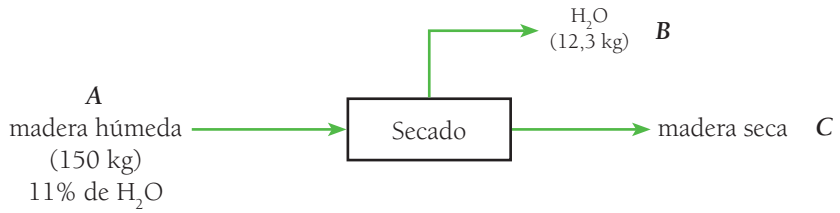
   b) composición porcentual para cada componente.

Solución:

El diagrama de bloques propuesto que representa el proceso es:



En seguida se etiquetan cada una de las entradas y salidas detectadas en el proceso; en este caso, corresponden a tres bloques denotados por las letras *A*, *B* y *C*.



Así se tienen las siguientes relaciones para cada uno de los bloques encontrados:

Bloque A

masa de madera húmeda = masa de la madera + masa de agua

masa de agua en *A* = masa de la madera húmeda × % de humedad
= 150 kg × 0,11
= 16,50 kg

masa de la madera = masa de madera húmeda – masa de agua
= 150 kg – 16,50 kg
= 133,50 kg

Bloque B

masa de agua en *B* = 12,30 kg

Bloque C

El contenido total de agua se establece con la relación:

$$\text{masa de agua } A = \text{masa de agua } B + \text{masa de agua } C$$

entonces la cantidad de agua a la salida es:

$$\begin{aligned}\text{masa de agua en } C &= \text{masa de agua } A - \text{masa de agua } B \\ &= 16{,}5 \text{ kg} - 12{,}3 \text{ kg} \\ &= 4{,}2 \text{ kg}\end{aligned}$$

De esta manera se tiene que la masa total a la salida de este bloque es:

$$\begin{aligned}\text{masa total de salida} &= \text{masa de la madera} + \text{masa de agua en } C \\ &= 133{,}5 \text{ kg} + 4{,}2 \text{ kg} \\ &= 137{,}7 \text{ kg}\end{aligned}$$

Por tanto, los porcentajes para cada componente son calculados de las relaciones:

$$\%\text{ del componente} = \frac{\text{masa del componente}}{\text{masa total de salida}} \times 100$$

$$\%\text{ de agua} = \frac{4{,}2 \text{ kg}}{137{,}7 \text{ kg}} \times 100 = 3{,}05\%$$

$$\%\text{ de madera} = \frac{133{,}5 \text{ kg}}{137{,}7 \text{ kg}} \times 100 = 96{,}94\%$$

Finalmente la tabla de resultados se muestra a continuación:

Componente	Masa (kg)		
	Bloques		
	A	*B*	*C*
Madera	133,5		133,5
		12,3	
Agua	16,5		4,2
		12,3	137,7
Total	**150**	**150**	

2. En un proceso industrial de productos enlatados, se prepara un cóctel de frutas que tiene la siguiente composición:

Componente	% peso	Costo ($/kg)
Durazno	30,0	20,00
Pera	30,0	12,00
Piña	20,0	3,50
Albaricoque	15,0	9,00
Uvas sin semilla	2,5	21,00 ($/250 g)
Cerezas	2,5	30,00

El durazno, la piña y el albaricoque se preparan con un escaldado en una solución de sosa a 6% peso para eliminar la epidermis y se cortan en cubitos de 8 mm. La cereza y las uvas se enlatan enteras. Los envases se llenan con 70% de la mezcla de la fruta y 30% de jarabe de 35 °Brix, el cual se prepara agregando 537 g de azúcar por cada litro de jarabe densidad 1.54 g/mL. Las latas tienen una capacidad de 850 g y un espacio de vacío del 10%. El costo del azúcar es de $6.00/kg.

Con la descripción anterior conteste:

1) Para una producción de 5 000 latas/día determine la cantidad de fruta requerida en kg.
2) ¿Cuánta solución de sosa debe preparar si en un litro se escaldan 3 kg de fruta?
3) ¿Cuánto jarabe (L) se requerirá preparar?
4) ¿Qué cantidad de azúcar y agua se necesita para preparar el jarabe?
5) Determine el costo unitario y diga si es competitivo o no, si se quiere obtener una ganancia de 35% y el costo de venta de la competencia es de $11.50.
6) Elabore un diagrama de bloques en donde indique las sustancias y cantidades a la entrada y salida de cada operación unitaria.
7) Elabore un diagrama de símbolos en donde indique las sustancias y cantidades a la entrada y salida de cada operación unitaria.
8) Realice el balance parcial de cada operación unitaria y el balance total del proceso de producción.

Solución:

Datos proporcionados por el problema:

la masa de solución de NaOH para el escaldado = 6%

el escaldado es efectuado en el durazno, la piña y el albaricoque

el llenado del envase se efectúa con: 70% de frutas y con 30% de jarabe

$$\text{la composición del jarabe es} = \frac{537 \text{ g de azúcar}}{1 \text{ L de jarabe}}$$

la densidad del jarabe = 1,54 g/mL

la capacidad de la lata es de 850 g con un espacio vacío de 10%

el costo del azúcar = $6,00/kg

1) Para el cálculo de la fruta requerida para 5 000 latas/día se tiene (llenado por lata):

$$= 850 \text{ g} \left| \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right| \left| \frac{90\%}{100\%} \right| = 0{,}765 \frac{\text{kg}}{\text{lata}}$$

y para calcular la fruta necesaria para el llenado de las latas se tiene:

$$= \frac{0{,}765 \text{ kg}}{\text{lata}} \left| \frac{70\% \text{ fruta}}{100\% \text{ producto}} \right| \left| \frac{5000 \text{ latas}}{\text{día}} \right| = 2677{,}5 \text{ kg fruta/día}$$

Cantidad de fruta necesaria:

Fruta	% peso	Cantidad de fruta al día	Cantidad (kg) (% peso × cantidad de fruta al día)
Durazno	30,0	2 677,5	803,25
Pera	30,0		803,25
Piña	20,0		535,50
Albaricoque	15,0		401,62
Uvas sin semilla	2,5		66,94
Cerezas	2,5		66,94
Total	**100**		2 677,5

2) Los litros de solución de NaOH utilizada para el escaldado son:

con 3 litros de solución se tienen 3 kg de fruta

la masa total de la fruta es:

$$\begin{aligned} m_t &= m_{\text{durazno}} + m_{\text{piña}} + m_{\text{albaricoque}} \\ &= 803{,}25\ \text{kg} + 535{,}50\ \text{kg} + 401{,}62\ \text{kg} \\ &= 1\ 740{,}37\ \text{kg} \end{aligned}$$

así, se obtiene la cantidad de la solución necesaria

$$= \frac{1\ \text{L solución}}{3\ \text{kg fruta}} \times 1\ 740{,}3\ \text{kg}$$

$$= 580{,}12\ \text{L de solución}$$

y de la definición de la densidad

$$\text{densidad} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}}$$

se tiene

$$m = 580{,}12\ \text{L} \times 1{,}03\ \frac{\text{g}}{\text{mL}}$$

entonces la preparación de la solución queda de la siguiente manera:

Sustancia	Composición % peso	Masa (kg)
NaOH	6	34,807
H_2O	94	545,313
Total	100	580,12

3) El volumen de jarabe empleado es:

$$m_{\text{jarabe}} = \frac{0{,}765\ \text{kg}}{1\ \text{lata}}\left(\frac{30\%\ \text{jarabe}}{100\%}\right) 5000\ \text{latas} = 1147{,}5\ \text{kg}\left|\frac{1000\ \text{g}}{1\ \text{kg}}\right| = 1147{,}5 \times 10^3\ \text{g}$$

Volumen

$$V(L) = \frac{1147{,}5 \times 10^3 \text{ g}}{1{,}54 \text{ g/mL}} = 745{,}13 \times 10^3 \text{ mL} \left| \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} \right| = 745{,}13 \text{ L}$$

4) La masa de azúcar y agua necesarios para preparar el jarabe:

$$1 \text{ L jarabe} = 537 \text{ g azúcar} \left| \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right| = 0{,}537 \text{ kg}$$

$$m_{\text{jarabe}} = 1000 \text{ mL} \times 1{,}54 \text{ g/mL} = 1540 \text{ g} \left| \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right| = 1{,}54 \text{ kg}$$

$$\text{masa de agua} = 1{,}54 \text{ kg} - 0{,}537 \text{ kg}$$

$$= 1{,}003 \text{ kg}$$

Preparación del jarabe:

Sustancia	masa en kg para 1 L	Composición % peso	masa kg
Azúcar	0,537	34,87	400,13
H_2O	1,003	65,13	747,37
Total	**1,54**	**100%**	**1 147,5**

5) Para obtener el costo unitario, se elabora la tabla para calcular el costo de la fruta:

Sustancia	% peso	Cantidad (kg)	Costo de la fruta ($)	Costo total ($)
Durazno	30,0	803,25	$20,00/kg	16 065
Pera	30,0	803,25	$12,00/kg	9 639
Piña	20,0	535,50	$ 3,50/kg	1 874,25
Albaricoque	15,0	401,62	$ 9,00/kg	3 614,58
Uvas sin semilla	2,5	66,94	$ 21,00/kg	1 405,74
Cerezas	2,5	66,94	$ 30,00/250 g	8 032,80
Total	**100**	**26 77,5**		40 631,37

El costo de la fruta por lata es:

costo de la materia prima

$$\text{Costo de fruta} = \$40\,631{,}37$$

$$\text{Costo del azúcar} = 400{,}13 \text{ kg} \left(\frac{\$6{,}00}{\text{kg}} \right) = \$2\,400{,}78$$

$$\text{Costo de la materia prima} = \$40\,631{,}37 + \$2\,400{,}78$$

$$= \$43\,032{,}15$$

entonces el costo de las materias primas por lata es:

$$\$ = \frac{\text{costo total}}{\text{latas}} = \frac{\$43\,032{,}15}{5\,000 \text{ latas}} = 8{,}61 \text{ \$/lata}$$

Precio de venta = costo de materia prima + ganancia

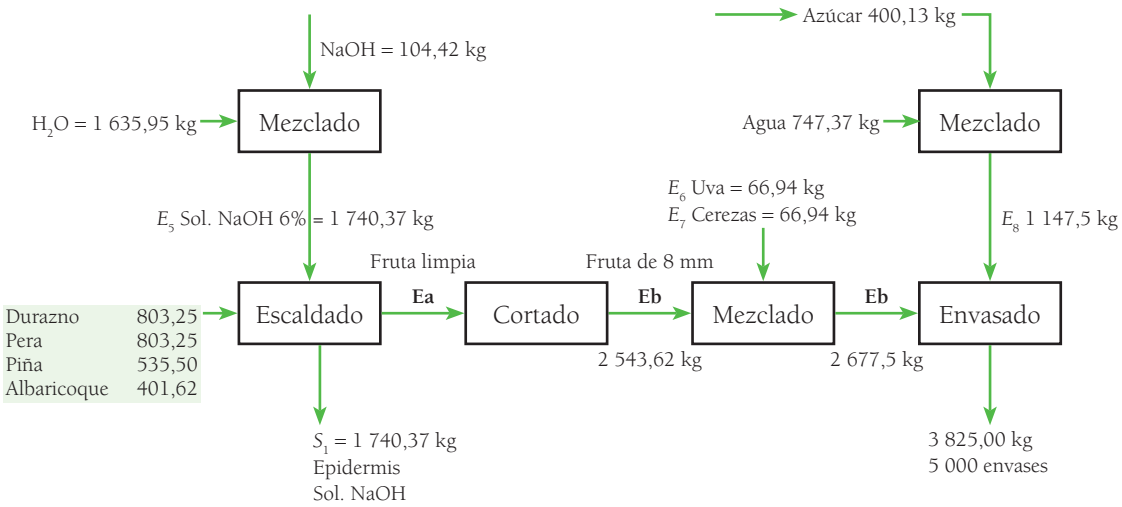
$$\$ \text{ venta} = 8{,}61 \frac{\$}{\text{lata}} = 11{,}62 \text{ \$/lata}$$

Precio de la competencia $11,50

Precio del producto $11,62

Por lo anterior no es competitivo

6) y 7) Diagrama de bloques



8) Balance parcial

Escaldado

Cortado

Ea = Eb

2 543,62 kg = 2 543,62 kg

masa en las corrientes			
entrada	**kg**	**salida**	**kg**
E_1	803,25	S_1	1 740,37
E_2	535,50	S_2	2 543,62
E_3	401,62		
E_4	803,25		
E_5	1 740,37		
Total	4 283,99		4 283,99

Masas en las corrientes (kg)							
Mezclado				Envasado			
E_b	2 543,62	E_c	2 677,5	E_c	2 677,5	S_2	3 825
E_6	66,98			E_8	1 147,5		
E_7	66,98						
Total	2 677,5		2 677,5	**Total**	3 825,0		3 825

Balance total

Masa			
corriente	**(kg)**	**corriente**	**(kg)**
E_1	**503,25**		
E_2	**535,50**		
E_3	401,62		
E_4	803,25	S_1	**1 740,37**
E_5	1 740,37	S_2	**3 825,00**
E_6	66,44		
E_7	66,44		
E_8	1 147,55		
Total	5 565,37		5 565,27

7.10 Problemas

1. El proceso de industrialización de los orejones de durazno es el siguiente:

Primero, la fruta se escalda con una solución de sosa a 6% peso, después se corta en rodajas de 1 cm de ancho, se introduce a un deshidratador para eliminar 30% de agua contenida y se pierde además 75% de vitaminas; después se introduce en otro desecador donde se elimina agua.

Con la descripción anterior determine:

a) La cantidad en kg de orejones que se obtienen al procesar 600 toneladas de fruta.

b) Elabore el diagrama correspondiente indicando las entradas y salidas.

c) % peso del producto final.

d) Realice el balance total.

2. Los granos de café contienen componentes solubles en agua y otros que no lo son. El café soluble instantáneo se produce al diluir la porción soluble en agua hirviendo en grandes silos, ésta se pasa a los tamices y luego se alimenta a un evaporador de triple efecto en el cual se evapora gran parte del agua, se bombea a un secador por aspersión donde se termina de eliminar el agua y el café queda como un polvo seco. La parte insoluble de los granos atraviesa tres operaciones de secado; el material seco se emplea como combustible o relleno de terrenos. Las soluciones extraídas de este material se alimentan al secador de aspersión junto con los efluentes del evaporador de triple efecto. A partir de la descripción de este proceso, realice un diagrama de flujo con símbolos rotulando todas las alimentaciones, productos y corrientes que conecten entre sí a las unidades.

3. El proceso que se describe es la hidrogenación del carbono para obtener gasolina sintética. Dibuje un diagrama de flujo con símbolos del equipo.

"Se alimenta carbón y catalizador a un triturador, la descarga se empasta con aceite de un depósito; una bomba toma la pasta, la comprime y la introduce en un horno donde se da la reacción H_2 a 450 °C y 200 atm. El producto caliente pasa por una centrífuga para separar lo evaporable que se envía a una columna de destilación. El aceite pesado que descarga la centrífuga y la columna por su fondo, va a un depósito para recircularlo después y empastar más carbón. El destilado de la columna se lleva al horno de gasolina donde reacciona el H_2 en presencia del catalizador granulado a 45 °C y 200 atm. El producto gaseoso pasa a otra columna de destilación que descarga gases licuables (propano) y gasolina (fondo) que se purifica con lejía alcalina."

4. Al efectuarse una reacción química se obtuvieron los siguientes gases, con su respectiva composición en % peso, con un flujo de 257 kg/h.

Compuesto	% peso
N_2	36
CO_2	28
O_2	16
H_2O	20

Esta mezcla se envía a una columna de adsorción donde 90% de la humedad se separa. Después la mezcla gaseosa resultante se introduce a una columna de absorción donde se separa 76% del CO_2. Finalmente se mezcla la corriente gaseosa de la absorción con una corriente de 620 kg/h de aire, cuya composición es de 21% peso de O_2 y 79% peso de N_2.

Con la descripción anterior determine:

a) La composición de la mezcla gaseosa después del mezclado en % peso.

b) Las cantidades separadas en cada equipo.

c) Realice los balances parciales y el balance total.

d) Elabore el diagrama de bloques y símbolos para todo el proceso.

5. Un pequeño negocio naturista ha comercializado con éxito su ensalada "Fruti-Light" la cual se prepara de acuerdo a la siguiente composición (considere que la ensalada ya preparada para una persona en promedio pesa 1,55 lb y diariamente se preparan unas 55 ensaladas individuales):

Fruta	% peso	Precio promedio de compra
Pera	22	$ 1,20/100 g
Melón	10	$ 5,00/kg
Papaya	15	$ 3,00/kg
Manzana	32	$ 6,80/lb
Nuez	3	$ 0,05/g
Yogur	9	$ 15,00/kg
Miel	7	$ 0,35/10 g
Granola	2	$ 18,20/lb

a) Determine la cantidad en kg que se consume de materia prima durante 5 días de trabajo.

b) El dueño del negocio piensa que 55 ensaladas al día es una buena venta pero no observa las utilidades; tiene dos teorías:

- Su precio de venta de $20,00 pieza es muy bajo.
- El encargado está robándole dinero.
- ¿Cuál será la verdadera razón? Fundamente su respuesta con cálculos.

6. En la elaboración de la jalea de fresa primero se lava y desinfecta la fruta eliminando la corola y las basuras que pudiera tener, con lo cual se obtiene 55% peso de fresa utilizable. Después se le agrega el azúcar, la pectina, el ácido cítrico y una pizca de sal, se mezcla y calienta hasta ebullición con la finalidad de conseguir una mezcla espesa y pesada que se vacía en moldes y se refrigera.

Si la composición en % peso de la jalea de fresa y el costo de las materias primas es el siguiente:

Ingrediente	% peso	Costo
Fresa	50,00	$ 5,00/kg
Azúcar	40,00	$ 6,50/kg
Ácido cítrico	9,80	$ 20,00/100 g
Pectina	0,15	$ 10,00/25 g
Sal	0,05	$ 0.05/500 g

a) Elabore un diagrama de bloques indicando las operaciones unitarias involucradas en el proceso.

b) Elabore un diagrama de símbolos donde indique cada operación unitaria del inciso anterior.

c) Si se desea fabricar 50 recipientes de jalea de fresa de 450 g cada uno, ¿qué cantidad de cada materia prima se necesita?

d) ¿Cuál es el costo de cada materia prima y cada recipiente de jalea de fresa?

e) ¿Cuál es el costo de toda la producción si 40% del costo de la fresa equivale a los costos de producción?

f) Indique qué otros costos aparte de la materia prima se deben tener en cuenta en una producción.

g) Realice el balance total y los balances parciales en este proceso.

7. Para la fabricación de refrescos de cola se prepara un jarabe concentrado con la siguiente formulación:

Extracto de cola	12,00 kg
Solución azucarada (71,34% peso de azúcar)	1 500,00 g
Solución de ácido fosfórico (29% peso de ácido)	6,00 kg
Cafeína	3,00 kg
Color caramelo	6.75 kg

Al jarabe se le inyecta CO_2 para obtener el refresco. Para ello se coloca en cada botella 485,30 cm^3 de jarabe (densidad del jarabe = 1,5 g/mL).

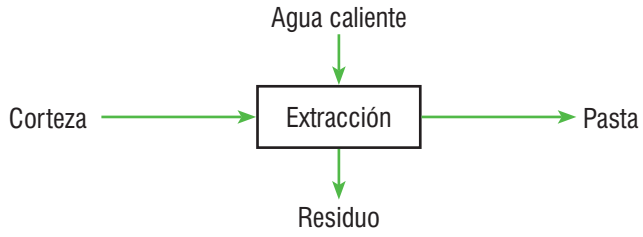
La jornada laboral es de dos turnos de ocho horas cada uno, seis días a la semana y 11 meses al año. Determine:

a) La composición porcentual del jarabe concentrado.

b) La cantidad de agua que llevan las soluciones de la fórmula.

c) ¿Cuántos envases se van a llenar al año si sólo 85% del jarabe es envasado y el resto se almacena?

8. En una industria se extrae la corteza de mangle con un peso de 1,5 toneladas, con la siguiente composición porcentual en peso: 38% de agua, 37% de taninos y 25% de sólidos solubles. La madera finamente molida se somete a un proceso de extracción donde se agregan 0,5 toneladas de agua caliente para obtener una pasta que contiene 62% de agua de la alimentación, 2,8% de taninos y 35,2% de sólidos solubles que no son taninos (todos estos porcentajes se relacionan con la alimentación total) de acuerdo con el siguiente diagrama:



Determine:

a) La cantidad de masa que hay de los componentes en la corteza.

b) ¿Qué cantidad en masa hay de los componentes en la pasta?

c) ¿Cuál es la masa y composición porcentual del residuo extraído?

d) Realice el balance total.

9. Una empresa que produce gajos de mandarina en almíbar alimenta al proceso 180 kg/h de fruta entera. Ésta se selecciona y hay una pérdida de 3% de fruta que se encuentra en mal estado. La fruta de calidad se envía al pelado y se elimina 18% en peso de cáscara respecto al peso de fruta seleccionada. Finalmente se desgaja y se mezcla con el jarabe. La mezcla se envasa en frascos de 500 g; la composición del contenido de cada envase es 50% peso de gajos y 50% peso de jarabe. El jarabe utilizado tiene la siguiente composición porcentual:

Ingredientes	% peso	Costo
Azúcar refinada	50,00	$ 7,00/kg
Agua	24,97	$ 0,80/L
Glucosa	20,00	$ 7,61/kg
Citrato de sodio	3,00	$ 0,60/kg
Ácido cítrico	2,00	$ 0,50/kg
Benzoato de sodio	0,03	$ 0,65/kg

Los frascos se colocan en cajas y cada una de ellas contiene 18 frascos. Determine:

a) La cantidad de materia prima que se requiere para preparar el jarabe, para la producción en una hora.

b) El costo del jarabe para la producción en una hora (densidad del agua 0,998 g/mL)

c) La cantidad de frascos utilizados para la producción en una hora.

d) El número de cajas utilizadas para la producción en un minuto.

e) La cantidad en kg de la fruta en mal estado y de cáscara separada.

f) El costo de la mandarina en una hora de trabajo si el precio es de $2,85/kg.

g) Realice el balance total del proceso.

h) En una etapa del proceso la fruta se escalda con una solución de hidróxido de sodio al 1% peso. Para toda la producción se requieren 150 litros de solución de NaOH (densidad = 1,02 kg/L). Si en el almacén hay 250 L de solución de NaOH a 15% peso y toda el agua necesaria, ¿alcanzará para escaldar toda la fruta?

10. Para producir agua dulce a partir de agua de mar se utiliza un evaporador de doble efecto. El agua de mar contiene aproximadamente 4% de sales disueltas.
Se alimentan:
100 000 kg/h de agua de mar al primer evaporador, en la corriente de salmuera de salida las sales representan el 6,6% y en la descarga del segundo evaporador la sal contiene 18% de humedad.

a) Indique ¿cuánta agua dulce se obtiene?

b) Realice el balance de material de este proceso.

11. En un proceso de desalinización de agua de mar para producir agua dulce, se utiliza un sistema de tres evaporadores. El proceso se inicia alimentando 400 ton/día de agua de mar, con una composición en peso de 2,5% de cloruro de sodio, 1% de cloruro de potasio y 1% de otras sales minerales. Se sabe que a la salida de cada evaporador se obtienen las siguientes cantidades de agua de mar concentrada:
1er evaporador 353 Ton, 2do evaporador 279,63 Ton, 3er evaporador 200,35 Ton.
Con estos datos determinar:

a) La cantidad de vapor generado libre de sales minerales en los tres efectos (agua dulce).

b) Composición porcentual en peso a la salida del último evaporador.

c) De acuerdo al proceso descrito, si se solicitaron 300 Ton de agua sin sales, ¿cuánta agua de mar se tendrá que tratar?

12. Una mezcla de hidrocarburos está constituida por 40% de tolueno, 40% de benceno y 20% de xileno; para separar sus componentes se somete a dos destilaciones, en la primera unidad por la corriente del destilado se separa 10% del tolueno y 80% del benceno que se alimentó. La corriente de los fondos se lleva a una segunda columna de destilación, cuya corriente de salida de los fondos está constituida por 10% de tolueno y 90% de xileno. La corriente del destilado está formada por tolueno y benceno. Para una alimentación de 2 400 kg de mezcla, calcule:

a) Masa total y composición porcentual en la corriente del destilado de la primera unidad.

b) Masa total y composición porcentual en la corriente de los fondos del destilado de la primera unidad.

c) Masa total de la corriente del destilado y composición porcentual del destilado de la segunda unidad.

d) Masa total de la corriente de los fondos del destilado de la segunda unidad.

e) Establecer el balance global.

7.11 Tema de actualidad

La desalinización del agua de mar

Por: Manuel Fuentes Díaz

El origen del agua de los océanos

Una de las teorías más aceptadas al respecto es la que atribuye su formación a partir de que las erupciones volcánicas fueron liberándola gradualmente de la superficie terrestre; es decir, que el agua contenida en forma gaseosa en las rocas brotó primero hacia la atmósfera. Esta teoría se sustenta en estudios que comprueban que los volcanes activos expulsan vapor en sus erupciones.

Cientos de millones de años después de haberse liberado de tal modo grandes cantidades de vapor de agua hacia la atmósfera, éste acabó por enfriarse y condensarse para luego caer ya en forma de lluvias torrenciales sobre la superficie del planeta. Así se formaron los océanos.

Por otra parte, el agua de los océanos es salada porque es una solución acuosa en la que se encuentran disueltos una variedad de materiales sólidos, principalmente sales, así como gases atmosféricos; a los mencionados sólidos se suman también materiales suspendidos orgánicos e inorgánicos y, junto con los anteriores, forman parte de esta solución acuosa algunos organismos microscópicos vivos, vegetales y animales, conocidos respectivamente como fitoplancton y zooplancton, que al poblar el agua de los océanos participan de su composición, actuando sobre las concentraciones de las sustancias disueltas o suspendidas.

La presencia de sales en el agua del mar puede explicarse por la ocurrencia de dos procesos:

➥ El primero tiene relación con las aguas liberadas en las erupciones volcánicas que se mencionan al principio, las cuales incluyen muchos de los componentes actualmente ya conocidos.

Tabla 7.16. Constituyentes principales del agua de mar.

Constituyente	Símbolo	g/kg en agua de mar	% por peso
Cloruro	Cl^-	19,35	55.07
Sodio	Na^+	10,76	30,62
Sulfato	SO_4^-	2,71	7,72
Magnesio	Mg^{++}	1,29	3,68
Calcio	Ca^{++}	0,41	1,17
Potasio	K^+	0,39	1,10
Bicarbonato	HCO_3^-	0,14	0,40
Bromuro	Br^-	0,067	0,19
Estroncio	Sr^{++}	0,008	0,02
Bario	B	0,004	0,01
Fluoruro	F^-	0,001	0,01
Total	**----**	**----**	**99,99**

➥ El segundo proceso se refiere al aporte de sales al océano mediante el lavado que las lluvias y los ríos efectúan en los continentes, debido a la gran capacidad de disolución del agua. Se ha estimado que cada año llegan al mar 3×10^{12} toneladas de sales de los continentes, lo que en realidad contribuye en una proporción insignificante a la concentración total de las mismas.

En virtud de la abundancia con que se hallan presentes en el agua de mar, las sales disueltas descritas en la tabla 7.16 se reconocen como **constituyentes principales**, mientras que otras, que lo están en cantidades más pequeñas, se denominan **constituyentes secundarios**. Parte de ellos son los nutrientes (nitrato, NO_3^-; fosfato, PO_4^-; nitrito, NO_2^-; silicato, $Si(OH)_4$, y amonio, NH_4^+).

Los constituyentes principales figuran como iones metálicos e iones básicos en los porcentajes expuestos en la tabla 7.17, en tanto que los constituyentes secundarios no superan 0,025% de los primeros, a pesar de lo cual desempeñan una función importante en relación con la actividad biológica del mar.

Los diversos tipos de agua

De acuerdo con la cantidad de sales que contienen, hay varios tipos de agua. En tal sentido, se clasifican de la siguiente forma:

Tabla 7.17. Tipos de agua (I).

Tipo	Salinidad (ppm de TDS)
Ultrapura	0,03
Pura (calderas)	0,3
Desionizada	3
Dulce (potable)	< 1 000
Salobre	1 000–10 000
Salina	10 000–30 000
Marina	30 000–50 000
Salmuera	> 50 000

Tabla 7.18. Tipos de agua (II).

Origen	CE dS/m	SDT (mg/l)	Tipo
Aguas de abastecimiento urbano y de riego	< 0,7	< 500	No salina
Aguas de riego	0,7 – 2	500 – 1 500	Ligeramente salina
Aguas de drenaje y subterráneas	2 – 10	1 500 – 7 000	Moderadamente salina (salobre)
Aguas de drenaje y subterráneas	10 – 20	7 000 – 15 000	Salobre
Aguas subterráneas	20 – 45	15 000 – 35 000	Salina
Agua de mar	> 45	> 35 000	Muy salina

La salinidad del agua está en función del tipo de sales que contenga, éstas pueden ser cloruro de sodio u otras como carbonatos, sulfatos, silicatos, etcétera.

Por otra parte, dependiendo de la región, la concentración de sales varía, por ejemplo, el agua del Atlántico es diferente a la del Pacífico, como puede observarse en la tabla 7.19 entre otros casos:

Tabla 7.19. Concentraciones de sales en distintos mares y océanos.

Mar/océano	Salinidad (ppm de TDS)
Mar Báltico	28 000
Mar del Norte	34 000
Océano Pacífico	33 600
Océano Atlántico Sur	35 000
Mar Mediterráneo	36 000
Mar Caribe	36 000
Mar Rojo	44 000
Golfo Pérsico	43 000–50 000
Mar Muerto	120 000–370 000
Media mundial	34 800

La desalación del agua

Respecto de cómo es correcto llamar al proceso de devolverle al agua su carácter de potable, al eliminar de ella la cantidad excesiva de sales que contenga, "desalar" o "desalinizar", ambas respuestas son correctas de acuerdo con la Real Academia Española. Sin embargo, el primero de estos términos es el más utilizado; así pues, "desalar" es quitar la sal al agua por diferentes métodos, los cuales se agrupan en tres categorías:

1. Sistemas térmicos (destilación térmica, MSF, MED; destilación solar, CV, etcétera).
2. Sistemas de membrana (ósmosis inversa; electrodiálisis).
3. Otros: intercambio iónico, congelación, energía nuclear.

Dentro de los procesos de desalación, la ósmosis inversa (OI) es uno de los más utilizados en América y Europa. Para explicar en qué consiste, recuerda el experimento que se hace en la secundaria donde, en un recipiente dividido por un celofán (membrana semipermeable), se pone de un lado agua saturada con sal y del otro agua de la llave. El fenómeno de la ósmosis ocurre cuando el agua salada empieza a filtrarse a través del celofán y a entrar en equilibrio con el agua dulce (de la llave), dando por resultado que al final del día la concentración de sal de cada lado de la membrana es la misma. Otro ejemplo de este proceso es lo que sucede con las células de los seres vivos, al igualarse las concentraciones de sales de la mayor a la menor concentración a través de la membrana celular. La fuerza que provoca este movimiento, hasta que se alcanza el equilibrio, se llama "presión osmótica".

La ósmosis inversa es el fenómeno donde se aplica presión a una solución salina y se hace pasar a través de una membrana semipermeable, por la que sólo pasa el agua y las sales son retenidas en su mayoría; esto provoca un alto consumo energético.

Otro método, más frecuente en los países árabes, es el térmico, que consiste en aplicar al agua energía en forma de calor para evaporarla y luego condensarla. El condensado se recolecta ya en forma de agua dulce o baja en sales. En estos métodos se aplica vacío para bajar el punto de ebullición del líquido.

Los beneficios de la desalación de agua en cuanto a los usos que de ella pueden hacerse ya en esa condición, son infinitos, así como su disponibilidad. Uno de los beneficios más impactantes es lograr el desarrollo de ciuda-

des o poblaciones donde no hay agua potable, como en las islas del Caribe, las islas españolas, Japón, Singapur y los países árabes, o en zonas de baja disponibilidad como Florida y California, en Estados Unidos o Baja California, Baja California Sur y Sonora, en México, y en el norte de Chile y Venezuela.

Ahora bien, es posible mencionar asimismo varios aspectos negativos de este proceso: los costos iniciales de inversión son altos, y los gastos de operación y mantenimiento no son competitivos respecto a los de la extracción en pozos y los del tratamiento de aguas superficiales. Por ello, la desalación se recomienda sólo cuando no existe otra alternativa más económica para obtener agua potable. Además, se requiere personal especializado para el manejo del equipo y las refacciones son costosas.

La desalación en México

Actualmente el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) cuenta con el inventario nacional de desaladoras actualizado. Existen en México 320 sitios donde están instaladas desaladoras y en éstos hay 435 plantas. Esta infraestructura se halla distribuida en todo el país; el estado con el mayor número de desaladoras es Quintana Roo, con 124 unidades; le sigue Baja California Sur, con 71. Este último cuenta con la planta municipal más grande del país, en los Cabos, que produce 200 L/s de agua potable (17 280 m^3/d) y abastece a una parte de Cabo San Lucas. Es una concesión por 20 años a una empresa española, y el costo por m^3 actualmente está alrededor de los $10,50 pesos mexicanos.

Quizá surjan las preguntas acerca de qué se obtiene como resultado de este proceso y qué se hace con los desechos o residuos que quedan después de la desalación. Pues bien, tanto de los procesos térmicos como de los de membrana se obtienen dos productos: el agua destilada o baja en sales (a la que es necesario darle un postratamiento para que sea apta para consumo humano y no provoque problemas de corrosión en las redes de distribución) y la salmuera (que es el concentrado de sales de estos procesos y es de tal modo un desperdicio con una concentración doble de sales, la cual debe ser desechada de manera adecuada). Lo anterior quiere decir que si tengo agua de mar, cuya concentración es de 35 000 ppm de sal, al desalarla se tendrá un agua baja en sales, menor a 100 ppm, y que además el rechazo o salmuera, con una concentración de 70 000 miligramos por litro.

Los residuos de las plantas desaladoras se desechan en dos formas:

a) si existe terreno suficiente, se llevan a lagunas de secado, donde el agua se evapora; la sal que queda es confinada, ya que tiene químicos (antincrustantes) que no permiten su utilización para el consumo humano.

b) El método de disposición de salmuera más común es su depósito en el océano, por medio de difusores ubicados mar adentro; el mar diluye en segundos las altas concentraciones de sal que por ese medio se le agregan. Es necesario no hacer estas descargas de salmuera en sitios muy frágiles en el aspecto biótico, como los bancos de coral. Un dato curioso es que la sal que hay ya en los mares del mundo es tanta, que si la extrajéramos en su totalidad cubriríamos con ella todos los continentes con una capa de 1,5 m de alto.

Los proyectos del IMTA en este campo

En el IMTA se trabaja en varios aspectos de la desalación:

➥ En primer lugar, cada dos años se actualiza el inventario de plantas del país y obtener esta información no es fácil.

➥ Se investiga sobre energías alternas de desalación, pensando en comunidades alejadas con problemas de aguas salobres y que no cuentan con agua potable.

- Se experimenta el uso de materiales de desecho para la elaboración de destiladores solares.
- Asimismo, se estudia un sistema de bajo mantenimiento, que consiste en la sustitución de los destiladores cada dos años. El costo de la sustitución es de 250 pesos. El costo del sistema es de 5 000 pesos, e incluye:

a) Tinaco de 450 litros (depósito de agua salobre).
b) Estructura metálica para los destiladores, calentador solar.
c) 40 destiladores solares tubulares, instalación hidráulica.
d) Recolector de destilado.

- El sistema produce en promedio diez litros de agua fresca por día, y ocupa no más de 6 m^2.
- Otra línea de trabajo que se explora en el IMTA es el uso de plantas acuáticas para desalar. En este sentido, trabaja con *Najas marina*, una hidrófita enraizada sumergida que se encuentra en el lago de Tequesquitengo. Tesistas de licenciatura de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM) participan en este proyecto.
- Una línea de trabajo más es la elaboración de lineamientos adecuados para las plantas desaladoras que nos indicará los aspectos que deben cuidarse con miras a su instalación.
- Por otra parte, en la actualidad se construye (para inaugurarse en 2009) el laboratorio de membranas más grande de Latinoamérica. Contemplará los siguientes procesos:

a) Ósmosis inversa para agua de mar.
b) Ósmosis inversa para agua salobre.
c) Nanofiltración.
d) Ultrafiltración.
e) Microfiltración.
f) Filtración con arena.
g) Desinfección con ozono.

El laboratorio contará con un banco de pruebas de membranas y con un área de autopsias para las mismas; y todo esto significa que con este laboratorio será posible hacer pruebas de tratabilidad *in situ* en cualquier parte de la República Mexicana. Por lo que respecta a la formación de especialistas en este aspecto, se invita a los alumnos de ingeniería química o mecánica que quieran hacer su tesis de licenciatura o de maestría sobre el tema que participen con trabajo, así como estancias.

Evolución posible de esta tecnología

Estos sistemas cambian tan rápido como las computadoras; en tan sólo 2 o 3 años hay ya otro tipo de membranas resistentes al cloro, por ejemplo, al ensuciamiento, y los costos disminuyen en forma significativa. Hace diez años, para desalar agua por el método de ósmosis inversa (OI) se requerían 10-15 kWh/m^3, y el m^3 tratado costaba entre $12,00 y $18,00 pesos. Ahora los equipos producen agua con hasta 2,8 kWh/m^3, y el costo va de los $6,00 a los $8,00/$m^3$.

Los equipos de ósmosis inversa y térmicos ya operan en México; sólo falta difundirlos en estados como Sonora o en ciudades como Tijuana y La Paz, donde hay problemas serios de disponibilidad de agua y pocas opciones de abastecimiento. En cuanto a los desarrollos conjuntos entre México y otros países, hay posibilidad de un proyecto entre las ciudades de San Diego y Tijuana, para construir una planta desaladora en el lado mexicano con dinero estadounidense; pero aún no hay nada definitivo. Pero, en general, la desalación en México crece a pasos

agigantados. A principios de 2009 se creará la Asociación Mexicana de Desalación, que agrupará a los principales investigadores del país sobre el tema. El crecimiento del número de desaladoras ocurre principalmente en toda la península de Baja California. En Puerto Peñasco, Sonora (conocido por los estadounidenses como Little Rock) dio inicio la construcción de otra planta desaladora concesionada, que abastecerá a ese centro turístico en desarrollo. Por otra parte, en 2008 se detuvo la construcción de plantas desaladoras en la Riviera Maya, pues la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado de Quintana Roo está negociando con todos los hoteleros que las poseen para que se conecten a la red de agua potable que de manera reciente han construido para ellos. Los nuevos desarrollos estarán obligados a integrarse a dicha red de agua potable, por lo que la desalación en esta zona dará un giro de 180° en relación con el aumento de desaladoras en la región los próximos años.

7.12 Bibliografía

Cengel, Yunus A. *Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico,* 1ª ed., McGraw-Hill Interamericana, México, 2007.

Krajewski, Llee J. *Administración de operaciones: procesos y cadenas de valor*, 8ª ed., Pearson Prentice Hall, México, 2008.

Puigjaner, Luis. *Estrategias de modelado, simulación y optimización de procesos químicos,* 1ª ed., Editorial Síntesis, España, 2006.

Treybal, Robert E., *Operaciones de transferencia de masa,* 2ª ed., McGraw-Hill Interamericana, México, 1996.

Welty, James R., *Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa,* 3ª ed., Limusa, México, 2005.

Capítulo

8

Balance de masa y energía en sistemas con reacción química

Central nuclear, Temelin, República Checa. (*Jupiter Images Corporation*)

8.1 Introducción

Este capítulo está dedicado al estudio de los sistemas reaccionantes y los diferentes conceptos relacionados con este tema. Una definición fácil y sencilla de un sistema reaccionante es la siguiente: "sistema reaccionante es el proceso durante el cual ocurre una transformación química de los componentes". En dicho proceso intervienen sustancias que reaccionan

entre sí para formar otras sustancias diferentes. Las sustancias que se transforman son los reactivos y las que se forman son los productos.

A continuación se hace una recopilación acerca de los principios del balance de masa y se ejemplifica la metodología propuesta para la solución de problemas.

8.2 Conceptos básicos usados en el balance de materia

8.2.1 Estequiometría

El término estequiometría se deriva del griego *stoicheion*, que significa "primer principio o elemento" y de *metrón*, que significa "medida". La estequiometría estudia las relaciones cuantitativas entre elementos y compuestos cuando éstos experimentan cambios químicos, y establece las proporciones en que las especies químicas intervienen en una reacción. Es una herramienta indispensable en la química; por ejemplo, cuando se requiere saber qué cantidad de un producto es posible obtener en una reacción química, o la cantidad de reactivo que se requiere para obtener cierta cantidad de producto, las relaciones estequiométricas pueden dar la respuesta, de tal forma que siempre sea factible alimentar los reactores con las cantidades adecuadas de reactivos y obtener los productos deseados.

Para entender la estequiometría, primero hay que comprender con claridad los siguientes términos:

- **Átomos y sus símbolos.** Los átomos son demasiado pequeños para observarse o pesarse individualmente; en la práctica están presentes en un gran número, por lo que es conveniente contar con una unidad que represente un número particular de ellos. Es por ello que se utiliza una unidad denominada mol, que contiene $6{,}023 \times 10^{23}$ átomos del elemento, o de unidades fórmula de la sustancia de que se trate. El número $6{,}023 \times 10^{23}$ se llama número de Avogadro, en honor de Amadeo Avogadro. Los átomos, los iones y las moléculas tienen masas definidas, por esa razón se dice que un mol, al contener un cierto número de átomos de un elemento o de unidades fórmula de una sustancia, también representa un peso determinado (peso atómico o peso molecular) de dicha fórmula. Los átomos se escriben con símbolos que son la representación gráfica de un elemento, por ejemplo el carbono se representa con el símbolo C; los símbolos representan no sólo el nombre de los elementos, sino que también especifican uno de sus átomos o un número prefijado ("mol") de sus átomos. En la tabla periódica se encuentran los símbolos de todos los elementos, y para representar los compuestos se combinan los símbolos de los átomos a fin de obtener las fórmulas químicas de los compuestos (véase tabla 8.1).

- **Fórmula química y subíndice.** Una fórmula química es la representación simbólica de un compuesto; incluye los elementos químicos que la conforman y la proporción en que se encuentra cada uno de éstos, de tal manera que indica la composición química de la sustancia. En las fórmulas químicas se emplean números que pueden estar como subíndices al lado de cada elemento, por ejemplo, para el hidrógeno, cuyo símbolo es H_2, el subíndice 2 indica que en la molécula de hidrógeno hay 2 átomos. O antecediendo la fórmula del compuesto de que se trate, como en el componente del cemento $4\ CaO \cong Al_2O_3 \cong Fe_2O_3$, que contiene la siguiente información (véase tabla 8.2).

- **Ecuación química y coeficientes estequiométricos.** Una ecuación química se refiere al fenómeno químico efectuado, tanto cualitativa como cuantitativamente, de acuerdo con la ley de la conservación de la materia.

Tabla 8.1. Los símbolos de los elementos químicos.

H 1																	He 2
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Cs 55	Ba 56	Lu 71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
Fr 87	Ra 88	Lr 103	Unq 104	Unp 105	Unh 106	Uns 107	Uno 108	Une 109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
119	120	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168

	La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70
Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 103	

Nota: elementos que faltan por descubrir.

Tabla 8.2.

Compuesto				
Nombre		**Fórmula**		
ferroaluminato tetracálcico		$4\ CaO \cong Al_2O_3 \cong Fe_2O_3$		
Átomos				
Especie	**Peso atómico (g/mol)**	**Cantidad en**		
		CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3
Ca	40	4	–	–
O	16	4	3	3
Al	27	–	2	–
Fe	55	–	–	2

Las ecuaciones químicas tienen las características de las igualdades matemáticas:

1. Presentan dos miembros separados por una flecha horizontal, que indica el sentido en que se verifica la reacción.
2. En el miembro de la izquierda se escriben las fórmulas de las sustancias de que se parte, o sustancias reaccionantes, separadas por signos de adición.
3. En el miembro de la derecha se escriben las fórmulas de las sustancias que se forman en la reacción química, o sustancias producidas, también separadas por signos de adición.

4. Ambos miembros de la ecuación química (izquierdo y derecho) deberán contener los mismos elementos y además el mismo número de átomos en cada uno de ellos.

Entonces, es posible decir que una ecuación química es la simbología que los científicos utilizan para describir un proceso químico, en el cual las sustancias reaccionan, con la formación o el rompimiento de enlaces, consumiendo o liberando energía.

El número de átomos del lado izquierdo de la ecuación química debe ser igual al número de átomos del lado derecho de la ecuación. Esta relación está expresada por los coeficientes estequiométricos de la reacción, los cuales indican la proporción de cada especie involucrada en una reacción química. Cuando se ha balanceado una ecuación química, los coeficientes representan las cantidades de cada especie que intervienen en esa reacción.

Cuando una ecuación está balanceada, se emplea la estequiometría para saber cuántos moles de un producto se pueden obtener a partir de un número conocido de moles de un reactivo.

La relación de moles entre reactivos y productos se obtiene de la ecuación ajustada (balanceada); es así que se considera a los coeficientes estequiométricos como el número conjunto de moléculas, átomos, iones o moles, es decir, la cantidad de materia que se consume o se forma.

Para la siguiente reacción química propuesta:

$$4\ NH_{3(g)} + 5\ O_{2(g)} \longrightarrow 4\ NO_{(g)} + 6\ H_2O_{(g)}$$

se tiene la siguiente tabla:

Tabla 8.3.

Sustancia	Coeficiente estequiométrico	Elemento	Número de átomos			
			En los reactivos		En los productos	
			NH_3	O_2	NO	H_2O
NH_3	4	N	4	–	4	–
O_2	5	H	12	10	–	12
NO	4	O			4	6
H_2O	6					
			16	**10**	**8**	**18**
		Total	**26**		**26**	

➥ **Isótopos o hílidos.** A cada especie distinta de átomos que pertenece a un mismo elemento y a las variedades de ese elemento que se puedan constituir, se les llama isótopos del elemento y también isótopos entre sí. Se dice que los isótopos de un elemento contienen el mismo número de protones, pero distinto número de neutrones en su núcleo. En una escala arbitraria, por ejemplo, en unidades de masa atómica (uma), el peso atómico del hidrógeno (H) es 1,0080 uma; el del sodio (Na) es 22,98977 uma y el del magnesio (Mg) es 24,305 uma. La razón por la que estos pesos atómicos no son números enteros se debe a que son el promedio de los pesos relativos de los isótopos de esos elementos. Los átomos de sodio pesan alrededor de 23 veces más que los de hidrógeno.

Los isótopos de un mismo elemento tienen las mismas propiedades químicas, pero sus propiedades físicas difieren entre ellos. Los isótopos se determinan utilizando el espectrómetro de masas, instrumento que indica tanto la masa del isótopo como su abundancia relativa o porcentaje natural.

En la tabla 8.4 se observan los isótopos de diferentes elementos, sus números de masa, su abundancia y sus masas atómicas.

La suma del número de protones y neutrones en un núcleo de un átomo, recibe el nombre de número de masa, la unidad de masa atómica (uma) representa la masa total de las protones y electrones. La masa atómica se calcula con la media de las masas de los distintos isótopos tomando en cuenta su abundancia relativa.

Tabla 8.4. Isótopos y abundancia isotópica de algunos elementos.

Nombre del elemento	Número de masa (uma)		Abundancia isotópica	Masa atómica
Hidrógeno	1 2	1,0078 2,01141	99,98 0,02	1,003
Carbono	12 13	12 13,0033	98,9 1,1	12,011
Oxígeno	16 17 18	15,9949 16,9991 17,9992	99,79 0,04 0,2	15,9994
Azufre	32 33 34 36	31,972 32,971 33,968 35,967	95,06 0,74 4,18 0,32	32,064

➥ **Peso atómico y peso molecular*.** El peso atómico de un átomo se define como la masa en gramos de un mol de átomos. En términos más específicos, el peso atómico es el peso promedio del total de las masas de los isótopos naturales del elemento. El peso atómico de cada elemento se puede obtener de datos en listas alfabetizadas de elementos que aparecen en textos de química, por ejemplo, el hidrógeno es el elemento más ligero y el hassio es el elemento más pesado.

El peso molecular de un elemento o un compuesto es la suma de los pesos de los átomos que conforman una sustancia; por ejemplo, la molécula de hidrógeno tiene 2 átomos, cada uno con un peso atómico de 1,0080 uma (que por facilidad se aproxima a 1), de modo que su peso molecular es dos veces su peso atómico (véase tabla 8.5).

Tabla 8.5. Cálculo del peso molecular de una sustancia.

Especie química	Símbolo del átomo	Número de átomos (k)	Peso atómico* (PA) (g/mol)	Peso molecular+ (PM) (g/mol)
H_2SO_4	H S O	2 1 4	1 32 16	2 32 64
Total				**98**
CO_2	C O	1 2	12 16	12 32
Total				**44**

+ La expresión matemática para su cálculo se expresa como $PM = \sum_{i=1}^{n} kPA_i$

*Es el peso promedio de la masa de los isótopos considerando su abundancia relativa en la naturaleza.

➥ **Reactivo, reactivo limitante y reactivo en exceso.** Un reactivo o los reactivos, son los materiales que se introducen al inicio de un proceso, que participan en una reacción química y que al combinarse o descomponerse dan origen al producto del cambio

químico. En la representación de este cambio, los reactivos se escriben a la izquierda en la ecuación química.

Un **reactivo limitante** es el que se encuentra presente en una cantidad menor a la requerida para que la totalidad de los reactivos reaccione; este reactivo es el que se termina primero durante la reacción y por ello, determina la cantidad máxima de productos que es posible obtener.

Con frecuencia, uno de los reactivos se introduce en un reactor en una cantidad superior a la estequiométrica para mejorar la velocidad de la reacción o para limitar la formación de los subproductos, éste es el **reactivo en exceso**. En la práctica, lo normal suele ser que se use uno o más reactivos en exceso, para conseguir que reaccione la mayor cantidad posible del reactivo que se encuentran en menor cantidad.

➥ **Conversión, eficiencia y rendimiento.** Para describir la cantidad de reactivo consumido y la cantidad de producto formado en una reacción química se emplean los términos "conversión", "eficiencia" y "rendimiento".

Debido a las limitaciones termodinámicas, no todas las reacciones se llevan a cabo por completo; es decir, aunque aún haya reactivos, éstos ya no reaccionan.

La **conversión** se expresa como porcentaje y relaciona la cantidad de reactivo que se convierte químicamente en otra sustancia o sustancias, con la cantidad de reactivo que se introduce inicialmente en el proceso.

El porcentaje de conversión se define como la fracción de un reactivo que se convierte en producto, así se tiene:

$$\%\ \text{de conversión} = \frac{\text{moles que reaccionan}}{\text{moles que se alimentan}} \times 100$$

La conversión también puede expresarse en masas, con lo cual se obtiene el mismo valor que en moles:

$$\%\ \text{de conversión} = \frac{\text{masa que reacciona}}{\text{masa que se alimenta}} \times 100$$

Para aumentar la conversión del reactivo más costoso, los otros reactivos se alimentan en mayor proporción a la requerida de acuerdo con la estequiometría de la reacción.

La **eficiencia** también se expresa como porcentaje y relaciona la cantidad de reactivo que se ha convertido en el producto deseado, con la cantidad que ha sufrido una transformación química.

El **rendimiento** de una reacción se refiere a la cantidad obtenida del producto deseado, a partir de los reactivos introducidos en un proceso químico. Por ejemplo, en la producción de etilenglicol mediante la reacción:

$$\underset{\text{óxido de etileno}}{C_2H_4O} + \underset{\text{agua}}{H_2O} \longrightarrow \underset{\text{etilenglicol}}{C_2H_6O_2}$$

El rendimiento de la reacción se expresa como:

$$\frac{\text{masa etilenglicol}}{\text{masa de óxido de etileno}}$$

El rendimiento del proceso depende de la conversión y de la selectividad, cuando hay reacciones paralelas indeseables.

Ejemplo 1

A continuación se presenta un ejemplo de aplicación de los conceptos de conversión, eficiencia y rendimiento.

Si en la hidratación de etileno catalizado con ácido, se alimentaran a un reactor 6 moles de etileno y 10 moles de agua y el efluente del reactor contuviera 0,244 moles de etanol, 9,75 moles de agua y 5,748 moles de etileno, calcular:

a) La conversión del etileno.

b) La eficiencia del proceso.

c) El rendimiento de etanol basado en el etileno convertido.

d) El rendimiento de etanol basado en el etileno cargado.

Solución:

a) $$\%\ \text{conversión de etileno} = \frac{\text{masa inicial de etileno} - \text{masa final etileno}}{\text{masa inicial de etileno}} \times 100$$

$$\%\ \text{conversión de etileno} = \frac{6\ \text{moles} - 5{,}748\ \text{moles}}{6\ \text{moles} \times 100} = 4{,}20\%$$

b) $$\%\ \text{eficiencia del proceso} = \frac{\text{masa de etanol}}{\text{masa inicial de etileno} - \text{masa final de etileno}} \times 100$$

$$\%\ \text{eficiencia del proceso} = \frac{0{,}244}{6\ \text{moles} - 5{,}748\ \text{moles}} \times 100 = 97\%$$

c) $$\%\ \text{de rendimiento de etanol por etileno convertido} = \frac{0{,}244\ \text{moles}}{6\ \text{moles} - 5{,}548\ \text{moles}} \times 100$$

$$= 97\%$$

d) $$\%\ \text{de rendimiento de etanol por etileno cargado} = \frac{0{,}244\ \text{moles}}{6\ \text{moles}} \times 100$$

$$= 4{,}07\%$$

- **Pureza e impurezas de sustancias.** Las sustancias que se alimentan al reactor, generalmente no están puras sino que se encuentran como mezclas. La proporción del reactivo puro en la mezcla es su pureza:

$$\%\ \text{de pureza} = \frac{\text{masa del reactivo puro}}{\text{masa del reactivo total}} \times 100$$

No todos los reactivos empleados en los procesos químicos son puros, algunos contienen algunas sustancias cuya composición no corresponde al reactivo: son impurezas. Éstos aparecen en la corriente del producto o en las mezclas reaccionantes, no cambian y pueden eliminarse como desperdicio, o bien separarse del producto; por ejemplo, emulsionantes, basuras o sustancias ajenas al reactivo.

- **Excesos.** Es la cantidad de reactivo que se agrega adicionalmente al requerido por estequiometría, para asegurar que el otro reactivo se termine por completo.

- **Producto, residuo y acumulado.** Un producto, en una reacción química, es el conjunto de sustancias que se obtiene al combinar los reactivos; es decir, el material que se forma como resultado de una reacción química. Se escribe en el lado derecho de una ecuación química. El producto teórico es la cantidad que se obtendría si todo el reactivo limitante reaccionara; el producto que en realidad se obtiene depende de la conversión de la reacción, a este producto hay que restarle lo que se queda acumulado en el reactor, para tener el producto aprovechable.

  Un residuo, es la suma de las impurezas de los reactivos, más las cantidades en exceso de los reactivos, o sea

  $$\text{Residuos} = \text{impurezas} + \text{excesos}$$

  El acumulado es el producto que se queda en el reactor; por ejemplo, cuando se produce una pasta y una parte de ésta queda adherida al recipiente, a esa cantidad de sustancia que no se puede recuperar se le llama acumulado.

8.3 Reacción química

En el lenguaje químico se usa la expresión reacción química para referirse a los fenómenos químicos que se presentan en la naturaleza, mediante los cuales ciertas sustancias presentes al principio, desaparecen en apariencia, formando sustancias diferentes, cumpliéndose así la ley de la conservación de la materia.

Así, una reacción química es un proceso en el cual intervienen reactivos o materias primas para generar productos y en el que se efectúan cambios estructurales de la materia de las especies participantes, a través del rompimiento y la formación de enlaces químicos. Los factores a considerar para realizar una reacción química se presentan en la tabla 8.6.

Tabla 8.6. Factores a considerar en una reacción química.

Factores a considerar	Cómo afectan
Presión, temperatura y composición	Desplazamiento del equilibrio, aumento en el rendimiento, descripción de condiciones del proceso.
Cinética de la reacción	Asegura los tiempos óptimos de reacción y el grado de descomposición de las sustancias que reaccionan.
Estado de agregación	Favorece el contacto de las especies participantes.

8.3.1 Clasificación de las reacciones químicas

En general, las reacciones químicas pueden ser de dos tipos:

- **Reacciones químicas ácido-base**. Se presentan sin cambios en los estados de oxidación.
- **Reacciones químicas redox**. Éstas presentan cambios en los estados de oxidación.

Para su estudio, las reacciones químicas se agrupan en las siguientes categorías:

a) **Reacción de síntesis.** Se parte de elementos o compuestos sencillos que se unen para formar uno más complejo, su modelo es: $A + B \longrightarrow AB$.

b) **Reacción de descomposición.** Se refiere a un compuesto que se descompone o fragmenta en elementos o compuestos más sencillos, el modelo es: $AB \longrightarrow A + B$.

c) **Reacción de desplazamiento simple.** En ésta, un elemento reemplaza a otro en un compuesto, el modelo es el siguiente: $A + BC \longrightarrow AC + B$.

d) **Reacción de doble desplazamiento**. Es una reacción en que los iones de un compuesto cambian lugares con los iones de otro compuesto, para formar dos sustancias diferentes. El modelo que la representa es: $AB + CD \longrightarrow AD + CB$.

Asimismo, hay otras formas de clasificar las reacciones químicas, puede ser en función del estado de agregación de la materia, por el uso de catalizadores, por el calor generado o absorbido, y en función del proceso unitario involucrado (véase tabla 8.7).

Todas estas reacciones se analizan ampliamente en el capítulo correspondiente a procesos unitarios.

Tabla 8.7. Clasificación de las reacciones químicas.

Tipo de reacción	Características
En función de su estado de agregación	
Homogéneas	Cuando se presenta sólo una fase, ya sea gaseosa, sólida, o líquida.
Heterogéneas	Cuando se requiere la presencia de al menos dos fases para que tenga lugar la reacción.
Por el uso de catalizadores	
Enzimáticas	Utilizan catalizadores biológicos (proteínas con alto peso molecular y con centros activos, que trabajan a bajas temperaturas).
Catalíticas	Reacciones que requieren una sustancia adicional (que no aparece en el balance global) para modificar la velocidad de reacción; esta sustancia acelera la reacción química.
No catalíticas	Los materiales reactantes no necesitan alguna sustancia adicional para que se realice la reacción química.
Autocatalíticas	Uno de los productos formados actúa como catalizador y participa en otra etapa del proceso donde la velocidad de reacción es mayor que en la primera etapa.
En función del calor	
Endotérmicas	Absorben calor del exterior.
Exotérmicas	Liberan calor hacia el exterior.
En función del proceso unitario al que representan	
Combustión, calcinación, oxidación, intercambio iónico, neutralización, hidrólisis, electrólisis, esterificación, saponificación, fermentación, hidrogenación.	

8.4 Reactores químicos

Se puede definir a los reactores químicos como los recipientes de procesos que son utilizados para llevar a cabo reacciones químicas. A escala industrial, esta unidad está diseñada para efectuar operaciones controladas que involucran transferencias de masa y calor, como consecuencia de las reacciones químicas que ocurren en su interior.

Esta unidad procesadora cuenta con líneas de entrada y salida para sustancias químicas y entre sus funciones principales están: asegurar el contacto entre los reactivos en el interior del tanque, a fin de conseguir una mezcla que facilite la reacción; proporcionar el tiempo de contacto suficiente entre las sustancias y con el catalizador para conseguir la conversión buscada, y permitir condiciones de presión, temperatura y composición adecuadas, de modo que la reacción tenga lugar en el grado y la velocidad requeridos, atendiendo los aspectos termodinámicos y cinéticos de la misma.

8.4.1 Tipos de reactores químicos

Hay infinidad de reactores químicos, cada tipo responde a las necesidades de alguna situación en particular; entre los más importantes, mejor conocidos y utilizados con mayor frecuencia están los de la tabla 8.8:

Tabla 8.8. Tipos de reactores químicos.

Nombre del reactor	Generalidades
Discontinuo	No hay intercambio de materia durante la reacción, sólo al inicio del proceso. En éste se introducen las sustancias, controlándose tanto la presión como la temperatura mientras se efectúa la reacción. También es conocido como reactor tipo *batch*.
Continuo	Hay una carga inicial, retirándose los productos de la reacción que están en forma de gas; en cambio, los productos condensados se descargan hasta el final de la operación. En el interior del reactor se realiza una reacción química continua.
Tubular	En general, es cualquier reactor de operación continua, con movimiento constante de uno o todos los reactivos en una dirección espacial seleccionada. En éste no se hace ningún intento por inducir el mezclado. El reactor tiene forma de tubo, los reactivos entran por un extremo y salen por el otro.
Lecho fluidizado	Se utiliza para reacciones en las que intervienen un sólido y un fluido (por lo general un gas). En estos reactores, la corriente de gas se hace pasar a través de las partículas sólidas, a una velocidad suficiente para suspenderlas; con el movimiento rápido de las mismas, se obtiene un alto grado de uniformidad en la temperatura, con lo cual se evita la formación de zonas calientes.
Lecho fijo	Consiste en uno o más tubos empacados con partículas de catalizador, los tubos operan en posición vertical. Las partículas catalíticas pueden variar de tamaño y forma (granulares, cilíndricas, esféricas, entre otras). En algunos casos, en especial con catalizadores metálicos como el platino, no se emplean partículas de metal, sino que éste se presenta en forma de mallas de alambre. El lecho está constituido por un conjunto de capas de este material.
Burbujas	En estos reactores se hace burbujear un reactivo gaseoso a través de un líquido con el que puede reaccionar, porque éste contiene un catalizador disuelto, no volátil u otro reactivo. El producto se puede sacar del reactor en la corriente gaseosa.
Mezcla perfecta	En este tipo de reactor, las propiedades no se modifican con el tiempo ni con la posición, ya que se supone que se trabaja en estado de flujo estacionario y la mezcla de reacción es uniforme por completo. El tiempo de mezcla tiene que ser muy corto en comparación con el tiempo de permanencia en el reactor. En la práctica se emplea sólo si la mezcla fluida es poco viscosa y está bien agitada.
Recirculación	Estos equipos se caracterizan porque parte de la corriente de salida se introduce una vez más al reactor. La separación de la corriente de recirculación se puede hacer dentro o fuera del reactor.
Membrana	Estos reactores combinan la reacción y la separación en una sola unidad; la membrana remueve de manera selectiva una o más de las especies reactantes o productos. Estos equipos se han usado en aplicaciones cuyos rendimientos de reacción están limitados por el equilibrio.
Fermentador	Estos reactores utilizan hongos, los cuales forman un cultivo que a su vez se transforma en una "sopa" espesa con crecimientos filamentosos. Se utilizan en la producción de antibióticos.
Lecho percolador (*tricke bed*)	Las características de las partículas sólidas y de su empaquetamiento, así como los caudales y las propiedades de las dos corrientes de fluidos determinarán el régimen de flujo del reactor y también sus propiedades hidrodinámicas.
Isotérmico	Su operación se efectúa en regímenes de temperatura constante.
Isobárico	En este tipo de reactores la presión no cambia a través de los procesos efectuados.

8.5 Conceptos relacionados con la estequiometría

Las reacciones químicas son representadas por ecuaciones que muestran los reactivos y los productos de una reacción en particular. Para las reacciones sencillas, incluidas en este texto, las relaciones moleculares entre los reactivos son números enteros pequeños. El estudio de estas relaciones a escala microscópica, muestra la modificación de enlaces entre átomos por el desplazamiento de electrones: enlaces que se rompen y otros que se forman, pero los átomos implicados se conservan, antes y después del evento efectuado. Las relaciones estequiométricas aplicadas en una ecuación química deben contener, en ambos miembros, igual número de átomos de los mismos elementos, aunque sea en distintas fórmulas, con distintos subíndices, con distintos coeficientes, con el objeto de establecer claramente que el fenómeno químico representado cumple con la ley de la conservación de la materia, la cual implica dos principios fundamentales relacionados con la conservación del número de átomos de cada elemento químico y de la carga total.

8.5.1 Leyes estequiométricas

La ley de conservación de la masa, o conservación de la materia, es una de las leyes fundamentales en todas las ciencias naturales; fue elaborada por Lavoisier y otros científicos que le sucedieron. Esta ley establece que: "En toda reacción química la masa se conserva, lo que quiere decir que la masa consumida de los reactivos es igual a la masa obtenida de los productos".

Así, la masa se conserva; es decir, la masa total de los reactivos es igual a la masa total de los productos. Este aspecto tiene una importancia fundamental, ya que gracias a esto es posible extraer los componentes específicos de alguna materia prima sin tener que desechar el resto; también es factible obtener elementos puros, mismos que sería imposible lograr si la materia se destruyera.

A continuación se definen las principales leyes o principios estequiométricos.

Principio de la conservación de la energía

Este principio establece que cuando se forma un producto en una reacción, la energía que este producto posee es menor que la suma de las energías de las materias primas; entonces, la diferencia de energía tendrá que aparecer en forma de calor. En la mayoría de los fenómenos químicos no sólo se desprende energía, sino que en algunos también hay que adicionar calor para que la reacción progrese, de aquí que las reacciones se clasifiquen en endotérmicas y exotérmicas.

Ley de las proporciones constantes

Una de las observaciones fundamentales de la química moderna hecha por Joseph Proust, está expresada en la ley de las proporciones constantes, también conocida como ley de las proporciones definidas, la cual dice: "Cuando se combinan dos o más elementos para dar un determinado compuesto, siempre lo hacen en una relación constante de masas".

La ley de Dalton o ley de las proporciones múltiples

Esta ley fue formulada en 1803 por John Dalton, y es considerada una de las leyes estequiométricas más importantes; la cual actualizada dice que: "Cuando dos elementos se combinan entre sí para formar compuestos diferentes, las masas de los elementos que se unen siempre lo hacen en una relación de números enteros". Es decir, que cuando dos elementos A y B forman más de un compuesto, las cantidades de A que se combinan en estos compuestos, con una cantidad fija de B, están en función de números enteros sencillos.

Ley de las proporciones equivalentes

Esta ley es llamada también "de los pesos de combinación"; fue formulada por Richter en 1792 y completada varios años más tarde por Wenzel. Se puede enunciar de la siguiente manera: "Los pesos de los diferentes elementos que se combinan con un mismo peso de un elemento dado, son los pesos relativos a aquellos elementos cuando se combinan entre sí, o bien múltiplos o submúltiplos de estos pesos".

Cuando los reactivos están en cantidades proporcionales a su coeficiente estequiométrico se dice que:

a) La mezcla es estequiométrica.

b) Los reactivos están en proporciones estequiométricas.

c) La reacción tiene lugar en condiciones estequiométricas.

Estas tres expresiones tienen el mismo significado.

Según estas condiciones, si la reacción es completa, todos los reactivos se consumirán dando las cantidades estequiométricas de los productos correspondientes.

8.6 Relaciones cuantitativas entre especies en una reacción química

Cabe mencionar que la metodología que implica la determinación de masa en una reacción química debe seguir los siguientes pasos:

1. Identificar la reacción química que describa el proceso químico realizado.
2. Igualar los moles de las especies participantes, antes y después de la reacción (es decir, balancear la reacción).
3. Generar el balance de masa entre los reactivos y los productos.
4. Tomar en cuenta la pureza de los reactivos, cuando el balance se inicia con éstos o considerar el rendimiento o la conversión de los productos si se inicia con éstos.
5. Establecer la relación de las especies involucradas (reactivo-producto, producto-reactivo), para determinar en su caso el reactivo limitante y el o los reactivos en exceso.
6. Relacionar la masa de las especies involucradas tomando como base el reactivo limitante.
7. Calcular los productos y los reactivos faltantes, así como el exceso en su caso.
8. Corregir los cálculos por pureza, si se inició con productos, o por rendimiento o conversión, si se inició con reactivos.

8.7 Balance de una reacción

La contabilidad completa de la masa y la energía en estos procesos químicos se conoce como balance de materia y energía, la cual, en la práctica de la química y la administración de procesos industriales, se identifica con frecuencia como balance de masa o balance de peso.

Un balance de materiales puede llevarse a cabo sin un balance de energía, pero un balance de energía requiere conocer la masa y la composición de todas las corrientes.

Toda reacción química tiene sus proporciones características, las cuales se determinan por medio de fórmulas químicas, ecuaciones, pesos atómicos y moleculares; así mismo, se determina qué y cuánto se utiliza y se produce, es decir, la cantidad de materia que entra en juego. La estequiometría se basa en la evaluación del número de moles de las sustancias como un indicador preciso de la magnitud de la reacción.

En química, y en particular en la química analítica, la cantidad de materia en una muestra dada es un elemento crucial de información; a su vez, constituye un factor en aspectos como la determinación de concentraciones de soluciones y del pH, entre otros. En la industria química es indispensable conocer la cantidad de materia empleada en las diversas reacciones y en los productos obtenidos.

El modelo para describir una reacción o proceso químico se establece por la ecuación:

$$aA + bB \longrightarrow cC + dD$$

Donde las materias primas (o reactivos) están ubicadas en el lado izquierdo de la flecha y los productos, en el lado derecho.

Una suposición implícita en el cálculo de productos y reactivos en el modelo anterior, es el hecho de que la reacción tiene lugar justo como se escribió en la ecuación y que se completa al 100%. Si los reactivos, los productos o el grado de conversión de la reacción real difieren de las suposiciones de la ecuación, se deberá contar con datos adicionales para predecir el resultado de dicha reacción.

En los procesos industriales casi nunca se usan cantidades estequiométricas de materiales, ya que con el fin de que ocurra la reacción deseada o de utilizar al máximo un reactivo costoso, casi siempre se usan reactivos en exceso, debido a que estos últimos salen del proceso junto con los productos (aunque a veces se separan), y en algunos casos es posible utilizarlos de nuevo. Incluso si se emplean cantidades estequiométricas de reactivos, es muy posible que la reacción no se complete o que ocurran reacciones secundarias, de modo que los productos irán acompañados de reactivos no gastados así como de productos secundarios. En estas circunstancias, deben conocerse algunos conceptos útiles para realizar los cálculos necesarios en el balance de masa.

En general, la estequiometría permite realizar balances de materia en sistemas donde ocurren reacciones, ya sea en moles o en masa, para lo cual se aplica la ley de la conservación de la materia. Así, al conocer las cantidades que se tienen al inicio del proceso o al final, es posible determinar la composición, en por ciento masa, por ciento volumen, presiones y volúmenes parciales y peso molecular de la mezcla, entre otras propiedades del sistema.

8.8 Técnicas para el balance de materiales

La mayoría de los problemas de balance de materiales constan de los mismos elementos básicos, aunque los detalles de aplicación del método de resolución puedan ser ligeramente distintos.

En algunos problemas, el procedimiento es sencillo, pero en otros será más complicado; lo importante es recordar que los problemas que involucran las distintas operaciones y los diferentes procesos unitarios son similares, pues están relacionados desde el punto de vista del procedimiento que se requiere para resolverlos.

El balance de materiales puede aplicarse a un proceso, como un balance general de la masa que entra y la que sale; o bien, a las partes intermedias de un procedimiento continuo. En general, para cualquiera de estos sistemas, se requieren datos relativos a la entrada y a la salida de masa.

Algunos datos son la masa en todas las corrientes del material que entra y sale del sistema, así como del que se encuentra presente en éste. También debe tenerse información

respecto a la composición de todas las corrientes que entran y salen del sistema y sobre la composición del material dentro del mismo.

Al llevar a cabo un balance de materiales es útil y conveniente efectuar varios pasos preliminares, los cuales son flexibles y pueden modificarse de acuerdo con el estilo de análisis que se desarrolle:

1. Trazar un diagrama de flujo simplificado del proceso.
2. Colocar en el diagrama todos los datos disponibles usando unidades consistentes.
3. Establecer las ecuaciones para las reacciones químicas que se verifican en el proceso.

Muchas reacciones no se completan en un tiempo razonable; con frecuencia uno de los reactivos se introduce al proceso en una cantidad superior a la estequiométrica, con lo cual se afectan las variables del proceso. Debido a esto, en la corriente del producto o en la mezcla reaccionante aparecen reactivos sin convertir que pueden eliminarse como un subproducto, o bien, como sucede con frecuencia, pueden separarse del producto y recircularse en el proceso.

Estas alternativas tienen un efecto muy marcado en la economía del producto.

Entonces, al hacer el balance de masa en sistemas en que ocurren reacciones químicas, se obtienen dos parámetros importantes: uno cuantitativo, que se refiere a la cantidad de sustancias involucradas en la operación, y otro cualitativo, que proporciona información de las especies químicas que participan en la reacción.

En forma general, el balance en una reacción química está dado por:

$$\text{masas de entrada} = \text{masas de salida}$$

Donde:

$$\begin{matrix}\text{masa de}\\ \text{los reactivos}\end{matrix} = \begin{matrix}\text{masa real de}\\ \text{los productos}\end{matrix} + \begin{matrix}\text{masa de residuos (impurezas}\\ \text{y exceso de los reactivos)}\end{matrix} + \begin{matrix}\text{masa}\\ \text{acumulada}\end{matrix}$$

Una expresión generalizada sería:

$$\text{reactivos} = \text{productos} + \text{residuos} + \text{acumulados}$$

El balance de un proceso con reacción química se expresará así:

$$\text{masas de entrada} = \text{masas de salida}$$

$$\text{entradas al reactor} = \text{salidas del reactor}$$

En las entradas se consideran todos los componentes que entran, participen o no en la reacción.

En las salidas se incluyen todos los compuestos que salen de la reacción, sean producto de ésta o no.

$$\text{masa de los compuestos totales a la entrada} = \text{productos reales} + \text{compuestos que no reaccionaron} + \text{residuos} + \text{acumulados}$$

Una expresión generalizada sería:

$$\text{entradas al reactor} = \text{productos reales} + \text{compuestos que no reaccionan} + \text{residuos} + \text{acumulados}$$

Es importante enfatizar que la pureza sólo se aplica a los reactivos y el rendimiento o la conversión a los productos.

8.9 Metodología para resolver problemas de mezcla de gas, con reacción

Para resolver problemas de mezcla de gas, con reacción, deben seguirse los siguientes pasos:

1. Leer el problema.
2. Analizar el problema.
3. Elaborar un diagrama de bloques que incluya datos de entrada, reacción química, datos de salida y preguntas del problema.
4. Realizar las conversiones pertinentes.
5. Elaborar una tabla de datos de las entradas del reactor hasta llegar a la masa de cada componente.
6. Realizar la estequiometría de la reacción química; para este punto hay que hacer lo que a continuación se explica:
   a) Escribir la reacción química, anotando la pureza y la eficiencia de la reacción.
   b) Balancear o comprobar que la ecuación química esté balanceada.
   c) Anotar los pesos moleculares de reactivos y productos.
   d) Generar el balance de masa de la reacción.
   e) Determinar el reactivo limitante, el reactivo en exceso y la cantidad en exceso.
   f) Identificar los productos teóricos a partir del reactivo limitante.
   g) Estimar los productos reales obtenidos aplicando la eficiencia de la reacción.
7. Elaborar una tabla que incluya todos los componentes de salida hasta llegar a la fracción mol o la fracción masa según sea el caso.
8. Resolver las preguntas del problema.

Ejemplo 2

Una mezcla de 20% mol de N_2, 60% mol de O_2 y 20% mol de Cl_2 se introduce a un reactor donde se lleva a cabo la siguiente reacción química, ≈ en fase gaseosa:

$$N_2 + 2O_2 \approx N_2O_4$$

Determine:

a) La composición química en % volumen a la salida del reactor si se introducen 50 kg de mezcla, considerando que la reacción tiene una eficiencia de 85%.

b) El peso molecular promedio a la entrada y a la salida del reactor.

c) La densidad de la mezcla a la salida del reactor (considere que la mezcla sale a 80 °C y 2,5 atm).

Solución:

Aplicación de la metodología.

1. **Leer el problema.**

En la lectura es posible percatarse de que el reactor tiene una mezcla gaseosa, de la masa, la composición en % mol, la reacción química, la eficiencia y los datos de salida para resolver el problema.

2. **Analizar el problema.**

"Una mezcla de 20% mol de N_2, 60% mol de O_2 y 20% mol de Cl_2", con el símbolo de los componentes de la mezcla se conoce el peso molecular de cada uno y con el % mol y la siguiente fórmula se sabe cuál es la fracción mol:

$$\%\ \text{mol} = X_i \times 100 \ \therefore\ X_i = \frac{\%\ \text{mol}}{100}$$

Con la fracción mol y el peso molecular de cada componente se identificará el peso molecular de la mezcla:

$$\overline{PM} = \sum X_i \times PM_i$$

"Se introducen a un reactor donde se lleva a cabo la siguiente reacción:"

$$N_2 + 2O_2 \rightleftarrows N_2O_4$$

Con estos datos se sabe que entra al reactor una mezcla, pero sólo reaccionan el N_2 y el O_2, lo cual hace suponer que el Cl_2 sale igual que como entra al reactor.

Determine:

a) "La composición en % volumen a la salida del reactor, si se introducen 50 kg de mezcla, considerando que la reacción tiene una eficiencia de 85%".

Como ya se conoce la masa de la mezcla, ésta se transforma en gramos y con el peso molecular promedio se conocerá el número de moles totales de la mezcla, al utilizar esta fórmula:

$$n_T = \frac{m_T}{\overline{PM}}$$

Con n_T y X_i será posible conocer el número de mol de cada componente:

$$n_i = X_i n_T$$

y al obtener n_i y X_i se identificará la masa de cada componente:

$$m_i = n_i\, PM_i$$

Como ya se ha obtenido la masa de cada componente, ahora se cuenta con los datos necesarios para iniciar la estequiometría. Así, se genera la relación estequiométrica entre cada reactivo y el producto; y a fin de establecer el reactivo limitante, el reactivo en exceso y la cantidad en exceso, se aplica la eficiencia, con la cual será posible conocer el producto real obtenido y generar la tabla de salida del reactor (recuerde que el reactivo limitante se agotará por completo si no existen impurezas), por tanto, a la salida del reactor se tiene el reactivo en exceso que no reacciona, el producto real, el acumulado y el cloro.

Con las masas y el peso molecular de cada componente a la salida, se calcula el número de moles totales y la masa total.

$$m_T = \sum m_i$$

$$n_i = \frac{m_i}{PM_i}$$

$$n_T = \sum n_i$$

Con los moles de cada componente y los moles totales, se calcula la fracción mol:

$$X_i = \frac{n_i}{n_T}$$

y con esta fracción se da respuesta al porcentaje en volumen:

$$\%\ \text{vol} = X_i \times 100$$

b) "El peso molecular promedio a la entrada y a la salida del reactor".

Este inciso puede resolverse con facilidad ya que en la tabla de entrada se ha determinado el $\overline{PM}$ y a la salida sólo se ha generado una columna donde se multiplica $X_i PM_i$ y al sumarlos obtenemos el $\overline{PM}$ a la salida:

$$\overline{PM} = \sum X_i PM_i$$

c) "La densidad de la mezcla a la salida del reactor (considere que la mezcla sale a 80 °C y 2,5 atm)".

Como ya se conoce la m_T de la mezcla, sólo es necesario obtener el volumen total por medio de la ley general de los gases:

$$P_T V_T = n_T RT \ \therefore\ V_T = \frac{n_T RT}{P_T}$$

Al aplicar la fórmula directa de densidad:

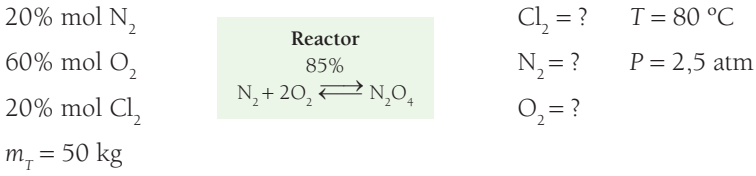
$$\rho_T = \frac{m_T}{V_T}$$

Se ha resuelto el inciso y el problema, pero hay otra opción que consiste en estimar la densidad en forma indirecta:

$$\rho_T = \frac{P_T \overline{PM}}{RT}$$

Con ambas opciones, se logra el mismo resultado.

3. **Elaborar un diagrama de bloques que incluya datos de entrada, reacción química, datos de salida y preguntas del problema.**



a) % vol = ?

b) $\overline{PM}$ = ?

c) ρ_T = ?

4. **Realizar las conversiones pertinentes.**

$$m_T = 50\ \text{kg}\left|\frac{1000\ \text{g}}{1\ \text{kg}}\right| = 50\,000\ \text{g}$$

$T = 80\ °\text{C} + 273 = 353\ \text{K}$

5. **Elaborar una tabla de datos de las entradas al reactor hasta llegar a la masa de cada componente.**

Tabla 8.9.

Componentes			% mol	PM_i g/gmol		$X_i = \frac{\%\ mol}{100}$	$X_i PM_i$	$n_i = X_i n_T$	$m_i = n_i PM_i$
N_2	20	28	0,20	5,6	256,4	**7 179,5**			
O_2	60	32	0,60	19,2	769,2	**24 615,4**			
Cl_2	20	71	0,20	14,2	256,4	**18 205,1**			
Total	**100**		**1,00**	**39,0 =**	**1 282,0**	**50 000,0**			

6. **Realizar la estequiometría de la reacción química como a continuación se explica.**

Metodología para resolver la estequiometría

a) Escribir la reacción química (anotando la pureza y la eficiencia de la reacción).

$$N_2 + 2O_2 \overset{85\%}{\rightleftharpoons} N_2O_4$$

b) Balancear la reacción. Verificar que existe la misma cantidad de átomos de cada elemento a la entrada y a la salida de la reacción; esto se hace con una tabla de entrada y otra de salida.

Tabla 8.10. Entrada

N	O
2	4

Tabla 8.11. Salida

N	O
2	4

Como el número de cada elemento a la entrada y a la salida es el mismo, es posible continuar; en caso contrario, debe aplicarse algún método para balancear la reacción (por ejemplo: por tanteo, redox, entre otros).

c) Anotar el peso molecular de los reactivos y de los productos.

$$\underset{28\ g/mol}{N_2} + \underset{32\ g/mol}{2O_2} \overset{85\%}{\rightleftharpoons} \underset{92\ g/mol}{N_2O_4}$$

d) Generar el balance de masa de la reacción. Se elabora con la multiplicación de cada reactivo o producto por su número estequiométrico, a fin de obtener la cantidad de masa de cada producto y de los reactivos, para comparar y verificar que sean iguales:

$$\begin{array}{ccccc} N_2 & + & 2O_2 & \overset{85\%}{\rightleftharpoons} & N_2O_4 \\ 1\ mol\ (28\ g/mol) & & 2\ mol\ (32\ g/mol) & \rightleftharpoons & 92\ g/mol \\ 28\ g & + & 64\ g & \rightleftharpoons & 92\ g \\ & & 92g & \rightleftharpoons & 92g \end{array}$$

Así, es evidente que la masa que entra a la reacción es la misma que sale.

e) Determinar el reactivo limitante, el reactivo en exceso y la cantidad en exceso. Para estimar el limitante hay que generar una relación estequiométrica entre los reactivos y un producto de la siguiente manera:

$$\begin{array}{rcrcl} N_2 & + & 2O_2 & \overset{85\%}{\rightleftharpoons} & N_2O_4 \\ 28\ g & \longrightarrow & & & 92\ g/mol \\ 7\,179{,}5\ g & \longrightarrow & & & X = ? \end{array}$$

Esta relación estequiométrica indica que 28 g de N_2 producen 92 g de N_2O_4; es decir: 7 179,5 g (que es la masa del N_2 de entrada), ¿cuánto produce de N_2O_4? Este problema se resuelve con una regla de tres.

Con el otro reactivo se genera otra relación estequiométrica:

$$\begin{array}{rcrcl} N_2 & + & 2O_2 & \overset{85\%}{\rightleftharpoons} & N_2O_4 \\ & & 64\ g & \longrightarrow & 92\ g \\ & & 24\,615{,}4\ g & \longrightarrow & X = ? \end{array}$$

De la misma manera, se resuelve:

$$X = \frac{(24\,615{,}4\ g\ N_2)(92\ g\ N_2O_4)}{64\ g\ N_2} = 35\,384{,}64\ g\ N_2O_4$$

Al comparar ambos resultados, hay que recordar que el reactivo limitante (RL) es aquel que produce menos o se agota primero; en este caso, el máximo que se puede producir es 23 589,79 g N_2O_4. Esto quiere decir que el reactivo limitante es el N_2; y se representa así:

$$\begin{array}{rcrcll} N_2 & + & 2O_2 & \overset{85\%}{\rightleftharpoons} & N_2O_4 & \\ 28\ g & & & \longrightarrow & 92\ g & \\ 7\,179{,}5\ g & & & \longrightarrow & X = 23\,589{,}79\ g & \text{RL } N_2 \\ & & 24\,615{,}4\ g & & X = 35\,384{,}64\ g & \text{RE } O_2 \end{array}$$

Para estimar la cantidad en exceso, se genera otra relación estequiométrica, pero entre el reactivo en exceso (RE) y la cantidad de producto teóricamente esperada.

$$\begin{array}{rcrcl} N_2 & + & 2O_2 & \overset{85\%}{\rightleftharpoons} & N_2O_4 \\ & & 64\ g & \longleftarrow & 9.2\ g \\ & & X = & \longleftarrow & 23\,589{,}79\ g \end{array}$$

En este caso:

$$X = \frac{(64\ g\ N_2)(23589{,}79\ g\ N_2O_4)}{92\ g\ N_2} = 16\,410{,}29\ g\ O_2$$

Esto quiere decir que para obtener la máxima cantidad de producto se requieren 16 410,29 g de O_2 y hay 24 615,4 g disponibles, la diferencia es el exceso:

$$m_{O_2}\ \text{exceso} = 24\,615{,}4\ g - 16\,410{,}29\ g = 8\,205{,}11\ g$$

f) Determinar los productos teóricos a partir del reactivo limitante.

En este caso sólo hay un producto; por tanto, ya se tiene el teórico.

g) Estimar los productos reales obtenidos con la aplicación de la eficiencia de la relación. Recuérdese que la fórmula de la eficiencia es:

$$\%\ \text{eficiencia} = \frac{m_{\text{producto real}}}{m_{\text{producto teórico}}} \times 100$$

por lo que la masa del producto real se calcula por despeje:

$$m_{\text{producto real}} = \frac{(\%\ \text{eficiencia})(m_{\text{producto teórico}})}{100\%}$$

Sustituyendo los valores del problema se tiene:

$$m_{\text{producto real}} = \frac{(85\%)(23589{,}79\ \text{g}\ N_2O_4)}{100\%} = 20051{,}32\ \text{g}\ N_2O_4$$

Otra forma de obtenerla es con una regla de tres para el producto:

$$N_2 + 2O_2 \overset{85\%}{\rightleftharpoons} N_2O_4$$

28 g		92 g
7 179,5 g		X = 23 589,79 g – 100%
	24 615,4 g	X = 20 051,32 g – 85%

En caso de haber otros productos, hay que hacer las mismas operaciones para cada uno de éstos.

Si se requiere la confirmación de los resultados, debe realizarse un balance de masa de la siguiente manera:

Balance de masa

$$\text{Entradas} = \text{Salidas}$$

Todas las entradas a la reacción son los reactivos y, por tanto:

$$\begin{aligned}\text{Entradas} &= m_{N_2} + m_{O_2} \\ &= 7\ 179{,}5\ \text{g} + 24\ 615{,}4\ \text{g} \\ &= 31\ 794{,}9\ \text{g}\end{aligned}$$

Las salidas están conformadas por los productos reales, los residuos de los reactivos (impurezas y excesos) y los acumulados. En el caso que se estudia, el producto real es:

$$m_{N_2O_4}\ \text{real} = 20\ 051{,}32\ \text{g}$$

Ya que no existen impurezas en los reactivos, sólo se considera como residuos a los excesos:

$$m_{O_2}\ \text{en exceso} = 8\ 205{,}11\text{g}$$

Los acumulados son los productos que quedan atrapados en el reactor y se obtienen de la diferencia del producto teórico – producto real:

$$m_{\text{acumulados}} = m_{\text{producto teórico}} - m_{\text{producto real}}$$

En el problema, los acumulados serían:

$$m_{N_2O_4\ \text{acumulado}} = 23\,589{,}79\ \text{g} - 20\,051{,}32\ \text{g} = 3\,538{,}47\ \text{g}$$

Por tanto, las salidas son:

$$\begin{aligned}\text{Salida} &= \text{producto real} + \text{residuos} + \text{acumulados}\\ &= 20\,051{,}32\ \text{g} + 8\,205{,}11\ \text{g} + 3\,538{,}47\ \text{g}\\ &= 31\,794{,}90\ \text{g}\end{aligned}$$

Así, es posible confirmar que las entradas son iguales a las salidas:

$$\text{entradas} = \text{salidas}$$

$$31\,794{,}90\ \text{g} = 31\,794{,}90\ \text{g}$$

7. **Elaborar una tabla que incluya todos los componentes de salida hasta llegar a la fracción mol.**

Recuérdese que si se obtiene la fracción mol se conseguirán casi todas las cantidades que se soliciten en un problema, así:

$$X_i = \frac{n_i}{n_T} = \frac{V_i}{V_T} = \frac{P_i}{P_T}$$

$\%\ \text{mol} = X_i \times 100$
$\%\ \text{volumen} = X_i \times 100$
$\%\ \text{presión} = X_i \times 100$
$n_i = X_i n_T$
$V_i = X_i V_T$
$P_i = X_i P_T$
$\overline{PM} = \sum X_i\, PM_i$

Ahora hay que generar la tabla de salida:

Tabla 8.12.

Componentes	PM_i (g/mol)	m_i (g)	$n_i = \frac{M_i}{PM_i}$ (mol)	$X_i = \frac{n_i}{n_T}$
Cl_2	71	18 205,10	256,41	**0,35**
O_2	72	8 205,11	256,41	**0,35**
N_2O_4	92	20 051,32	217,95	**0,30**
Total		**46 461,53**	**730,77**	**1,00**

8. **Resolver las preguntas del problema.**

a) ¿Cuál es la composición en % volumen a la salida del reactor si se introducen 50 kg de mezcla, considerando que la reacción tiene una eficiencia de 85%?

De la tabla 8.12 sólo se aplica la fórmula del % volumen en una columna (véase tabla 8.13).

Tabla 8.13.

Componentes	PM_i	m_i	$n_i = \frac{m_i}{PM_i}$	$X_i = \frac{n_i}{n_T}$	% vol $= X_i \times 100$
					35
					35
					30
					100

Se agrega a esta la última columna y se indica la respuesta en la correspondiente.

b) Calcular el peso molecular promedio a la entrada y a la salida del reactor.

En la tabla de entrada, en la columna correspondiente (véase tabla 8.14), se indica el resultado:

Tabla 8.14.

Componentes	% mol	PM_i	$X_i = \frac{\%\ mol}{100}$	$X_i PM_i$
				5,6
				13,6
				14,2
				$\overline{PM} = b)$ **39,0**

A la salida se hace lo mismo, agregando la columna que se requiere (véase tabla 8.15):

Tabla 8.15.

Componentes	PM_i g/mol	m_i g	$n_i = \frac{m_i}{PM_i}$	$X_i = \frac{n_i}{n_T}$	% vol $= X_i \times 100$	$X_i PM_i$ g/mol
Cl_2	71			0,35		24,85
O_2	32			0,35		**11,20**
N_2O_4	92			0,30		27,60
				1,00		$\overline{PM} = b)$ **63,65**

c) La densidad de la mezcla a la salida del reactor (considere que la mezcla sale a 80 °C y 2,5 atm).

Para resolver esta cuestión se requiere el volumen total a fin de calcular la densidad total:

$$\rho_T = \frac{m_T}{V_T}$$

La masa total de salida se obtiene de la tabla y el volumen se obtiene de la ley general de los gases:

$$P_T V_T = n_T RT$$

$$V_T = \frac{n_T RT}{P_T}$$

$$V_T = \frac{(730{,}77 \text{ mol})\left(0{,}082 \frac{\text{atm}}{\text{mol K}}\right)(353 \text{ K})}{2{,}5 \text{ atm}}$$

$$V_T = 8\,461{,}15 \text{ L}$$

Sustituyendo en la densidad:

$$\rho_T = \frac{46\,461{,}53}{8\,461{,}15 \text{ L}} = 5{,}5 \text{ g/L}$$

Si se pidiera la densidad en forma indirecta, recordando que:

$$\rho_T = \frac{P_T \overline{PM}}{RT}$$

Se sustituyen los valores:

$$\rho_T = \frac{(2{,}5 \text{ atm})(63{,}65 \text{ g/mol})}{\left(0{,}082 \frac{\text{atm L}}{\text{mol K}}\right)(353 \text{ K})} = 5{,}5 \text{ g/L}$$

Como se ve, es el mismo resultado.

Para confirmar los resultados, se hace un balance total de masa; para tal efecto se pide elaborar primero un diagrama total:

$$M_T = 50\,000 \text{ g}$$

Tabla 8.16.

Comp.	% mol	m_i (g)
N_2	20	**7 179,5**
O_2	60	**24 615,4**
Cl_2	20	**18 205,1**
Total	**100**	**50 000,0**

$\longrightarrow$

$$N_2 + 2O_2 \xrightleftharpoons{85\%} N_2O_4$$

$$28 \text{ g} \quad 64 \text{ g} \quad 92 \text{ g}$$

7 179,5 g $\longrightarrow$ $X = 23\,589{,}79$ g RL N_2

24 615,4 g $\longrightarrow$ $X = 35\,384{,}64$ g RE O_2

$X = 16\,419{,}29$ g $\longrightarrow$ 23 589,79 g – 100%

Exc = 8 205,11g

$X = 20\,051{,}32$ g – 85%

3 538.47 g acumulado

$\longrightarrow$ S_2 acumulado $N_2O_4 = 3\,538{,}47$ g

$\downarrow$

Comp.	% mol	m_i (g)
N_2	20	
O_2	60	**24 615,4**
Cl_2	20	**18 205,1**
Total	**100**	**50 000,0**

b) $\overline{PM} = 63{,}65$ g/mol

c) $\rho_T = 5{,}5$ g/L

Balance total

Entradas = Salidas

Entradas = todos los gases de la mezcla = E_1

$$E_1 = m_T = m_{\text{nitrógeno}} + m_{\text{oxígeno}} + m_{\text{cloro}}$$
$$= 7\,179{,}5 \text{ g} + 24\,615{,}4 \text{ g} + 18\,205{,}1 \text{ g} = 50\,000 \text{ g}$$

Salidas = productos reales + gases no reaccionados + residuos + acumulado

Salidas = $S_1 + S_2$

S_1 = productos + gases no reaccionados + residuos
$= 20\,051{,}32 \text{ g} + 18\,205{,}10 \text{ g} + 8\,205{,}11 \text{ g}$
$= 46\,461{,}53 \text{ g}$

S_2 = Acumulados
$= 3\,538{,}47 \text{ g}$

Salidas = $S_1 + S_2$
$= 46\,461{,}53 \text{ g} + 3\,538{,}47 \text{ g}$
$= 50\,000 \text{ g}$

Con esto podemos demostrar que lo que entra al reactor en masa, es igual a lo que sale:

$$E_1 = S_1 + S_2$$
$$50\,000 \text{ g} = 46\,461{,}53 \text{ g} + 3\,538{,}47 \text{ g}$$
$$50\,000 \text{ g} = 50\,000 \text{ g}$$

8.10 Termodinámica química

La termodinámica química estudia las relaciones del calor con otras formas de energía en una reacción química, es decir, donde hay una transformación química de la materia.

El estudio de la termodinámica se centra en un sistema separado de su entorno o ambiente debido a fronteras reales o imaginarias.

sistema + ambiente = universo

La termodinámica clásica estudia los sistemas en equilibrio cuyas propiedades, funciones o variables termodinámicas no cambian con el tiempo.

Las propiedades que definen un estado termodinámico se denominan **funciones de estado** y toman un valor determinado en los distintos estados del sistema; por ejemplo, si la energía de un sistema en un estado 1 es E_1 y en el estado 2 es E_2, entonces la variación de la propiedad "energía" es:

$$\Delta E = E_2 - E_1$$

En estas funciones no importa el camino ni el tiempo que se requiera para llegar desde el estado 1 al 2.

Todo sistema macroscópico está constituido por moléculas, las cuales almacenan energía de traslación, de vibración, de rotación, de enlace, electrónica y de interacciones moleculares.

La energía interna (E) de un sistema no se puede conocer en términos absolutos; sin embargo, sí es posible determinar la magnitud del cambio (ΔE) entre dos estados de dicho sistema.

8.10.1 Primera ley de la termodinámica

Esta ley se conoce también como "Ley de la conservación de la energía" y se puede enunciar en los siguientes términos:

"Si se transfiere calor (Q) desde el entorno o el ambiente a un sistema, la energía interna (E) aumenta en una cantidad ΔE y, al mismo tiempo, parte del calor puede invertirse en realizar un trabajo (W) sobre el medio". A partir de esta ley, es evidente que la energía del universo es constante.

Los cambios se pueden resumir como a continuación se explica:

- $\Delta E > 0$ si aumenta la energía del sistema.
- $\Delta E < 0$ si disminuye la energía del sistema.
- $Q > 0$ si fluye calor desde el entorno hacia el sistema.
- $Q < 0$ si fluye calor desde el sistema hacia el entorno.
- $W > 0$ si se hace trabajo contra el entorno.
- $W < 0$ si se hace trabajo contra el sistema.

El calor (Q) y el trabajo (W) no son funciones de estado, dado que dependen del camino que se haya seguido para efectuar el cambio de estado; sin embargo, su diferencia sí es una función de estado (ΔE).

El trabajo de expansión de un gas se puede calcular con la fórmula:

$$W = P_{op}(V_2 - V_1)$$

Donde:

P_{op} es la presión contra la que se efectúa el trabajo.
V_2 y V_1 son los volúmenes final e inicial del gas.

Si $V_2 > V_1$ representa un trabajo de expansión y si $V_2 < V_1$ es un trabajo de compresión. Entonces, la primera ley se puede expresar como:

$$\Delta E = Q - P_{op}(V_2 - V_1)$$

a) **Cambio adiabático.** Es el cambio de estado que se realiza sin que haya intercambio de calor entre el sistema y el ambiente (por ejemplo, en un termo); en este caso: $Q = 0$.

$$\Delta E = W \text{ (proceso adiabático)}$$

b) **Cambio a presión constante.** Es el cambio más común debido a que gran parte de los procesos se realizan en contacto con la atmósfera, misma que mantiene una presión constante de 1 atm.

$$\Delta E = E_2 - E_1 = Q - P(V_2 - V_1)$$

Si la fórmula se reordena se obtiene:

$$Q = E_2 - E_1 + PV_2 - PV_1$$
$$Q_p = (E_2 + PV_2) - (E_1 + PV_1)$$

Esta última relación muestra que el calor transferido a presión constante (Q_p) es igual a la diferencia entre los dos estados.

La **entalpía (H)** o **contenido calorífico** es una nueva función de estado que se define como:

$$H = E + PV$$

De acuerdo con esto se tiene que:

$$\Delta H = \Delta E + P\Delta V$$

Dado que la mayor parte de los procesos químicos se realiza a presión constante, las variaciones energéticas se expresan como cambios de entalpía (ΔH).

En las reacciones químicas, el **trabajo** ($P\Delta V$) se calcula con la expresión:

$$P\Delta V = [\sum n_g(\text{productos}) - \sum n_g(\text{reaccionantes})]\ R\ T;\ R = 1{,}987\ \text{cal/mol K}$$

Donde:

$\sum n_g$ = suma de los moles de gases de la ecuación balanceada.

8.11 Termoquímica

La **termoquímica** es una subdisciplina de la fisicoquímica que estudia los cambios de calor en los procesos de cambio químico, como las reacciones. Éstas se producen a **presión constante** (atmósfera abierta, es decir, $P = 1$ atm), o bien a **volumen constante** (el del receptáculo donde se llevan a cabo).

Cuando se trata de intercambios de calor a presión constante, la magnitud característica de la termoquímica es el incremento de entalpía, es decir, la variación de calor que se dará en el paso de reactivos a productos.

En el estudio de la termoquímica existen dos procesos involucrados:

- **Proceso a presión constante.** El calor que se intercambia en el proceso es equivalente a la variación de entalpía de la reacción.
- **Proceso a volumen constante.** El calor que se intercambia en estas condiciones equivale a la variación de energía interna de la reacción.

8.12 Leyes de la termoquímica

Es posible calcular el calor que se absorbe o se libera al ocurrir una reacción química considerando la **primera ley de la termoquímica**, la cual establece que el calor total de una reacción química es igual a la sumatoria de los calores de formación de los reactivos, para lo que la ecuación deberá estar balanceada.

Deducción:

Para el siguiente sistema: Reactivos $\longrightarrow$ Productos

se considera una variación de la entalpía, en la que el calor involucrado en los productos corresponde a la condición final y el que está presente en los reactivos, a la condición inicial. A partir de la expresión:

$$\Delta H = H_2 - H_1 = H_{\text{final}} - H_{\text{inicial}}$$

se tendrá que la ecuación correspondiente a un sistema de reacción química será:

$$\Delta H_{\text{reacción}} = \Sigma \Delta H^{\circ}_{f\ \text{productos}} - \Sigma \Delta H^{\circ}_{f\ \text{reactivos}}$$

A continuación se presenta un ejemplo de la aplicación de la primera ley de la termoquímica.

8.12.1 Metodología para resolver problemas aplicando la primera ley de la termoquímica

La metodología para la solución de los problemas se presenta a continuación:

1. Leer el problema.
2. Analizar el problema.
3. Escribir los calores de formación a condiciones estándar de productos y reactivos.
4. Aplicar la ley de Hess para su solución numérica.
5. Resolver las preguntas del problema.

Ejemplo 3

A partir de los calores de formación de las sustancias que participan en el siguiente proceso, determine el calor de reacción a presión constante y a condiciones estándar.

$$C_{(s)} + H_2O_{(l)} \longrightarrow CO_{(g)} + H_{2(g)}$$

Y se sabe que:

$$\Delta H^{\circ}_f\ H_2O_{(l)} = -68{,}32\ \frac{\text{kcal}}{\text{mol}} \qquad \Delta H^{\circ}_f\ CO_{(g)} = -26{,}4\ \frac{\text{kcal}}{\text{mol}}$$

1. A través de la lectura del problema es posible conocer el calor de formación de los compuestos. Se desea saber cuál es el calor liberado o absorbido (a presión constante) en la reacción dada en el problema.
2. En el análisis del problema se observa que se cuenta con el calor de formación de sólo un reactivo y un producto. Dado que el calor de formación de los elementos en su estado natural equivalen a 0, se aplicará la ley de Hess y de este modo el problema quedará resuelto.
3. El calor de reacción a condiciones estándar de $C_{(s)}$ y de $H_{2(g)}$ tiene un valor 0; para el H_2O y el CO, los calores de formación son los siguientes:

$$\Delta H^{\circ}_f\ H_2O_{(l)} = -68{,}32\ \frac{\text{kcal}}{\text{mol}} \qquad \Delta H^{\circ}_f\ CO_{(g)} = -26{,}4\ \frac{\text{kcal}}{\text{mol}}$$

4. Si se aplica la ecuación de calor de reacción de Hess y se sustituyen los valores del calor de formación, al multiplicar cada reactivo y cada producto por su respectivo coeficiente de balanceo (recordando que el calor de formación de cualquier elemento sin combinar es 0 y que en este caso son el hidrógeno y el carbono) se tiene:

$$\Delta H^{\circ}_R = A\Sigma \Delta H^{\circ}_{f\ P} - B\Sigma \Delta H^{\circ}_{f\ R}$$

$$\Delta H^{\circ}_R = A\left[\Delta H^{\circ}_f\ CO_{(g)}\right] - B\left[\Delta H^{\circ}_f\ H_2O_{(l)}\right]$$

$$\Delta H^{\circ}_R = 1\ \text{mol}\left[-26{,}4\ \frac{\text{kcal}}{\text{mol}}\right] - 1\ \text{mol}\left[-68{,}32\ \frac{\text{kcal}}{\text{mol}}\right]$$

Simplificando

$$\Delta H^\circ_R = -26{,}4 + 68{,}32 = 41{,}92 \text{ kcal} \qquad \text{(Reacción endotérmica)}$$

Convencionalmente, cuando el calor de reacción es positivo se considera que la reacción es **endotérmica**, es decir, que entra energía al sistema reaccionante. Por el contrario, cuando el calor de reacción es negativo se considera que la reacción es **exotérmica**, es decir, que libera energía.

Solución:

La respuesta del problema es:

$$\Delta H^\circ_R = 41{,}92 \text{ kcal}$$

8.12.2 Segunda ley de la termoquímica

La **segunda ley de la termoquímica,** o **ley de Hess,** establece que el calor total de una reacción química es independiente del número de etapas en que ésta se realiza. Por ejemplo, cuando el azufre reacciona con el oxígeno para formar el óxido sulfúrico, el cambio puede ocurrir en un solo paso, como se indica a continuación:

$$S + O_2 \longrightarrow SO_3 \text{ — } \Delta H_R$$

o bien, realizarse en dos etapas, formándose en la primera el bióxido de azufre:

$$S + O_2 \longrightarrow SO_2 \text{ — } \Delta H_{R1} \qquad (1)$$

y con más oxígeno, pasar a trióxido de azufre, como se muestra a continuación:

$$SO_2 + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow SO_3 \text{ — } \Delta H_{R2} \qquad (2)$$

Sin embargo, como lo establece esta ley, sin importar el camino seguido, el calor total que se absorbe o se libera es independiente del número de pasos, por lo que:

$$\Delta H_R = \Delta H_{R1} + \Delta H_{R2}$$

Obsérvese cómo las ecuaciones 1 y 2 representan dos reacciones, cuya suma es equivalente a la representada por la ecuación de la reacción que se efectúa en una etapa.

Para resolver este tipo de problemas numéricos es necesario contar con un número determinado de ecuaciones que representen los diferentes caminos para la realización del cambio total, las cuales se pueden tratar igual que una ecuación matemática y deberá procederse de la misma manera con el calor de reacción de cada una de éstas.

8.12.3 Metodología para resolver problemas de termoquímica aplicando la ley de Hess

1. Leer el problema.
2. Analizar el problema.
3. Ordenar las reacciones para cumplir con la que se requiera en cantidades de moles en reactivos y productos.
4. Aplicar la segunda ley de Hess para su solución numérica.
5. Resolver las preguntas del problema.

Ejemplo 4

Con las reacciones que se muestran y aplicando la ley de Hess, determine el calor de formación de trióxido de azufre (SO_3).

$$S + \frac{3}{2}O_2 \longrightarrow SO_3$$

1) $S + O_2 \longrightarrow SO_2 \text{ — } \Delta H_1 = -70{,}96 \dfrac{\text{kcal}}{\text{mol}}$

2) $SO_2 + \dfrac{1}{2}O_2 \longrightarrow SO_3 \text{ — } \Delta H_2 = -23{,}46 \dfrac{\text{kcal}}{\text{mol}}$

Solución:

1. En la lectura del problema se observan dos reacciones que, al sumarse, deben generar la formación del SO_3, junto con éstas se proporciona el calor de formación y de reacción de dos compuestos, y se pide de manera expresa que se aplique la ley de Hess.

2. En el análisis del problema se sabe que, de acuerdo con esta ley, deben transformarse las reacciones para que éstas cumplan con lo que se ha solicitado; es decir, que la reacción 1 contiene al azufre como reactivo (como se pide en la reacción deseada), por lo que no es necesario hacer ninguna modificación; pero en la reacción 2 se tiene sólo ½ de oxígeno que la reacción deseada requiere. Si sólo ésta incluyera al oxígeno se tendría que multiplicar por 3 para obtener los moles requeridos y, del mismo modo, debería multiplicarse por 3 la entalpía de la reacción, pero como la reacción 1 también tiene 1 mol de oxígeno y al sumarlos se obtendrían los de oxígeno requerido, no es necesario multiplicar la reacción 2 por 3, sólo se deberán sumar las reacciones y resultará la reacción que se ha buscado.

3. Se busca primero al S como reactivo y en cantidad de 1 mol; en la reacción 1 aparece de esa manera, por lo cual no es necesario modificarla, sólo escribirla. De la misma manera, se intenta que el SO_3 se encuentre como producto y en cantidad de 1 mol; entonces, la reacción 2 cumple por completo con este requisito y no es necesario modificarla. Por tanto, se escribe el O_2 por ser un elemento que se encuentra en la reacción en forma independiente y se deja al final para su ajuste; además se observa que el oxígeno participa en las dos reacciones, por esta razón es conveniente dejarlo al final.

   1) $S + O_2 \longrightarrow SO_2 \text{ — } \Delta H_1 = -70{,}96 \dfrac{\text{kcal}}{\text{mol}}$

   2) $SO_2 + \dfrac{1}{2}O_2 \longrightarrow SO_3 \text{ — } \Delta H_2 = -23{,}46 \dfrac{\text{kcal}}{\text{mol}}$

4. La ley de Hess indica que al sumar las reacciones es preciso lograr la reacción solicitada, por lo que deben sumarse las reacciones y eliminar las sustancias que aparezcan como reactivo y producto en la misma cantidad numérica. Este es el caso del SO_2; de la misma manera deberán sumarse aquellas que aparezcan como reactivos o productos, como el O_2. Esto se muestra a continuación:

   1) $S + O_2 \longrightarrow SO_2 \text{ — } \Delta H_1 = -70{,}96 \dfrac{\text{kcal}}{\text{mol}}$

   2) $SO_2 + \dfrac{1}{2}O_2 \longrightarrow SO_3 \text{ — } \Delta H_2 = -23{,}46 \dfrac{\text{kcal}}{\text{mol}}$

   $$S + \frac{3}{2}O_2 \longrightarrow SO_3$$

De la misma manera en que se suman las reacciones, deberá hacerse con las entalpías; por tanto, $\Delta H_1 + \Delta H_2 = \Delta H_R$, recuérdese que lo que se hace con las ecuaciones químicas se hace con los respectivos valores de ΔH.

Sustituyendo los valores, se obtiene:

$$-70{,}96 - 23{,}46 = -94{,}42 \ \frac{\text{kcal}}{\text{mol}} \ \text{(Reacción exotérmica)}$$

5. La respuesta del problema es la siguiente:

$$S + \frac{3}{2}O_2 \longrightarrow SO_3 \text{ — } \Delta H_f = -94{,}42$$

Pueden utilizarse otras unidades como kilojoules (kJ); simplemente utilizando las equivalencias correspondientes.

$$1 \text{ cal} = 4{,}184 \text{ J}$$
$$1 \text{ kJ} = 239 \text{ cal}$$
$$1 \text{ kcal} = 4{,}184 \text{ kJ}$$

8.12.4 Ley de Lavoisier-Laplace

Esta ley establece que el calor necesario para descomponer un compuesto (como el NH_3) en sus elementos libres en su forma más estable (N_2, H_2) es el mismo que se libera al formar dicho compuesto a partir de sus elementos en su forma más estable, por ejemplo:

$$NH_{3(g)} \longrightarrow \frac{1}{2}N_{2(g)} + \frac{3}{2}H_{2(g)} \text{ — } \Delta H = 46 \text{ kJ/mol}$$

$$\frac{1}{2}N_{2(g)} + \frac{3}{2}N_{2(g)} \longrightarrow NH_{3(g)} \text{ — } \Delta H = -46 \text{ kJ/mol}$$

Esta ley, de acuerdo con la de la conservación de la energía, requiere que la misma cantidad de energía liberada en la formación de un compuesto se absorba en su descomposición, ya que de lo contrario se crearía o se perdería energía en las reacciones químicas. En forma general, esta ley se enuncia a continuación:

"Si una reacción es exotérmica en una reacción directa, será endotérmica en la reacción inversa", esto es evidente en la siguiente reacción:

Directa:

$$CS_{2(l)} + 3O_{2(g)} \longrightarrow 3CO_{2(g)} + 2SO_{2(g)} \text{ — } \Delta H = -1\,864 \text{ kJ}$$

Inversa:

$$3CO_{2(g)} + 2SO_{2(g)} \longrightarrow CS_{2(l)} + 3O_{2(g)} \text{ — } \Delta H = 1\,864 \text{ kJ}$$

8.12.5 Aplicaciones importantes de las leyes de la termoquímica

1. Debe indicarse el estado físico de los reactivos y de los productos; ya que el calor de formación de un mismo compuesto en diferente estado de agregación es distinto, así:

$$aA_{(g)} + bB_{(l)} \longrightarrow cC_{(g)} + dD_{(AC)}$$

2. El calor o la entalpía de formación de todos los elementos libres en su forma más estable y en condiciones estándar vale 0.

3. Dada una ecuación termoquímica cualquiera:

$$H_{2(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \longrightarrow H_2O_{(l)} \text{ — } \Delta H = -68\,320 \text{ cal}$$

Si se multiplica por o se divide entre cualquier número, también se modificará el calor involucrado, así:

$$(2)H_{2(g)} + (2)\frac{1}{2}O_{2(g)} \longrightarrow (2)H_2O_{(l)} \text{ — } \Delta H = 2(-68\,320 \text{ cal})$$

4. Si una reacción directa es exotérmica, entonces:

$$CS_{2(l)} + 3O_{2(g)} \longrightarrow 3CO_{2(g)} + 2SO_{2(g)} \text{ — } \Delta H = -1\,864 \text{ kJ}$$

La reacción inversa será endotérmica.

$$3CO_{2(g)} + 2SO_{2(g)} \longrightarrow CS_{2(l)} + 3O_{2(g)} \text{ — } \Delta H = 1\,864 \text{ kJ}$$

Ejemplo 5

Calcule el $\Delta H°_{\text{reacción}}$ de la combustión de $CH_{4(g)}$ y el cambio de energía interna $\Delta E°$ a 25 °C.

$$CH_{4(g)} + 2\ O_{2(g)} \longrightarrow CO_{2(g)} + 2\ H_2O_{(l)}$$

Compuesto	ΔH_f (kcal/mol)
$CH_{4(g)}$	−17,89
$O_{2(g)}$	0
$CO_{2(g)}$	−94,50
$H_2O_{(l)}$	−68,32

En general, en una reacción es posible calcular la cantidad de calor involucrada con la primera ley de Hess:

$$\Delta H°_{\text{reacción}} = \sum \Delta H°_f(\text{productos}) - \sum \Delta H°_f(\text{reactivos})$$

$$\Delta H°_{\text{reacción}} = [\Delta H°_f CO_2(g) + 2\ \Delta H°_f H_2O(l)] - [\Delta H°_f CH_4(g) + 2\ \Delta H°_f O_2(g)]$$

$$\Delta H°_{\text{reacción}} = [-94{,}50 + 2\ (-68{,}32)] - [-17{,}89 + 2\ (0)] = -213{,}25 \text{ kcal/mol}$$

Esto quiere decir que cuando se quema 1 mol de CH_4 (16 g) se liberan (ya que es una reacción exotérmica) 213,25 kcal.

Aplicando la ley general del calor se obtiene $\Delta E°$:

$$\Delta H° = \Delta E° + \Delta n_g RT$$

$$\Delta n_g RT = [(1) - (1 + 2)]\text{mol} \times 1\,987 \text{ cal/mol K} \times 298 \text{ K} = -1\,184{,}2 \text{ cal} = -1{,}18 \text{ kcal}$$

$$\Delta E° = \Delta H° - \Delta n_g RT = -213{,}25 \text{ kcal} - (-1{,}18 \text{ kcal}) = -212{,}2 \text{ kcal}$$

8.13 Problemas

1. Una mezcla de 60% mol de N_2 y 40% mol de O_2 se introduce a un reactor, donde se lleva a cabo la reacción:

$$N_2 + 2O_2 \rightleftharpoons N_2O_4$$

Determine:

a) La composición final en % mol si se introducen 100 kg de mezcla, considerando que la reacción tiene un rendimiento de 70%.

b) El peso molecular promedio de la mezcla final.

2. Una mezcla gaseosa tiene la siguiente composición en % mol: H_2, 30%; CH_4, 20%; C_3H_8, 15%; N_2, 35%. La mezcla, que pesó 3 000 kg a 280 °F y 820 mmHg, se pone en un reactor donde se lleva a cabo la siguiente reacción:

$$N_2 + 3\ H_2 \rightleftharpoons 2\ NH_3$$

Si la eficiencia de la reacción es de 68%, determine:

a) El reactivo limitante y el reactivo en exceso.

b) El peso molecular promedio a la entrada y a la salida del reactor.

c) Las presiones y los volúmenes parciales a la salida del reactor si las condiciones de la salida son 193 °C y 4,2 atm.

3. Una mezcla gaseosa pesa 250 kg a una temperatura de 200 °F y 1,5 atm de presión, y su composición en % mol es: H_2 (25%), CH_4 (18%), C_3H_8 (35%), O_2 (22%). Posteriormente, la mezcla se introduce en un reactor donde se lleva a cabo la transformación

$$CH_4 + 2O_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O$$

Una vez efectuada la reacción, la cual tiene una eficiencia de 75%, la mezcla gaseosa resultante continúa el proceso. Determine:

a) El peso molecular promedio de la mezcla gaseosa al finalizar la reacción.

b) Las presiones parciales en atm, a la salida del reactor, si la presión total es de 15 lb/in^2.

c) El volumen de la mezcla gaseosa después de la reacción, si ésta se encuentra a 100 °C y a la presión del inciso b).

4. Una mezcla de 30% mol de N_2 y 70% mol de O_2 se introducen a un reactor donde se lleva a cabo la siguiente reacción química en fase gaseosa:

$$N_2 + 2O_2 \longrightarrow N_2O_4$$

Determine:

a) La composición final en % volumen si se introducen 700 kg de mezcla, considerando que la reacción tiene una eficiencia de 90%.

b) El peso molecular promedio de la mezcla final.

5. Se han estudiado diversos tipos de motores que generan bajos niveles de contaminantes pues no usan gasolina. También se ha sugerido la utilización de gas comprimido como fuente de energía para impulsar los vehículos. Al efectuarse una prueba, se quemaron 20 lb de combustible (C_2H_4) en presencia de aire (21% mol de O_2 y 79% mol de N_2) y considerando un exceso del mismo de 35%. Determine la composición resultante de la combustión en % mol y en % peso, con una eficiencia de 80%, de acuerdo con la siguiente reacción química:

$$C_2H_4 + 3O_2 \longrightarrow 2CO_2 + 2H_2O$$

6. Una mezcla gaseosa tiene la siguiente composición en % mol: N_2 (22%), Cl_2 (28%), H_2 (35%) y CH_4 (15%). Se tienen 12 kg de esta mezcla a una presión 6 atm y 25 °C de temperatura; dicha mezcla se envía a un reactor donde se efectúa la transformación:

$$H_2 + Cl_2 \longrightarrow 2HCl$$

Esta reacción tiene una eficiencia de 80% y los gases salen del reactor a 7 atm y 35 °C. Determine:

a) El peso molecular promedio de la mezcla gaseosa a la entrada y a la salida del reactor.

b) El volumen de mezcla gaseosa que sale del reactor.

c) La composición de la mezcla gaseosa en % peso al final de la reacción.

7. Cuando se alimentan al quemador de una caldera 2 500 litros de gas natural (92% mol de CH_4 y 8% mol de N_2) a 50 °C y 1,75 atm, el metano reacciona con el oxígeno del aire (mismo que es alimentado en cantidades estequiométricas), de acuerdo con la siguiente reacción: $CH_4 + 2O_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O$, con una eficiencia de 97%. Los gases que se obtienen después de la reacción salen del quemador a 40 °C y 1 atm. Determine:

a) La densidad de los gases a la salida del quemador.

b) El peso molecular promedio de los gases a la salida del reactor.

8. A un quemador se alimentan 500 L/h de octano (C_8H_{18}) a una presión de 19 atm y una temperatura de 50 °C, efectuándose la reacción $C_8H_{18} + 25/2\ O_2 \longrightarrow 8CO_2 + 9H_2O$ con una eficiencia de 85%. El oxígeno empleado para la reacción proviene del aire y se alimenta con un exceso de 30%. Determine:

a) La composición de la mezcla gaseosa obtenida al finalizar la reacción.

b) El peso molecular promedio de la mezcla final.

c) La densidad total de la mezcla, si ésta sale a 80 °C y 585 mmHg.

d) Las presiones y los volúmenes parciales a la salida del reactor.

9. Se tiene una mezcla gaseosa de 370,7 mol de He, 1 300 mol de Ne y 4 500 mol de O_2 a 30 °C y 1 atm, que se somete a una presión de 50 atm y se baja la temperatura, con lo cual se licua 50% del O_2; después, se hace pasar la mezcla sobrante por un arco eléctrico en presencia de H_2 y se desarrolla la siguiente reacción química:

$$H_2 + 1/2\ O_2 \longrightarrow H_2O$$

Si ésta se efectúa a 80% de eficiencia, determine el peso molecular promedio de la mezcla gaseosa después de la reacción, tomando en cuenta que hay 20% en exceso de H_2 respecto al teórico necesario.

10. Una planta produce metanol (CH_3OH) a partir de hidrógeno (H_2) y monóxido de carbono (CO). En el proceso, cantidades estequiométricas se comprimen isotérmicamente en un reactor catalítico, donde se efectúa la siguiente reacción con un rendimiento de 80%: $CO + 2H_2 \longrightarrow CH_3OH$, a presión constante; si entran a proceso 1 000 kg de mezcla estequiométrica, a 20 ºC, en un reactor con un volumen de 50 L, determine:

a) La composición de la mezcla a la entrada del reactor en % peso.

b) Las presiones parciales de la mezcla después del reactor.

11. A un reactor se introducen 100 mol de amoniaco (NH_3) y 100 mol de O_2 cada hora. Y se lleva a cabo la siguiente reacción:

$$2NH_3 + 2{,}5O_2 \longrightarrow 2NO + 3H_2O$$

Considerando que los gases emergen del reactor a 300 °C y 1 atm:

a) ¿Cuál es el flujo volumétrico de la corriente?

b) ¿Cuál es la composición molar?

c) ¿Cuáles son las presiones parciales?

12. De un horno de azufre proceden 1 000 mol de una mezcla gaseosa con la siguiente composición en % volumen: SO_2 (23%), N_2 (19%), C_6H_6 (28%), SO_3 (17%) y H_2O (13%). Esta mezcla se introduce a un enfriador donde se condensa 100% de C_6H_6 y 90% de H_2O. La mezcla gaseosa se somete a un proceso en el cual el SO_2 se oxida con el O_2 del aire, a 75% de eficiencia, según la reacción:

$$SO_2 + 1/2\ O_2 \longrightarrow SO_3$$

Considerando que la composición del aire es 21% mol de O_2 y 79% mol de N_2 y que los gases salen a 5 atm y 180 °C, determine:

a) La composición en % volumen después de la reacción.

b) Los volúmenes y las presiones parciales después de la reacción.

13. El acetileno gaseoso se produce de acuerdo con la siguiente reacción química:

$$CaC_2 + 2H_2O \longrightarrow C_2H_2 + Ca(OH)_2$$

carburo de calcio + agua ⟶ acetileno + hidróxido de calcio

a) Si sólo se cuenta con 20 g de CaC_2, ¿cuánto acetileno podría producirse si la reacción se lleva a cabo a 80% de eficiencia?

b) Hay una demanda de 15 lb de acetileno por semana; para su producción se requiere saber cuántos gramos de carburo de calcio deben comprarse si la eficiencia del reactor es de 75% y la pureza del reactivo es de 60%.

14. Un gas tiene la siguiente composición en % peso: N_2 (24%), Cl_2 (26%), H_2 (30%) y el resto es CH_4. Si se tienen 30 moles de esta mezcla a una presión de 6 atm, una temperatura de 78 °F y se envían a un reactor que trabaja a 80% de eficiencia, donde se efectúa la reacción:

$$H_2 + Cl_2 \longrightarrow 2\ HCl$$

Determine:

a) La cantidad de ácido clorhídrico formado.

b) El peso molecular promedio a la entrada del reactor.

c) Si a la salida del reactor hay 280 °F y 8 atm, ¿cuál será la densidad?

d) ¿Cuáles son las presiones y los volúmenes parciales a la salida del reactor?

e) ¿Cuáles son las masas parciales a la salida del reactor?

15. Determine la entalpía estándar de formación del pentóxido de nitrógeno (N_2O_5) a 25 °C con base en los siguientes datos:

$$2NO_{(g)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2NO_{2(g)} \qquad \Delta H = -114{,}1\ \text{kJ/mol}$$

$$4NO_{2(g)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2N_2O_{5(g)} \qquad \Delta H = -110{,}2\ \text{kJ/mol}$$

$$N_{2(g)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2NO_{(g)} \qquad \Delta H = 108{,}5\ \text{kJ/mol}$$

16. El calor de formación de la glucosa ($C_6H_{12}O_6$) y el ácido láctico ($CH_3CHOHCOOH$) es −304,60 y −165,88 kcal/mol, respectivamente. ¿Cuál es el calor de reacción a 25 °C para la formación del ácido láctico a partir de la glucosa?

$$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2(CH_3CHOHCOOH)$$

17. La entalpía de combustión del naftaleno ($C_{10}H_8$) es de −5 157 kcal/mol K a 25 °C. Determine la entalpía de formación del naftaleno a esta temperatura:

$$C_{10}H_{8(S)} + 12O_{2(g)} \longrightarrow 10CO_{2(g)} + 4H_2O_{(g)}$$

Sustancia	ΔH_f° (kJ/mol)
$C_{10}H_{8(s)}$	?
$O_{2(g)}$	0
$CO_{2(g)}$	−393,50
$H_2O_{(g)}$	−241,80

18. Escriba la reacción que representa la síntesis del H_2SO_4 a partir de azufre, oxígeno e hidrógeno (reacción de formación) y calcule el valor del calor de formación a volumen constante en condiciones estándar, a partir de la siguiente información:

Reacción	ΔH°_r (kcal/mol)
1) $S_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow SO_{2(g)}$	−70,94
2) $SO_{3(g)} \longrightarrow SO_{2(g)} + 1/2\ O_{2(g)}$	94,39
3) $SO_{3(g)} + H_2O_{(g)} \longrightarrow H_2SO_{4(l)}$	−199,69
4) $H_{2(g)} + 1/2\ O_{2(g)} \longrightarrow H_2O_{(g)}$	−57,80

19. La obtención de bióxido de carbono puede hacerse a partir de la siguiente reacción:

$$CO_{(g)} + ½\ O_{2(g)} \longrightarrow CO_{2(g)}$$

Calcule el calor que se requiere generar o eliminar del reactor por cada kilogramo de $CO_{2(g)}$ que se produce considerando la información que se presenta a continuación:

Sustancia	ΔH°_f (kcal/mol)
$CO_{(g)}$	−26,416
$O_{2(g)}$	0å
$CO_{2(g)}$	−94,052

20. La obtención del metanol es posible a partir de la reacción:

$$CO_{(g)} + 2\ H_{2(g)} \longrightarrow CH_3OH_{(g)}$$

El sistema opera a una temperatura de 25 °C y a una presión de 1 atm. Calcule la cantidad de calor que debe extraerse del reactor si se obtienen 96 ton/día de metanol, con base en los siguientes datos termoquímicos.

Sustancia	ΔH°_f (kJ/mol)
$CO_{(g)}$	−110,52
$H_{2(g)}$	0,00
$CH_3OH_{(g)}$	−238,64

21. a) Determine el calor de formación del benceno, a volumen constante, a partir de la siguiente información:

$$2C_{(s)} + 2O_{2(g)} \rightleftarrows 2CO_{2(g)} \qquad \Delta H^\circ_f = -188{,}04 \text{ kcal}$$

$$2H_{2(g)} + O_{2(g)} \rightleftarrows 2H_2O_{(l)} \qquad \Delta H^\circ_f = -136{,}634 \text{ kcal}$$

$$C_6H_{6(l)} + 7\frac{1}{2}O_{2(g)} \rightleftarrows 6CO_{2(g)} + 3H_2O_{(l)} \qquad \Delta H^\circ_r = -780{,}98 \text{ kcal}$$

b) ¿Cuál es la cantidad de calor que debe suministrarse a la reacción para formar 250 lb de C_6H_6 a condiciones tipo?

22. Los valores de las siguientes reacciones, a 25 °C, son:

a) $$Na_{(s)} + \frac{1}{2}Cl_{2(g)} \longrightarrow NaCl_{(s)} \qquad \Delta H^\circ_f = -98{,}321 \text{ kcal}$$

b) $$H_{2(g)} + S_{(s)} + 2O_{2(g)} \longrightarrow H_2SO_{4(l)} \qquad \Delta H^\circ_f = -193{,}69 \text{ kcal}$$

c) $$2Na_{(s)} + S_{(s)} + 2O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2SO_{4(s)} \qquad \Delta H^\circ_f = -330{,}50 \text{ kcal}$$

d) $$\frac{1}{2}H_{2(g)} + \frac{1}{2}Cl_{2(g)} \longrightarrow HCl_{(g)} \qquad \Delta H^\circ_f = -22{,}063 \text{ kcal}$$

A partir de estos datos, determine el calor de reacción a volumen constante y a 25 °C para el proceso:

$$2\,NaCl_{(s)} + H_2SO_{4(l)} \longrightarrow Na_2SO_{4(S)} + 2\,HCl_{(g)}$$

23. Para la reacción de formación de agua a una temperatura de 25 °C:

$$H_{2(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \rightleftarrows H_2O_{(g)}$$

Determine la cantidad de calor involucrada, utilizando los siguientes datos:

Sustancia	ΔH°_f (kcal/mol)
$H_{2(g)}$	0,0
$O_{2(g)}$	0,0
$H_2O_{(g)}$	−57,798

24. A partir de las reacciones que se presentan a continuación, las cuales se llevan a cabo en condiciones estándar, determine el calor estándar de formación del Fe_2O_3 y del FeO.

$$2Fe_2O_{3(s)} + 3C_{(s)} \longrightarrow 4Fe_{(s)} + 3CO_{2(g)} \qquad \Delta H^\circ_f = 117{,}31 \text{ kcal/mol}$$

$$FeO_{(s)} + C_{(s)} \longrightarrow Fe_{(s)} + CO_{(g)} \qquad \Delta H^\circ_f = 37{,}7 \text{ kcal/mol}$$

$$C_{(s)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \longrightarrow CO_{(g)} \qquad \Delta H^\circ_f = -26{,}416 \text{ kcal/mol}$$

$$CO_{(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \longrightarrow CO_{2(g)} \qquad \Delta H^\circ_f = -94{,}052 \text{ kcal/mol}$$

25. Para la reacción:

$$2NH_3 + 2\frac{1}{2}O_2 \longrightarrow 2NO + 3H_2O$$

determine el calor de reacción para 5 g de amoniaco y la cantidad de calor que se desprende, a partir de los siguientes datos:

Tabla 8.17.

Sustancia	$\Delta H°_f$ (kcal/mol)
NH_3	−19,27
O_2	0,0
NO	21,6
H_2O	−57,798

26. Calcule el calor de formación del eteno (C_2H_4) a presión y volumen constantes y en condiciones estándar, si se dispone de la siguiente información:

Reacción	$\Delta H°_f$ (kcal/mol)
$C_2H_{4(g)} + 3O_{2(g)} \longrightarrow 2CO_{2(g)} + 2H_2O_{(l)}$	−337,3
$H_{2(g)} + 1/2\ O_{2(g)} \longrightarrow H_2O_{(l)}$	−68,32
$C_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow CO_{2(g)}$	−94,052

27. Determine el calor estándar para la siguiente reacción de descomposición en kilojoules:

$$2\ CH_{4(g)} \rightleftharpoons CH_3CH_{3(g)} + H_{2(g)}$$

Sustancia	$\Delta H°_f$ (kJ/mol)
$CH_{4(g)}$	−890,35
$CH_3CH_{3(g)}$	−1 559,88
$H_{2(g)}$	0,0

28. Determine ΔH y ΔE en condiciones estándar, para la siguiente reacción:

$$CH_{4(g)} + \frac{3}{2}Cl_{2(g)} \longrightarrow CHCl_{3(l)} + \frac{3}{2}H_{2(g)}$$

Tabla 8.18.

Reacción	$\Delta H°_r$ = (kcal)
$2CHCl_{3(l)} + 2\frac{1}{2}O_{2(g)} \longrightarrow 2CO_{2(g)} + H_2O_{(l)} + 3Cl_{2(g)}$	−178,4
$C_{(s)} + 2H_{2(g)} \longrightarrow CH_{4(g)}$	−17,88
$CO_{2(g)} \longrightarrow C_{(s)} + O_{2(g)}$	94,051
$H_2O_{(l)} \longrightarrow H_{2(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)}$	68,351

29. La cal se obtiene a partir de la calcinación de la piedra caliza, según la siguiente reacción:

$$CaCO_{3(s)} \longrightarrow CaO_{(s)} + CO_{2(g)}$$

Tabla 8.19.

Sustancia	$\Delta H°_f$ (kcal/mol)
$CaCO_{3(s)}$	–1 206,87
$CaO_{(s)}$	–535,09
$CO_{2(g)}$	–393,41

Con los datos anteriores, determine la cantidad de calor requerido para obtener 100 ton/día de CaO en condiciones estándar.

30. Determine el calor estándar de formación del acetileno (C_2H_2) a volumen constante, a partir de la siguiente información:

$$C_2H_{2(g)} + \frac{5}{2}O_{2(g)} \longrightarrow 2CO_{2(g)} + H_2O_{(l)} \qquad \Delta H°_r = -310{,}7 \text{ kcal}$$

$$C_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow CO_{2(g)} \qquad \Delta H°_f = -94{,}052 \text{ kcal}$$

$$H_{2(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \longrightarrow H_2O_{(l)} \qquad \Delta H°_f = -68{,}32 \text{ kcal}$$

8.14 Tema de actualidad

Investigadores británicos logran transformar el CO_2 en gas natural

Un equipo de investigadores británicos, dirigido por la científica española Mercedes Maroto-Valer, ha desarrollado una tecnología con la cual es posible transformar el dióxido de carbono (CO_2), principal responsable del cambio climático, en gas natural.

Maroto-Valer es la responsable principal del Centro para la Innovación en Captura y Almacenamiento de Carbono (CICCS, por sus siglas en inglés), de la Universidad de Nottingham (Reino Unido), un laboratorio pionero en la **búsqueda de soluciones que permitan captar y procesar el CO_2, a fin de reducir su presencia** en la atmósfera.

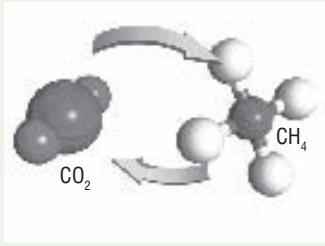


Figura 8.1

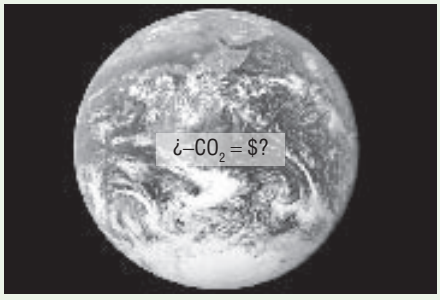


Figura 8.1

El CICCS ya ha diseñado varios procedimientos para capturar el dióxido de carbono que emiten las industrias más contaminantes (como las centrales termoeléctricas, las compañías cementeras y las plantas petroleras) y almacenarlo en sedimentos geológicos (pozos de petróleo o gas ya agotados, minas de carbón o formaciones geológicas).

¿Riesgo de fuga?

Sin embargo, esta posible solución para reducir la presencia atmosférica de CO_2 presenta algunos inconvenientes, pues se **desconoce el tiempo máximo que el dióxido de carbono podría permanecer almacenado** y existe el riesgo, imprevisible aunque posible, de que haya una fuga a gran escala, lo que provocaría **graves consecuencias ambientales.**

La solución, pues, más allá de "esconder" bajo tierra el CO_2, **sería hallar un método que permita reutilizar este gas para, de forma segura y eficaz, reducir su presencia en la atmósfera** y mitigar el calentamiento global.

Proceso similar a la fotosíntesis de las plantas

En la actualidad, el centro que dirige Maroto-Valer trabaja en ello, y ha desarrollado una tecnología capaz de convertir el dióxido de carbono en gas metano, el principal componente del gas natural, con base en un proceso similar a la fotosíntesis de las plantas.

"Las plantas toman el CO_2, el agua y la luz y los transforman en azúcares. Nosotros llevamos a cabo un proceso parecido: también utilizamos la luz, el agua y el CO_2, pero en vez de convertirlos en carbohidratos producimos metano", explica esta investigadora.

Maroto-Valer asegura que la aplicación de esta tecnología a escala mundial permitiría obtener el "ciclo perfecto de la energía", dado que "se pasaría del CO_2 al gas natural y de éste al CO_2 de nuevo".

"Sería la solución perfecta", subraya esta experta, que espera compartir en un futuro en este proyecto con Matgas, un laboratorio de investigación en el tema de los gases, ubicado en el campus de la Universidad Autónoma de Barcelona (UAB), en el que participan también la empresa Carburos Metálicos, el CSIC y este centro universitario.

Pero ésta no es la única línea de investigación en la que trabaja la Universidad de Nottingham, que ha logrado algo que *a priori* parece tan inverosímil como es el **transformar el CO_2 en un mineral similar a los ladrillos que se utilizan en la construcción.**

Mercedes Maroto-Valer ha viajado a Barcelona con uno de estos minerales en el bolsillo, una pieza del tamaño de una ficha de dominó de color terroso y una gran dureza, hecha a partir de tres litros de CO_2.

La investigadora explica que "pasar de un gas a un producto sólido es lo que la naturaleza hace por sí sola" a lo largo de siglos e incluso milenios, y que lo que su equipo ha conseguido es acelerar este proceso con unos reactores que reducen este largo periodo natural a sólo unas horas.

El proceso de conversión, según dice la científica, es sencillo, pues se trata de **aplicar el CO_2 a las rocas de silicato mismas que**, por reacción con este gas, se convierten en carbonatos.

Con este procedimiento podrían obtenerse millones de toneladas de ladrillos de carbonato a partir del dióxido de carbono, con la desventaja de que se producirían "muchos más minerales de los que quizá necesite el sector de la construcción".

Maroto-Valer sostiene que lo más importante en la lucha contra el cambio climático es "no centrarse en un único proceso", sino desarrollar varias soluciones posibles, aplicables de acuerdo con las necesidades de cada país, que den respuesta a este problema de escala global.

Fuente: http://www.eleconomista.es/ahorro-energetico/noticias/517099/05/08/Investigadores-britanicos-logran-transformar-el-CO2-en-gas-natural.html

8.15 Bibliografía

Chang, Raymond, *Fisicoquímica,* McGraw-Hill Interamericana Editores, 9ª ed., México, 2008.

Choppin, Gregory R., *Química*, Grupo Editorial Patria, México, 2008.

Denbigh, K. G. y Turner, J. C. R., *Introducción a la teoría de los reactores químicos,* Limusa. México, 1990.

Farrington, Daniels A., *Fisicoquímica*, CECSA, México, 1985.

Fogler, Scott H., *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas,* Prentice Hall, 4ª ed., México, 2008.

Hein, Morris, *Química general,* Cengage Learning, México, 2008.

Laidler, Keith J., *Fisicoquímica,* Grupo Editorial Patria, México, 2007.

Levine, *Fisicoquímica*, McGraw-Hill Interamericana Editores, 5ª ed., México, 2004.

Spencer, James N., *Química, estructura y dinámica,* Grupo Editorial Patria, México, 2007.

Timberlake, Karen C., *Química*, Prentice Hall, México, 2008.

Capítulo

9

Balance de materia en los procesos unitarios

Pilas AA de hidrógeno (*Jupiter Images Corporation*)

9.1 Procesos unitarios

Un **proceso químico** es un conjunto de operaciones químicas y/o físicas encaminado a la transformación de ciertas materias iniciales en productos finales diferentes. Se dice que un producto es diferente de otro cuando tiene distinta composición, se encuentra en un estado físico distinto o han cambiado sus condiciones.

En un proceso químico están involucradas diferentes operaciones: unas llevan inherentes diversas reacciones químicas (procesos unitarios), pero el proceso químico también

involucra pasos de carácter meramente físico (operaciones unitarias) y en algunos casos sólo contempla procesos físicos, es decir, en los que no ocurren reacciones químicas.

Los procesos unitarios son tratamientos en los cuales las transformaciones se producen mediante reacciones químicas genéricas, lo que significa que existe una ecuación química que representa el proceso. Por ejemplo, la neutralización indica que siempre que se haga reaccionar un ácido con una base se producirán una sal y agua, sin que se especifique de qué ácido, base y sal se trate.

Debido a que los procesos unitarios son representados por reacciones químicas, conviene recordar que las reacciones químicas se conforman por reactivos y productos y dependiendo de ellos será el proceso al que se refiera. En los balances de estos procesos está involucrada la estequiometría de la reacción, ya que ésta cuantifica las materias primas (reactivos) y los productos en una reacción. Por tanto, es necesario dejar claros algunos conceptos importantes de la estequiometría.

- **Reactivo.** Es la materia prima que entra a un reactor y que será transformada en un producto.
- **Producto.** Compuesto o elemento que se obtiene de la transformación de las materias primas. Los productos pueden ser principales o secundarios. Se llama producto principal al que se obtiene como objetivo principal en una reacción química y producto secundario al que no es el objetivo principal del proceso unitario. Por ejemplo, cuando se realiza la neutralización entre un ácido y una base para obtener una sal y agua, el producto principal es la sal, debido a que el objetivo principal era obtener la sal, mientras que el producto secundario es el agua, puesto que la intención principal de la reacción no era obtener agua. Otro ejemplo representativo es la saponificación, reacción cuyo propósito es hacer reaccionar un ácido graso con sosa para obtener jabón (también llamada sal orgánica), a través de esta reacción se obtiene también glicerina, además del jabón. Así pues, el producto principal es el jabón y el secundario es la glicerina, ya que ésta no era el objetivo de la saponificación.
- **Dirección de la reacción.** En una ecuación química, la flecha o flechas tienen como propósito mostrar si la reacción es reversible (doble flecha) o irreversible (flecha sencilla); este dato es muy importante, ya que indica si la reacción se lleva a cabo una sola vez (reacción irreversible) o si se regresará hasta llegar a un equilibrio químico (reacción reversible), en el cual se mantendrá una relación constante entre la masa de productos y reactivos, lo cual no es deseable en un proceso químico.
- **Pureza del reactivo.** La pureza del reactivo es la cantidad de materia que puede reaccionar para transformarse. Por ejemplo, cuando se dice que entran al reactor 100 g de hidróxido de sodio al 96% de pureza, este dato significa que se tiene sólo 96% de NaOH, en tanto que 4% son impurezas que no reaccionarán. La fórmula representativa para la pureza de un reactivo es la siguiente:

$$\%\ \text{pureza} = \frac{m\ \text{reactivo que reaccionará}}{m\ \text{total del reactivo}} \times 100$$

- **Impurezas.** Las impurezas son sustancias que acompañan al reactivo puro, éstas pueden ser aditivos paralelos, reactivos que le dan estabilidad o que le brindan una característica principal, emulsionantes, edulcolorantes, deshumidificantes, colorantes, etcétera. Las impurezas no intervienen en la reacción, por lo que a éstas se les puede llamar basuras del reactivo. Las impurezas se representan con la siguiente fórmula:

$$\%\ \text{impurezas} = \frac{m\ \text{reactivo que no reacciona}}{m\ \text{total del reactivo}} \times 100$$

De esta manera, la suma de los porcentajes de pureza e impurezas, debe corresponder al 100% de la materia prima que entra a un reactor. Así pues, en el ejemplo anterior se tendrá:

% pureza + % impurezas = 100% de materia prima

96% pureza + 4% impurezas = 100% de materia prima

En gramos o masa será:

96 g NaOH puro + 4 g impurezas = 100% de NaOH alimentada

- **Eficiencia de una reacción.** Los reactores, al llevar a cabo una reacción, transforman la materia prima en productos, pero éstos no se pueden recuperar en un 100% del reactor, ya que algunos de ellos quedan retenidos en su interior. A los productos o cantidad de producto que se recupera del reactor se le llama producto real y a la relación con el total de producto obtenido se le llama eficiencia de la reacción, la cual se representa con la siguiente fórmula:

$$\%\ \text{eficiencia} = \frac{m\ \text{producto real}}{m\ \text{total de producto}} \times 100$$

Por ejemplo, en un proceso de fabricación de jabón, se producen 100 g de éste, pero sólo es posible elaborar cuatro jabones de 20 g cada uno, cuya masa corresponde a 80 g de jabón obtenido, por lo que la eficiencia de este proceso sería:

$$\%\ \text{eficiencia} = \frac{80\ \text{g de jabón real}}{100\ \text{g de jabón obtenido}} \times 100$$

$$\%\ \text{eficiencia} = 80\%\ \text{eficiencia}$$

- **Acumulado.** Se llama acumulado al producto obtenido en una reacción química, pero que se queda retenido en el contenedor del reactor. En el ejemplo anterior se produjeron 100 g de jabón pero sólo se recuperaron 80 g en forma de jabones de 20 g cada uno, el resto del producto quedó adherido en las paredes del contenedor y en las aspas del agitador; a esta cantidad de producto no recuperado se le llama acumulado, el cual se puede representar con la siguiente fórmula:

$$\%\ \text{acumulado} = \frac{m\ \text{producto no recuperado}}{m\ \text{producto obtenido}} \times 100$$

Aplicando la fórmula en el ejemplo, ésta quedaría así:

$$\%\ \text{acumulado} = \frac{20\ \text{g de jabón}}{100\ \text{g de jabón}} \times 100$$

$$\%\ \text{acumulado} = 20\%\ \text{de jabón acumulado}$$

Como se observa, la suma de los porcentajes de eficiencia y acumulado da 100% del producto obtenido en la reacción química, tal como se muestra en seguida:

% eficiencia + % acumulado = 100% producto obtenido. En el ejemplo:

80% de eficiencia + 20% de acumulado = 100% producto en masa

80 g de jabón real y 20% de jabón acumulado = 100 g de jabón producido

Con los conceptos anteriores, es posible generar un balance de masa para los procesos unitarios.

- **Balance de masa en los procesos unitarios.** Como se mencionó anteriormente, los procesos unitarios dependen de las reacciones químicas y éstas, a su vez, para poder cuantificarlas, dependen de la estequiometría de la reacción; lo que significa que los balances de masa en los procesos unitarios dependen de la estequiometría de la reacción. Es así que el balance se puede representar de la siguiente manera:

$$\text{Entradas} = \text{Salidas}$$

Las entradas representan todas las materias primas que entran al reactor, reaccionen o no, lo cual significa que no todas las materias primas se transforman, ya que existen sustancias que son alimentadas en exceso al reactor para asegurarse de que el otro reactivo reaccione totalmente. Es por esa razón que debemos definir a los reactivos.

- **Reactivo limitante.** Es el reactivo que se termina o que reacciona completamente; como su nombre lo indica, este reactivo limita la reacción, ya que cuando éste se termina, también concluirá la reacción.
- **Reactivo en exceso.** Este tipo de reactivo no reacciona en su totalidad debido a que una vez que se termina el reactivo limitante, éste ya no tendrá con qué reaccionar, por lo que saldrá del reactor sin sufrir transformación alguna.

Por ejemplo, en la saponificación se alimenta el reactor con un exceso de NaOH para asegurarse de que el ácido graso reaccione completamente. Debido a que el ácido graso es el reactivo limitante y la sosa (NaOH) es el reactivo en exceso, ésta se podrá eliminar del jabón por medio de lavados con solución salina (solución de sal, NaCl, en agua) para obtener el jabón libre de sosa.

Hay otras sustancias que se alimentan al reactor y que no reaccionan, como los catalizadores, los cuales ayudan a que la reacción se realice con mayor rapidez, pero no forman parte de la reacción ni se transforman durante el proceso; sólo aceleran o retardan la reacción. Según sea el caso, existen dos tipos de catalizadores:

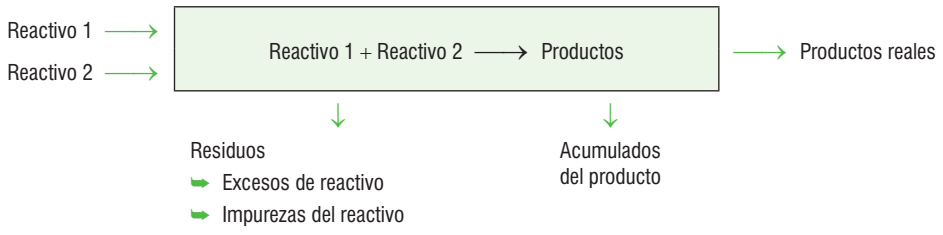
- **Catalizadores positivos.** Son sustancias que aceleran la reacción reduciendo el tiempo de la misma, por lo que con el uso de éstos se obtendrá el producto en menor tiempo. Por ejemplo, cuando se agrega ácido sulfúrico (HSO_4) a una reacción de esterificación, el ácido sulfúrico reduce el tiempo de reacción, pero no se transforma, tal como entra al reactor sale de éste.

Por tanto, en las salidas del reactor se encuentran los productos reales, los excesos de impurezas de los reactivos (llamados residuos) y los acumulados del producto; de esta manera, el balance se puede representar de la siguiente forma:

$$\text{reactivos} = \text{producto real} + \text{residuos (excesos e impurezas)} + \text{acumulados}$$

También es posible representar el proceso unitario mediante un diagrama de bloques en el que se indiquen las entradas y las salidas, representación que facilita el balance de masa.

Diagrama 9.1



Como se puede observar en el diagrama anterior, en él se representan todos los parámetros que deben tomarse en cuenta para realizar un balance de masa en los procesos unitarios. En el siguiente punto se ejemplificará el diagrama de bloques para cada proceso unitario, pero será hasta el estudio de la metodología dónde se realizará un balance de masa completo.

9.2 Clasificación de los procesos unitarios

Los procesos unitarios se pueden clasificar de forma genérica en los siguientes tipos:

- Combustión.
- Calcinación.
- Oxidación.
- Intercambio iónico.
- Neutralización.
- Hidrólisis.
- Electrólisis.
- Esterificación.
- Saponificación.
- Fermentación.
- Hidrogenación.

9.2.1 Combustión

La **combustión** es el proceso unitario entre una sustancia reductora llamada **combustible** (la cual puede ser un carbohidrato, un derivado del nitrógeno o un derivado del azufre) y una sustancia oxidante llamada **comburente** (la cual se caracteriza por la presencia de oxígeno en su fórmula). Al reaccionar ambas sustancias, en forma genérica, se obtiene:

Tabla 9.1.

Combustible	Producto
Carbohidrato	CO_2 dióxido de carbono
Derivado del nitrógeno	NO_2 dióxido de nitrógeno
Derivado del azufre	SO_2 dióxido de azufre

Recuérdese que la reacción de un elemento químico con el oxígeno se llama **oxidación**. De esta forma, la combustión no es más que una reacción de oxidación, en la que normalmente se libera una gran cantidad de calor.

Las reacciones genéricas representativas de la combustión se pueden presentar de la siguiente manera:

$$\text{combustible} + \text{comburente} \longrightarrow (CO_2, NO_2, SO_2) + H_2O + Q$$

$$\text{carbohidrato (CH)} + O_2 \xrightarrow{\text{chispa}} CO_2 + H_2O + Q$$

$$\text{derivado del N} + O_2 \xrightarrow{\text{electricidad}} NO_2 + H_2O + Q$$

$$\text{derivado del S} + O_2 \xrightarrow{\text{chispa}} SO_2 + H_2O + Q$$

Un ejemplo representativo de las reacciones anteriores lo constituyen las siguientes reacciones:

$$\underset{\text{metano}}{CH_4} + \underset{\text{oxígeno}}{2O_2} \xrightarrow{\text{chispa}} \underset{\substack{\text{bióxido}\\ \text{de carbono}}}{CO_2} + \underset{\text{agua}}{2H_2O} + Q$$

$$\underset{\substack{\text{carbonato}\\ \text{de amonio}}}{(NH_4)_2CO_3} + \underset{\text{oxígeno}}{\frac{9}{2}O_2} \xrightarrow{\text{electricidad}} \underset{\substack{\text{bióxido}\\ \text{de nitrógeno}}}{2NO_2} + \underset{\substack{\text{monóxido}\\ \text{de carbono}}}{CO} + \underset{\text{agua}}{4H_2O} + Q$$

$$\underset{\substack{\text{disulfuro}\\ \text{de cobre}}}{CuS_2} + \underset{\text{oxígeno}}{2O_2} \xrightarrow{\text{chispa}} \underset{\text{cobre}}{Cu} + \underset{\substack{\text{bióxido}\\ \text{de azufre}}}{2SO_2} + Q$$

Como se puede observar en las reacciones anteriores, cada una libera calor; este calor recibe el nombre de **calor de reacción** y se define como aquel que se libera cuando un combustible arde en una llama o cuando los componentes de una reacción reaccionan con el oxígeno.

Las reacciones anteriores se pueden representar en un diagrama de bloques de la siguiente manera:

Diagrama 9.2

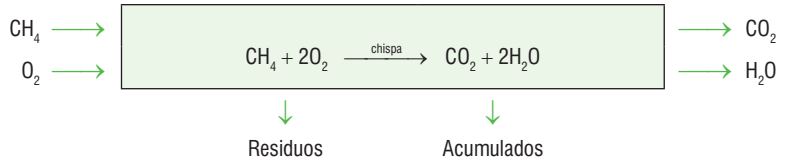


Diagrama 9.3

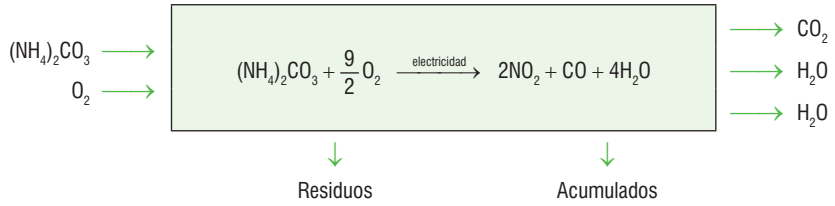
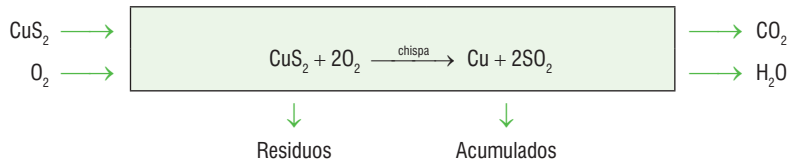


Diagrama 9.4



Respecto a la alimentación del reactor, las reacciones se pueden clasificar en reacciones **alimentadas estequiométricamente**: en éstas se alimenta la cantidad exacta de oxígeno para que el combustible reaccione. En reacciones que se alimentan con exceso de oxígeno, que

son llamadas combustiones completas, se asegura que el combustible (reactivo limitante) se termine por completo. Finalmente, son reacciones incompletas aquellas en las que por carencia de oxígeno se forma CO en lugar de CO_2, por lo cual el combustible no se aprovecha al 100%.

Entre los principales equipos de combustión destacan los quemadores de gas, los quemadores con rotación, el motor de combustión interna (éste ocurre en el ciclo de Otto), el motor a diesel, la turbina de gas, el horno industrial y la caldera de carbón.

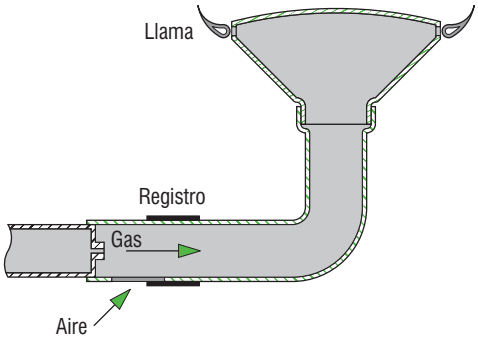


Figura 9.1 *Esquema de un quemador doméstico de gas.*

El desarrollo de calor y la emisión de luz son las características que distinguen a la combustión de otras reacciones químicas. Pero existe un indicador más significativo de combustión: la asociación directa que se produce entre la generación de calor y los flujos de combustible, oxidante y productos de la combustión.

9.2.2 Calcinación

El proceso unitario de **calcinación** involucra una reacción química en la que, por calentamiento en un alto horno en ausencia de oxígeno, los carbonatos se descomponen en óxidos metálicos y monóxido o dióxido de carbono. Este proceso puede ser utilizado para eliminar como humedad el agua presente en el reactivo, por ejemplo, en la conversión del hidróxido de fierro en óxido férrico:

$$Fe(OH)_2 \xrightarrow[\Delta]{\text{alto horno}} FeO + H_2O$$

La calcinación también suele utilizarse, entre otras aplicaciones, para la eliminación de dióxido de carbono de la piedra caliza o de dióxido de azufre en un mineral orgánico.

La piedra caliza es una materia prima que contiene grandes cantidades de carbonato de calcio, el cual es conocido comúnmente como cal viva. Al someterse a calcinación en un alto horno, produce la cal apagada y desprende CO_2:

$$CaCO_3 \xrightarrow[\Delta]{\text{alto horno}} CaO + CO_2$$

Como se observa en los ejemplos anteriores, la representación genérica de la reacción de calcinación es la siguiente:

$$\text{carbonato} \xrightarrow[\Delta]{\text{alto horno}} \text{óxido de metal} + CO_2$$

Ejemplos representativos de materia prima en este proceso son el carbonato de calcio ($CaCO_3$) y el carbonato de zinc ($ZnCO_3$):

$$ZnCO_3 \xrightarrow[\Delta]{\text{alto horno}} ZnO + CO_2$$

En el diagrama de bloques la representación será:

Diagrama 9.5

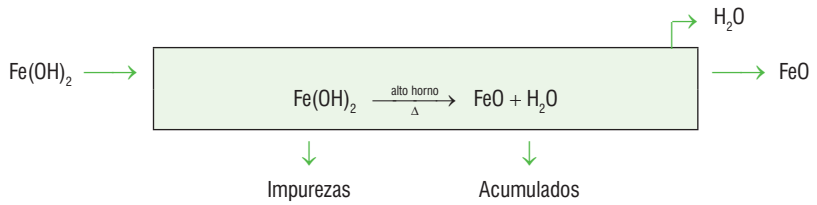
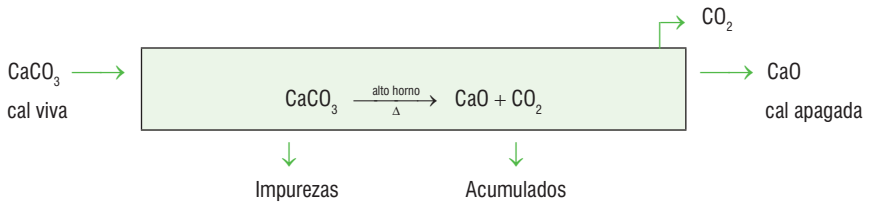


Diagrama 9.6



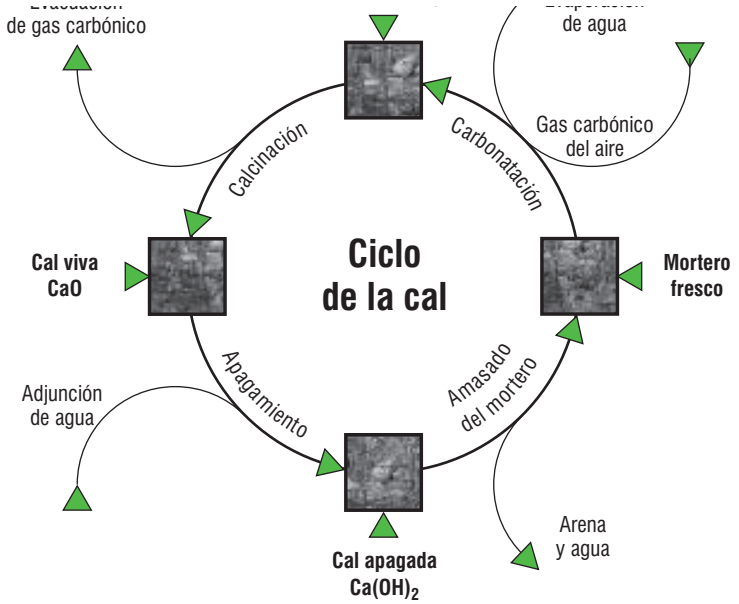
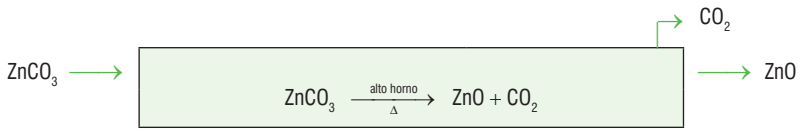


Figura 9.2 *Ciclo de la cal.*

Diagrama 9.7



Entre los principales equipos de calcinación están los hornos de calcinado (rotativos y verticales).

9.2.3 Oxidación

El proceso unitario de **oxidación** se refiere a la reacción química en la que los metales ganan oxígeno y forman óxidos. Es importante prevenir este proceso en la industria, ya que es la principal causa de contaminación de los contenedores y de la pérdida de materiales y equipos, debido a que la oxidación puede provocar perforaciones en las láminas de fierro y cobre, pues al formarse el óxido del metal, éste pierde su dureza y se hace frágil y quebradizo.

La reacción representativa de este proceso es:

$$\text{metal} + O_2 \longrightarrow \text{óxido del metal}$$

Ejemplos representativos de este proceso son los siguientes:

$$2Cu + O_2 \longrightarrow 2CuO$$

$$2Fe + O_2 \longrightarrow 2FeO$$

En el ejemplo de bloques:

Diagrama 9.8

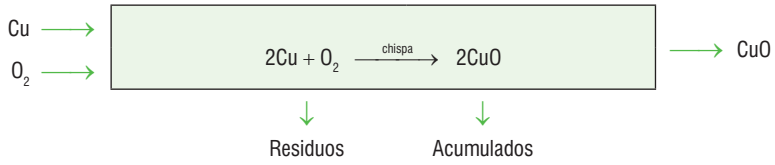
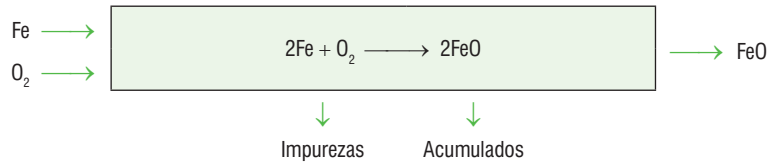


Diagrama 9.9



Este proceso unitario ocurre espontáneamente cuando el metal se encuentra al aire libre y el oxígeno que se encuentra presente en el aire reacciona con él, provocando la oxidación.

9.2.4 Intercambio iónico

El **intercambio iónico** es una reacción química reversible, la cual tiene lugar cuando un ion de una disolución se intercambia por otro ion de igual signo que se encuentra unido a una partícula sólida inmóvil.

En este proceso, los electrólitos (sustancias formadas por iones) están unidos por un enlace débil que puede romperse fácilmente al disolverse en agua. Tanto los electrólitos débiles como los fuertes se disocian en el agua y esto provoca que se intercambien entre ellos mismos. Por ejemplo, en la neutralización de un ácido fuerte y una base fuerte, los electrólitos se disocian al 100% y forman una sal y agua, pero la sal también es un electrólito que se disocia al 100%, por lo que la solución formada es un conjunto de iones en intercambio constante. Este intercambio depende mucho de la afinidad que tengan los iones entre sí; generalmente, las reacciones de estos procesos son reversibles y dependerán de la concentración de los iones en la solución, la dirección de la reacción y los productos obtenidos.

Se pueden representar de acuerdo con las siguientes reacciones químicas:

1. base fuerte + ácido fuerte $\rightleftharpoons$ sal + H_2O
2. base fuerte + ácido débil $\rightleftharpoons$ sal + H_2O
3. base débil + ácido fuerte $\rightleftharpoons$ sal + H_2O
4. sal + base fuerte $\rightleftharpoons$ base débil + sal

Para una mayor claridad, a continuación se mencionan algunos ejemplos representativos:

1. $Na^+OH^-_{(ac)} + H^+Cl^-_{(ac)} \longrightarrow Na^+Cl^- + H^+OH^-$
2. $Na^+OH^-_{(ac)} + CH_3COOH^+_{(ac)} \rightleftharpoons CH_3COO^-Na^+ + H^+OH^-$
3. $NH_4^+OH_{(ac)} + H^+Cl^-_{(ac)} \rightleftharpoons NH_4^+Cl^- + H^+OH^-$
4. $Mg^+Cl^-_{2(ac)} + 2Na^+OH^-_{(ac)} \longrightarrow Mg^+ + 2OH^- + 2Na^+Cl^-$

La representación de estas reacciones en el diagrama de bloques es la siguiente:

Diagrama 9.10

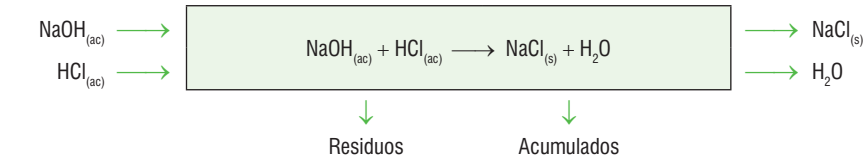


Diagrama 9.11

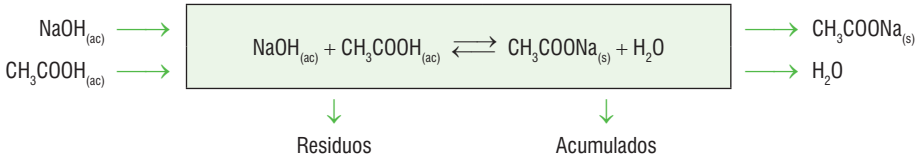


Diagrama 9.12

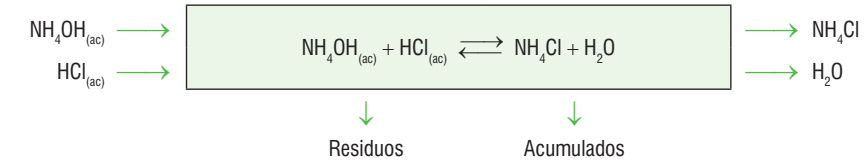
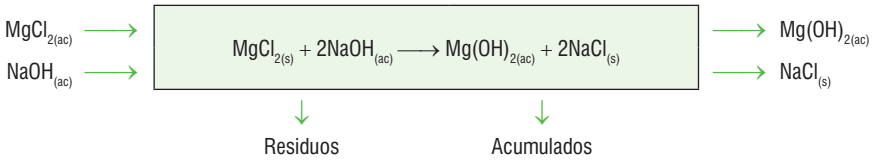


Diagrama 9.13



Como se se puede observar, el intercambio iónico ocurre siempre que estén presentes electrólitos y agua, ya que el agua se disocia en su iones de acuerdo con la siguiente reacción.

$$H_2O \rightleftharpoons H^+ + {}^-OH$$

La afinidad de los iones positivos con el OH^- y de los iones negativos con el H^+ provoca la separación iónica del electrólito y, por tanto, el intercambio iónico.

9.2.5 Neutralización

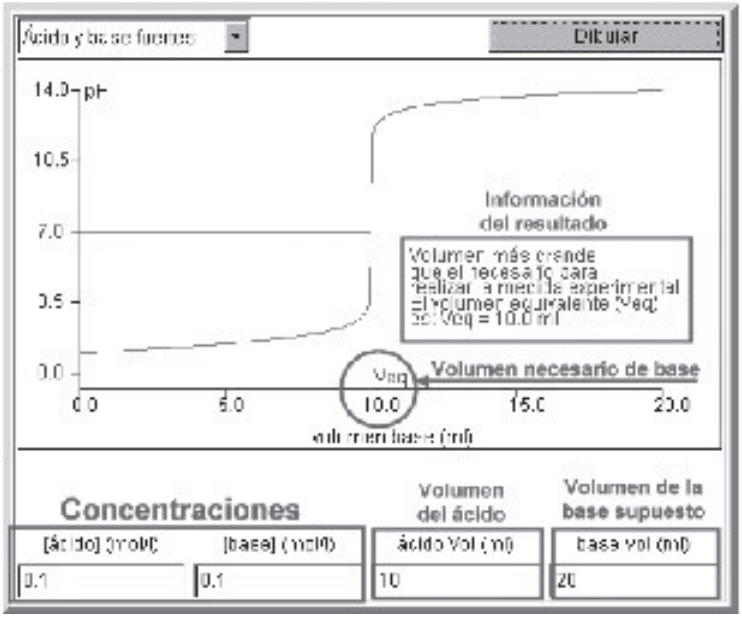
Un proceso unitario de neutralización involucra una **reacción de neutralización**, es decir, una reacción entre un ácido y una base. En las reacciones acuosas ácido-base se forma agua y una sal. Así se puede decir que la neutralización es la combinación de iones hidrógeno y de iones hidróxido para formar moléculas de agua; durante este proceso se forma una sal. Las reacciones de neutralización son generalmente exotérmicas, lo que significa que producen calor.

La representación genérica del proceso de neutralización es:

$$\text{ácido} + \text{base} \rightarrow \text{sal} + \text{agua}$$

En esta reacción de neutralización se puede usar una solución indicadora tal como la fenolftaleina o el azul de metileno, los cuales son indicadores que, al cambiar de color, muestran que el ácido o la base han sido neutralizados, esto significa que se ha formado una solución salina.

Ejemplos:



Se puede clasificar la neutralización de la siguiente manera:

1. ácido fuerte + base fuerte ⟶ sal + agua
2. ácido débil + base fuerte ⟶ sal + agua
3. ácido fuerte + base débil ⟶ sal + agua
4. ácido débil + base débil ⟶ sal + agua

Un ejemplo representativo para cada caso se muestra a continuación:

1. $HCl_{(ac)} + NaOH_{(ac)} \longrightarrow NaCl_{(s)} + H_2O$
2. $CH_3COOH + NaOH_{(ac)} \rightleftharpoons CH_3COONa_{(ac)} + H_2O$
3. $HCl_{(ac)} + NH_4OH_{(ac)} \rightleftharpoons NH_4Cl_{(ac)} + H_2O$
4. $CH_3COOH_{(ac)} + NH_4OH_{(ac)} \rightleftharpoons CH_3COONH_4 + H_2O$

La representación en el diagrama de bloques será:

Diagrama 9.14

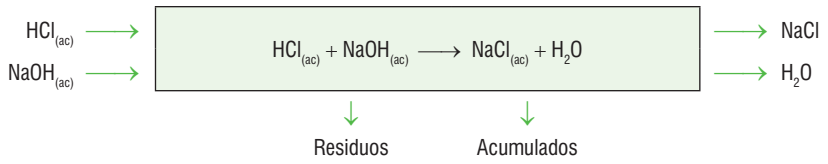


Diagrama 9.15

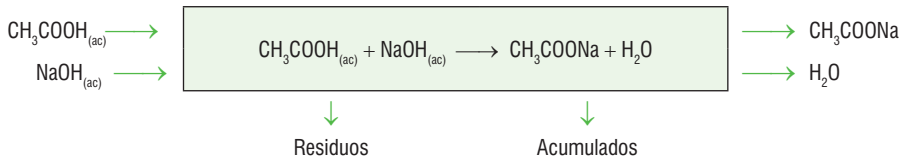


Diagrama 9.16

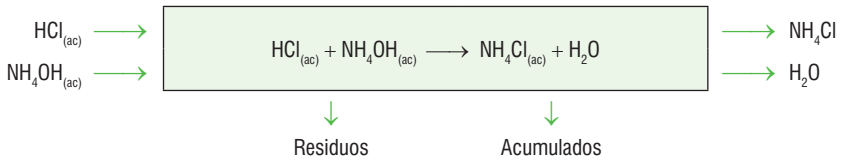
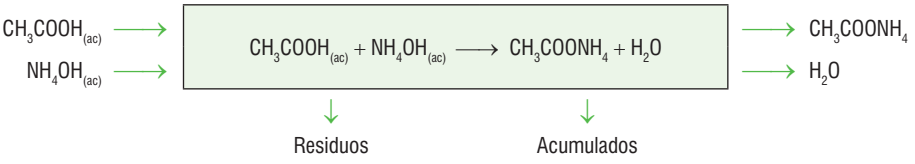


Diagrama 9.17



Las neutralizaciones son importantes en la industria, ya que estas reacciones permiten, entre muchas otras aplicaciones, que las aguas de desecho industrial puedan ser vertidas al drenaje una vez que carecen de acidez o basicidad, esto es que han perdido su carácter ácido o básico.

9.2.6 Hidrólisis

Reacción química en la que una sal formada a partir de un ácido débil o una base débil, en presencia de un medio acuoso, forma un ácido y una base. Las reacciones representativas de este proceso son las siguientes:

1. sal (de ácido débil) + H_2O $\rightleftharpoons$ ácido débil + base fuerte

2. sal (de base débil) + H_2O $\rightleftharpoons$ base débil + ácido fuerte

Ejemplos de estas reacciones son:

1. $H_2O + CH_3COONa \rightleftharpoons CH_3COOH + NaOH$

2. $NH_4Cl + H_2O \rightleftharpoons NH_4OH + HCl$

La representación del proceso unitario en el diagrama de bloques es:

Diagrama 9.18

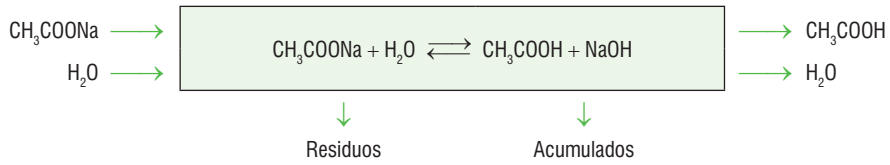
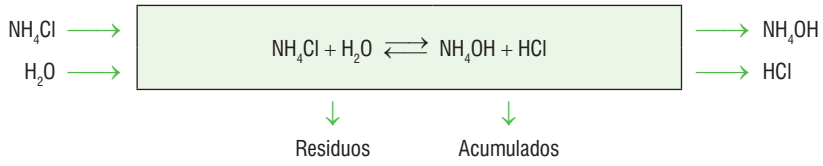


Diagrama 9.19



La hidrólisis ocurre por la reversibilidad de la reacción de intercambio iónico de las sales en el agua.

9.2.7 Electrólisis

Es el proceso unitario que involucra una reacción química donde se descompone un compuesto en sus iones, por el paso de una corriente eléctrica.

Su reacción representativa es:

$$AB_{(ac)} \xrightarrow{\text{corriente eléctrica}} A^- + B^+$$

Un ejemplo representativo es la electrólisis del agua, la cual nos permite separar el agua en sus elementos constituyentes: oxígeno e hidrógeno, de acuerdo con la siguiente reacción:

$$H_2O \xrightleftharpoons{\text{corriente eléctrica}} H_2 + \frac{1}{2}O_2$$

En forma iónica se representa como sigue:

$$H_2O \xrightarrow{\text{corriente eléctrica}} H^+ + {}^-OH$$

Otro ejemplo es la electrólisis de una sal, proceso que provocará finalmente la electrodepositación, principio básico del recubrimiento de los materiales como el cobrizado, platinado, niquelado, etcétera.

$$CuSO_{4(ac)} \xrightarrow{\text{corriente eléctrica}} Cu^{+2} + SO_4^{-2}$$

En esta reacción, al ganar el ion cobre dos electrones, se convierte en cobre metálico:

$$Cu^{+2} + 2e^- \xrightarrow{\text{corriente eléctrica}} Cu^0$$

De esta manera ocurre el cobrizado de los metales.

Su representación en el diagrama de bloques es:

Diagrama 9.20

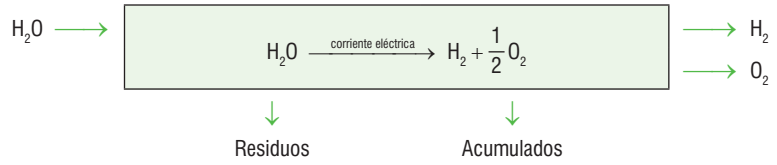
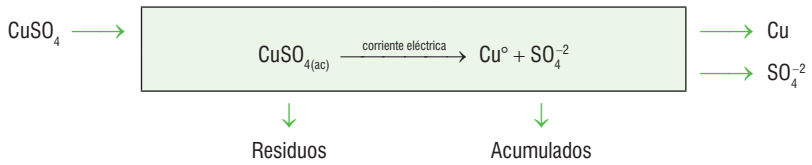


Diagrama 9.21



Este proceso ocurre en las celdas electrolíticas y en las celdas galvánicas.

9.2.8 Esterificación

La **esterificación** es el proceso unitario en donde ocurre la reacción entre un ácido débil con un alcohol, en presencia de calor y un catalizador, a través del cual se forman un éster y agua.

Su reacción representativa es:

$$\text{ácido débil} + \text{alcohol} \xrightarrow[\Delta]{\text{catalizador}} \text{éster} + H_2O$$

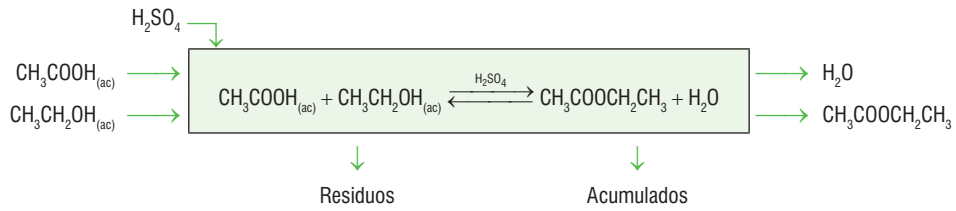
Un ejemplo de esterificación es la reacción que ocurre entre el ácido acético (CH_3COOH) y el alcohol etílico (CH_3CH_2OH) en presencia del ácido sulfúrico (H_2SO_4). Para que se lleve a cabo la reacción debe calentarse la mezcla a 60 °C, de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$CH_3COOH_{(ac)} + CH_3CH_2OH_{(ac)} \overset{H_2SO_4}{\rightleftharpoons} CH_3COOCH_2CH_3 + H_2O$$

El ácido sulfúrico tiene la función de acelerar la reacción, esto es, actúa como catalizador positivo para la reacción de formación del éster (acetato de etilo).

En el diagrama de bloques se representa como sigue:

Diagrama 9.22



9.2.9 Saponificación

La **saponificación** es el proceso unitario donde ocurre una reacción química entre un éster (que puede ser una grasa) o un ácido graso, y un álcali o base fuerte para formar una sal del ácido graso (como el jabón) y un alcohol (como el glicerol). Este proceso se usa generalmente en la producción de jabones de tocador o de barra y de glicerol (glicerina), que es un producto secundario que al separarse de la mezcla resultante se puede comercializar. La reacción genérica es la siguiente:

$$\text{ácido graso} + \text{álcali} \overset{\Delta}{\rightleftharpoons} \text{sal de ácido graso} + \text{alcohol}$$

También puede representarse como sigue:

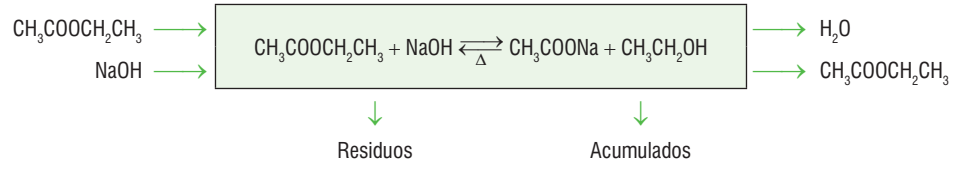
$$\text{ácido graso} + \text{álcali} \overset{\Delta}{\rightleftharpoons} \text{sal orgánica} + \text{glicerol}$$

Un ejemplo representativo es la reacción entre el acetato de etilo ($CH_3COOCH_2CH_3$) y el hidróxido de sodio (NaOH) para formar el acetato de sodio más etanol.

$$CH_3COOCH_2CH_3 + NaOH \overset{\Delta}{\rightleftharpoons} CH_3COONa + CH_3CH_2OH$$

En el diagrama de bloques se representa como sigue:

Diagrama 9.23



En este proceso se adiciona generalmente el hidróxido de sodio en exceso para obtener una máxima producción de la sal orgánica.

9.2.10 Fermentación

La **fermentación** es el proceso unitario en el cual se lleva a cabo una reacción química, que consiste en la descomposición de azúcares o glúcidos de los alimentos y por medio de enzimas o microorganismos (algunas bacterias o levaduras).

Esta reacción es anaerobia (es decir, en ausencia de oxígeno), por lo que no se lleva a cabo en la mitocondria, y es precisamente en ésta donde se verifica la cadena respiratoria que requiere oxígeno para llevarse a cabo. Desde el punto de vista energético, no es rentable la fermentación, ya que sólo produce dos moléculas ATP, mientras que la respiración produce 38 moléculas de ATP a partir de la glucosa.

La fermentación puede ser también aeróbica (es decir, en presencia de oxígeno), pero en este caso se lleva a cabo una oxidación incompleta en la que se produce ácido acético (vinagre) en lugar de ácido láctico y se utiliza alcohol (etanol) como reactivo en lugar de glucosa. La fermentación se puede clasificar en:

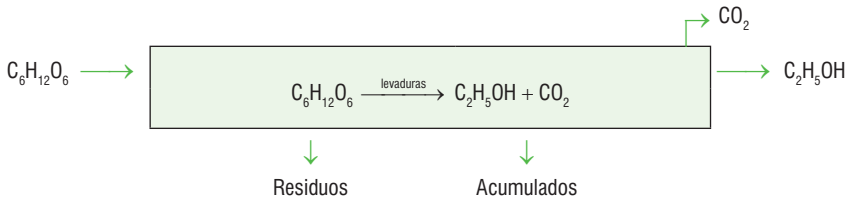
- **Fermentación alcohólica.** En esta reacción, las bacterias anaeróbicas presentes en los frutos maduros transforman la glucosa en alcohol etílico, de ahí su nombre. Su reacción representativa es:

$$\text{glucosa} \xrightarrow{\text{levaduras}} \text{alcohol} + CO_2$$

$$C_6H_{12}O_6 \xrightarrow{\text{levaduras}} 2C_2H_5OH + 2CO_2$$

En un diagrama de bloques será:

Diagrama 9.24



Industrialmente, este proceso se utiliza para la producción de vinos y cervezas.

- **Fermentación acética.** Las bacterias aeróbicas presentes transforman el alcohol etílico en ácido acético (vinagre) en presencia de oxígeno. Su reacción genérica es:

$$\text{alcohol} + O_2 \xrightarrow{\text{bacterias}} \text{ácido acético} + H_2O$$

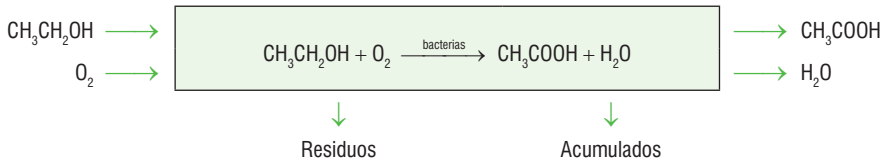
$$R - OH + O_2 \xrightarrow{\text{bacterias}} R\text{-}COOH + H_2O$$

Para el alcohol etílico:

$$CH_3CH_2OH + O_2 \xrightarrow{\text{bacterias}} CH_3COOH + H_2O$$

En un diagrama de bloques:

Diagrama 9.25



El olor característico del ácido acético, indica la descomposición de los alimentos por la acción de bacterias.

➥ **Fermentación láctica.** Es una reacción anaeróbica donde los microorganismos descomponen la lactosa en ácido láctico. La lactosa es un glúcido que, al igual que la maltosa o la sacarosa, en agua y en presencia de enzimas o microorganismos, se transforma. En tanto que la maltosa se transforma en glucosa, la lactosa se transforma en ácido láctico.

La maltosa en presencia de agua y enzimas, produce la glucosa, la cual con levaduras se convierte en alcohol, de acuerdo con las siguientes reacciones:

$$\text{maltosa o sacarosa} + H_2O \xrightarrow{\text{enzimas}} \text{glucosa}$$

$$C_{12}H_{22}O_{11} + H_2O \xrightarrow{\text{enzimas}} 2C_6H_{12}O_6$$

$$C_6H_{12}O_6 \xrightarrow{\text{levaduras}} C_2H_5OH + CO_2$$

Como se mencionó anteriormente, esto ocurre en la fermentación alcohólica. Por su parte, la lactosa produce ácido láctico en presencia de microorganismos.

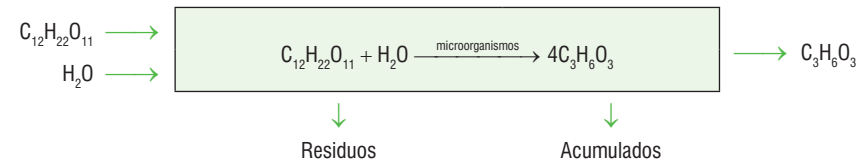
La reacción representativa para la lactosa es la siguiente:

$$\text{lactosa} + H_2O \xrightarrow{\text{microorganismos}} \text{ácido láctico}$$

$$C_{12}H_{22}O_{11} + H_2O \xrightarrow{\text{microorganismos}} 4C_3H_6O_3$$

Su representación en el diagrama de bloques es:

Diagrama 9.26



El agente principal para la fermentación de la lactosa es la enzima lactosa, la cual generalmente está presente en los productos lácticos y da lugar a la formación de ácido láctico. Aunque algunas veces también se utiliza para producir etanol en bebidas alcohólicas.

Ambas fermentaciones, la alcohólica y la láctica, son sensibles a la temperatura y suelen ser llamadas fermentaciones heterolácticas. Una de las bebidas lácticas que han sufrido una fermentación etílica es la denominada Konmiss, la cual se elabora mediante la adición

de sacarosa (azúcar de caña) a la leche pasteurizada y suele proporcionar bebidas de bajo contenido alcohólico, a esta bebida se le llama "vino de leche".

9.2.11 Hidrogenación

El proceso unitario de **hidrogenación** involucra una reacción química que consiste en la saturación de los compuestos orgánicos insaturados por reacción con el hidrógeno en presencia de un catalizador. Es un proceso en el cual, por ejemplo, los aceites vegetales se transforman en grasas sólidas en presencia de un catalizador, mediante la adición de hidrógeno a altas presiones y altas temperaturas. De esta manera se pueden fabricar las margarinas.

En la hidrogenación se rompen los dobles y triples enlaces carbono-carbono de los hidrocarburos, manteniéndose enlaces sencillos entre ellos y formándose nuevos enlaces con los átomos de hidrógeno presentes.

La reacción representativa es:

$$\text{HC no saturado} + H_2 \xrightarrow[\Delta]{\text{catalizador}} \text{HC saturado}$$

En doble enlace:

$$H_2C = CH_2 + H_2 \xrightarrow[\Delta]{\text{catalizador}} H_3C - CH_3$$

En triple enlace:

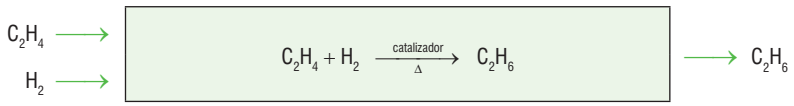
$$HC \equiv CH + 2H_2 \xrightarrow[\Delta]{\text{catalizador}} H_3C - CH_3$$

En reacciones químicas:

$$C_2H_4 + H_2 \xrightarrow[\Delta]{\text{catalizador}} C_2H_6$$

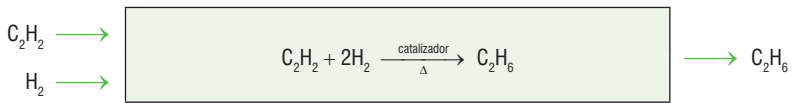
En diagrama de bloques:

Diagrama 9.27



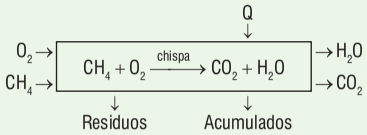
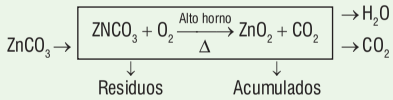
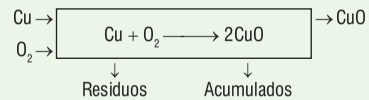
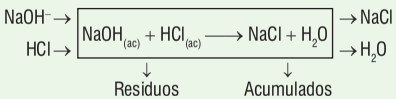
$$C_2H_2 + 2H_2 \xrightarrow[\Delta]{\text{catalizador}} C_2H_6$$

Diagrama 9.28



En la industria aceitera, la hidrogenación tiene como objetivos aumentar el punto de fusión del producto final, transformando los aceites en grasas, así como aumentar la estabilidad oxidativa del producto al eliminar los ácidos linoleico (enlace doble entre carbonos) y linolénico (enlace triple entre carbonos) que son los principales responsables de la oxidación del producto.

Tabla 9.2

Proceso unitario	Definición	Reacción base	Ejemplo	Diagrama	Aplicación Industrial
Combustión	Reacción química entre una sustancia oxidante (comburente) y otra reductora (combustible), con desprendimiento de calor o luz, en que siempre se forman CO_2, NO_2, o $SO_2 + H_2O$	(Combustible) (comburente) 1. carbohidrato + O_2 $\xrightarrow{\text{chispa}}$ $CO_2 + H_2O + Q$ 2. urea + O_2 $\xrightarrow{\text{electricidad}}$ $NO_2 + CO + H_2O + Q$ 3. sulfuro + O_2 $\xrightarrow{\text{chispa}}$ metal + $SO_2 + Q$	1. $CH_4 + O_2 \xrightarrow{\text{chispa}} CO_2 + H_2O + Q$ $C_6H_6 + 15/2\ O_2 \xrightarrow{\text{chispa}} 6CO_2 + 3H_2O + Q$ 2. $(NH_4)_2CO_3 + O_2 \xrightarrow{\text{electricidad}} 2NO_2 + CO + 4H_2O + Q$ 3. $CuS_2 + 2O_2 \xrightarrow{\text{electricidad}} Cu + 2SO_2 + Q$		Fabricación de neumáticos Fabricación de tintas Motores de combustión interna Combustión de gas doméstico
Calcinación	Reacción química en donde por calentamiento en el alto horno, en ausencia de oxígeno, se descomponen los carbonatos en óxidos metálicos y monóxido o dióxido de carbono	carbonato $\xrightarrow[\Delta]{\text{alto horno}}$ óxidos del metal + CO_2	$ZnCO_3 \xrightarrow[\Delta]{\text{alto horno}} ZnO + CO_2$ $CaCO_3$ (cal viva) $\xrightarrow[\Delta]{\text{alto horno}} CaO + CO_2$ (cal apagada)		Industria cementera (formación de la cal viva) e industria alimentaria
Oxidación	Reacción química en la que los metales ganan oxígeno formando óxidos	metal + O_2 $\longrightarrow$ óxidos del metal	1. $2Cu + O_2 \longrightarrow 2CuO$		Tratamiento de aguas residuales
Intercambio iónico	Reacción química en donde los compuestos que reaccionan intercambian iones entre sí en medio ácido	1. base fuerte + ácido fuerte $\rightleftharpoons$ sal + H_2O 2. base fuerte + ácido débil $\rightleftharpoons$ sal + H_2O 3. base débil + ácido fuerte $\rightleftharpoons$ sal + H_2O 4. sal + base fuerte $\rightleftharpoons$ base débil + sal	1. $Na^+OH^-_{(ac)} + H^+Cl^-_{(ac)} \longrightarrow Na^+Cl^- + H^+OH^-$ 2. $Na^+OH^-_{(ac)} + CH_3COO^-H^+_{(ac)} \longrightarrow CH_3COO^-Na^+ + H^+OH^-$ 3. $NH_4^+OH^-_{(ac)} + H^+Cl^-_{(ac)} \longrightarrow NH_4^+Cl^- + H^+OH^-$ 4. $Mg^+Cl^-_{2(ac)} + 2Na^+OH^-_{(ac)} \longrightarrow Mg^+(OH)^-_2 + 2Na^+Cl^-$		Generación de soluciones electrolíticas, suavizar aguas duras, producir aguas desmineralizadas, separación, purificación o concentración de licores, vitaminas, y algunos fármacos.

Continúa

Continuación

Neutralización	Reacción química entre un ácido y una base para formar una sal y agua	Reacción base base + ácido ⇄ sal + H_2O neutralización fuerte fuerte ácida ácida base + ácido ⇄ sal + H_2O neutralización fuerte débil básica base + ácido ⇄ sal + H_2O débil fuerte	1. $3Ca(OH)_3 + H_3PO_4 \longrightarrow Ca_3(PO_4)_2 + 6H_2O$ $NaOH + HCl \longrightarrow NaCl + H_2O$ 2. $NaOH_{(ac)} + CH_3COOH_{(ac)} \longrightarrow CH_3COONa + H_2O$ 3. $NH_4OH_{(ac)} + HCl_{(ac)} \longrightarrow NH_4Cl + H_2O$	$NaCl \rightarrow$ $NaOH \rightarrow$ $NaOH_{(ac)} + HCl_{(ac)} \longrightarrow NaCl + H_2O$ $\rightarrow NaCl$ $\rightarrow H_2O$ ↓ Residuos ↓ Acumulados	Industria papelera (retirar el ácido acético), industria del jabón
Hidrólisis	Reacción química en la que una sal (formada a partir de un ácido débil o una base débil), en presencia de un medio acuoso, forma un ácido y una base	1. sal (D. ácida) + H_2O ⇄ base débil + ácido fuerte 2. sal (D. básica) + H_2O ⇄ base fuerte + ácido débil	1. $NH_4Cl + H_2O \longrightarrow NH_4OH + HCL$ 2. $H_2O + CH_3COOH_{(ac)} \longrightarrow CH_3COOH + NaOH$	$H_2O \rightarrow$ $NH_4Cl \rightarrow$ $NH_4Cl_{(ac)} + H_2O \longrightarrow NH_4OH + HCl$ $\rightarrow NH_4Cl$ $\rightarrow HCl$ ↓ Residuos ↓ Acumulados	Producción de biotanol, la hidrólisis enzimática para producir jarabes de glucosa para la elaboración de bebidas refrescante, conservas de frutas y repostería, salmuera, almíbares
Electrólisis	Reacción en donde se descompone un compuesto en sus iones por el paso de una corriente eléctrica	$AB_{(ac)} \xrightleftharpoons{\text{corriente eléctrica}} A^- + B^+$	1. $CuSO_{4(ac)} \xrightleftharpoons{\text{corriente eléctrica}} Cu^0 + SO_4^{-2}$ 2. $H_2O \xrightleftharpoons{\text{corriente eléctrica}} H_2 + 1/2O_2$	$CuSO_{4(ac)} \rightarrow$ $CuSO_{4(ac)} \xrightleftharpoons{\text{Corriente eléctrica}} Cu^0 + SO_4^{-2}$ $\rightarrow Cu^0$ $\rightarrow SO_4^{-2}$ ↓ Residuos ↓ Acumulados	Descomposición de aguas o sales, obtención de metales puros, tratamiento de superficies metálicas (galvanoplastia, cromado), acumuladores
Esterificación	Reacción química de un ácido débil con un alcohol forman un éster y agua en presencia de calor y catalizador	1. sal (D. ácida) + H_2O ⇄ base débil + ácido fuerte 2. sal (D. básica) + H_2O ⇄ base fuerte + ácido débil	1. $CH_3COOH + CH_3CH_2OH \xrightleftharpoons[\Delta]{H_2SO_4} CH_3COOCH_2CH_3 + H_2O$ éster o ácido graso	$CH_3COOH \rightarrow$ $CH_3CH_2OH \rightarrow$ $CH_3COOH + CH_3CH_2OH \xrightleftharpoons[\Delta]{H_2SO_4} CH_3CH_2COOCH_3 + H_2O$ $\rightarrow CH_3CH_2COOCH_3$ $\rightarrow H_2O$ ↓ Residuos ↓ Acumulados	Producción de ésteres, analgésicos, aspirina y producción de jabón

Continúa

Continuación

Saponificación	Reacción de un éster, también llamado ácido graso, en presencia de un álcali o base fuerte para formar una sal de ácido graso y un alcohol glicerol	1. éster + álcali $\rightleftharpoons$ sal de ácido graso + alcohol ácido graso + base $\rightleftharpoons$ sal orgánica + glicerol	1. $CH_3COOCH_2CH_3 + NaOH \underset{\Delta}{\rightleftharpoons} CH_3COONa + C_2H_5OH$ sal de ácido graso — alcohol	$CH_3CH_2COOCH_3 \rightarrow$ $CH_3CH_2COONa \rightarrow$ $CH_3CH_2COOCH_3 + NaOH \xrightarrow[\Delta]{} CH_3CH_2COONa + H_2O$ $\rightarrow CH_3CH_2COONa$ $\rightarrow H_2O$ ↓ Residuos ↓ Acumulados	Producción de jabones y glicerina, detergentes y jabón de afeitar
Hidrogenación	Reacción química que implica la saturación de los compuestos orgánicos insaturados a partir de la reacción con H_2	1. H.C, no saturado + $H_2 \xrightarrow{cat}$ H.C. saturado $H_2C = CH_2 + H - H \xrightarrow{cat} H_3C - CH_3$ $HC = CH + 2H - H \xrightarrow{cat} H_3C - CH_3$	$H_2C = CH_2 + H - H \xrightarrow{cat} H_3C - CH_3$	$C_2H_4 \rightarrow$ $H_2 \rightarrow$ $C_2H_4 + H_2 \xrightarrow{cat} C_2H_6$ $\rightarrow C_2H_6$ ↓ Residuos ↓ Acumulados	Aplicación en las grasas comestibles y sintéticas, margarina, gasolina sintética
Fermentación	Reacción química que consiste en la descomposición de azúcares o glúcidos de los alimentos por medio de enzimas o microorganismos (MO) 1. Alcohólica: levaduras anaeróbicas en frutos maduros para formar alcohol 2. Acética: bacterias aeróbicas que transforman alcohol en vinagre 3. Láctica: microorganismos (MO) que forman ácido láctico	1. glucosa $\xrightarrow{levaduras}$ alcohol + CO_2 2. alcohol + $O_2 \xrightarrow{levaduras}$ ácido acético + H_2O $R - OH + O_2 \xrightarrow{enz} R - COOH + H_2O$ 3. lactosa + $H_2O \xrightarrow{MO}$ ácido láctico	$C_{12}H_{22}O_{11} + H_2O \xrightarrow{enz} 2C_6H_{12}O_6$ maltosa o sacarosa — glucosa 1. $C_6H_{12}O_6 \xrightarrow{Lev} C_2H_5OH + CO_2$ glucosa — alcohol 2. $C_2H_5OH + O_2 \xrightarrow{bacterias} CH_3COOH + H_2O$ alcohol — ácido acético 3. $C_{12}H_{22}O_{11} + H_2O \xrightarrow{MO} 4C_3H_6O_3$ lactosa + H_2O — ácido láctico	CO_2 ↓ $C_2H_5OH \rightarrow$ $O_4 \rightarrow$ $C_6H_{12}O_6 \xrightarrow{Lev} C_2H_5OH + CO_2$ $\rightarrow C_6H_{12}O_6$ ↓ Residuos ↓ Acumulados	Aplicaciones en la producción de vinos, cervezas, antibióticos, yogur, vitaminas, farmacéuticos, vinagre

9.3 Metodología para resolver problemas de procesos industriales

9.3.1 Metodología para resolver problemas de procesos unitarios con balance de masa

1. Leer el problema.
2. Analizar el problema.
3. Elaborar un diagrama de bloques que incluya datos de entrada, reacción química, datos de salida, pureza de los reactivos, rendimiento de la reacción y preguntas del problema.
4. Realizar la estequiometría de la reacción química (para esto se requiere aplicar la siguiente metodología).

9.3.2 Metodología para resolver problemas de estequiometría

1. Escribir la reacción química (anotando la pureza y eficiencia de la reacción).
2. Balancear o comprobar que la reacción química esté balanceada.
3. Anotar los pesos moleculares de reactivos y productos.
4. Generar el balance de masa de la reacción.
5. Determinar la cantidad de reactivo limitante, el reactivo en exceso y la cantidad en exceso (pureza y eficiencia).
6. Determinar los productos teóricos a partir del reactivo limitante.
7. Determinar los productos reales obtenidos aplicando la eficiencia de la reacción.
8. Elaborar el diagrama del proceso unitario que incluya todos los reactivos y los componentes de salida.
9. Realizar el balance del proceso unitario.
10. Resolver las preguntas del problema.

9.4 Aplicación de la metodología

Ejemplo 1

Una industria química tiene en su almacén 200 kg de alúmina (Al_2O_3) al 80% de pureza y 600 L de una solución de ácido sulfúrico $(H_2SO_4)_3$ 2M (2 molar), para producir sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Al_2O_3 + 3H_2SO_4 \xrightarrow{75\%} Al_2(SO_4)_3 + 3H_2O$$

Determinar:

a) La cantidad máxima de sulfato de aluminio que se puede producir.

b) Realizar el balance de masa correspondiente.

1. Leer el problema.

En la lectura del problema se observan las masas de los reactivos y su pureza, lo cual indica que uno de ellos será limitante. Se da la ecuación de la reacción química, y la eficiencia de la reacción, se determina cuál es el producto principal y el balance de masa.

2. Analizar el problema.

"Una industria química tiene en su almacén 200 kg de alúmina al 80% de pureza"

Con esta información se determina la cantidad de reactivo que entra al reactor, así como las impurezas del mismo, con la siguiente ecuación:

$$200 \text{ kg } Al_2O_3 \left| \frac{80\% \text{ pureza}}{100\% \text{ pureza}} \right| = \text{Reactivo puro}$$

$$200 \text{ kg } Al_2O_3 \left| \frac{20\% \text{ pureza}}{100\% \text{ pureza}} \right| = \text{Impurezas}$$

" y 600 L de una solución de ácido sulfúrico (H_2SO_4) 2M (2 molar)".

Recuerde que la concentración molar tiene la siguiente ecuación:

$$M = \frac{n_{\text{soluto}}}{V_{\text{solución}}}$$

De esta ecuación se despeja el número de moles de ácido sulfúrico que se tiene en la solución:

$$n_{H_2SO_4} = MV_{\text{solución}}$$

Conociendo el peso molecular del H_2SO_4, se determina la masa de este reactivo que entra al reactor.

$$m_{H_2SO_4} = n_{H_2SO_4} PM$$

No se debe olvidar que en una solución se considera el volumen correspondiente al agua, que en este caso es una impureza del reactivo; por lo cual se considera que la masa del agua se puede determinar con la fórmula de densidad:

$$V_{\text{solución}} = V_{H_2O}$$

$$m_{H_2SO_4} = \rho_{H_2SO_4} V_{H_2O}$$

"Para producir sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3$, de acuerdo con la siguiente ecuación":

$$Al_2O_3 + 3H_2SO_4 \xrightarrow{75\%} Al_2(SO_4)_3 + 3H_2O$$

Al tener la reacción y las masas de los reactivos puros a la entrada, se podrá aplicar la estequiometría para determinar el reactivo limitante, el reactivo en exceso, la cantidad en exceso y los productos; pero como se tiene un 75% de eficiencia, este valor se deberá considerar para obtener los productos reales y los acumulados (recordar que los acumulados están considerados en las reacciones irreversibles en las que existe el reactivo limitante y el reactivo en exceso).

$$m_{\text{producto}} \left| \frac{75\% \text{ eficiencia}}{100\% \text{ eficiencia}} \right| = \text{Producto real reactivo}$$

$$m_{\text{producto}} \left| \frac{25\% \text{ eficiencia}}{100\% \text{ eficiencia}} \right| = \text{Acumulado}$$

Determinar:

a) La cantidad máxima de sulfato de aluminio que se puede producir.

La cantidad máxima será el sulfato real obtenido después de aplicar el valor de la eficiencia.

b) Realizar el balance de masa correspondiente.

Para realizar el balance de masa, se deberá recordar que partimos de:

$$\text{Entradas} = \text{Salidas}$$

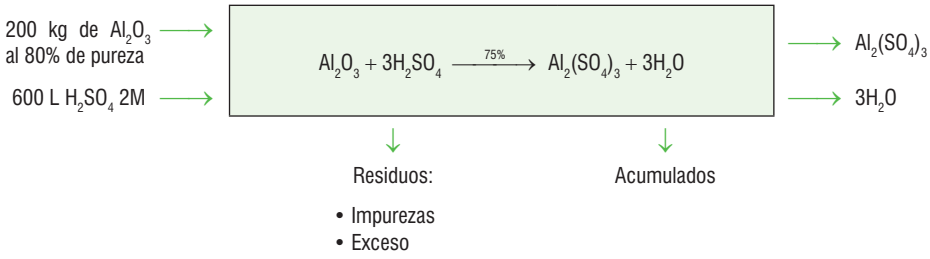
$$m_{\text{reactivos}} = m_{\text{productos reales}} + m_{\text{residuos}} + m_{\text{acumulados}}$$

$$m_{\text{residuos}} = m_{\text{impurezas del reactivo}} + m_{\text{de reactivo en exceso}}$$

Encontrados estos valores el problema estará resuelto.

3. Generar el diagrama de bloques:

Diagrama 9.29



4. Realizar la estequiometría de la reacción.

5. Escribir la reacción química (anotando la pureza y eficiencia de la reacción):

$$Al_2O_3 + 3H_2SO_4 \xrightarrow{75\%} Al_2(SO_4)_3 + 3H_2O$$

6. Balancear o comprobar que la reacción química esté balanceada:

Entradas		Salidas	
Al:	2	Al:	2
O:	15	O:	15
H:	6	H:	6
S:	3	S:	3

Como se puede observar, se tiene el mismo número de átomos de cada elemento tanto a la entrada como a la salida de la reacción, por tanto, la ecuación está balanceada.

7. Anotar los pesos moleculares de reactivos y productos:

$$\underset{\text{1 mol (102 g/mol)}}{Al_2SO_3} + \underset{\text{3 mol (98 g/mol)}}{3H_2SO_4} \xrightarrow{75\%} \underset{\text{1 mol (342 g/mol)}}{Al_2(SO_4)_3} + \underset{\text{3 mol (18 g/mol)}}{3H_2O}$$

8. Generar el balance de masa de la reacción:

$$\underset{\substack{102\ \text{g/mol}\\ 160\ 000\ \text{g}}}{Al_2SO_3} + \underset{\substack{294\ \text{g/mol}\\ 396\ \text{g}}}{3H_2SO_4} \xrightarrow{75\%} \underset{\substack{342\ \text{g/mol}\\ 396\ \text{g}}}{Al_2(SO_4)_3} + \underset{54\ \text{g/mol}}{3H_2O}$$

El balance de masa es correcto: Entradas = Salidas

9. Determinar la cantidad de reactivo limitante, el reactivo en exceso y la cantidad en exceso (pureza y eficiencia).

Para el Al_2O_3 al 80% de pureza

$$200\ \text{kg}\ Al_2O_3 \left|\frac{80\%\ \text{pureza}}{100\%\ \text{pureza}}\right| = 160\ \text{kg} \left|\frac{1000\ \text{g}}{1\ \text{kg}}\right| = 160\ 000\ \text{g reactivo puro}$$

$$200\ \text{kg}\ Al_2O_3 \left|\frac{20\%\ \text{pureza}}{100\%\ \text{pureza}}\right| = 40\ \text{kg} \left|\frac{1000\ \text{g}}{1\ \text{kg}}\right| = 40\ 000\ \text{g impurezas}$$

Para el H_2SO_4 2M

$$M = \frac{n_{H_2SO_4}}{V_{\text{solución}}(\text{L})}$$

$$n_{H_2SO_4} = M V_{\text{solución}} = \left(2\frac{\text{mol}}{\text{L}}\right)(600\ \text{L}) = 1200\ \text{mol}$$

$$m_{H_2SO_4} = n_{H_2SO_4} PM_{H_2SO_4} = (1200\ \text{mol})\left(98\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right) = 117\,600\ \text{g}$$

$$m_{H_2O} = m_{\text{impurezas}} = \rho_{H_2O} V_{H_2O} = (600\,000\ \text{mL})\left(1\frac{\text{g}}{\text{mL}}\right) = 600\,000\ \text{g}$$

10. Calcule la cantidad de reactivo limitante y el reactivo en exceso.

$$\underset{\substack{(102\ \text{g/mol})\\ 160\ 000\ \text{g}}}{Al_2O_3} + \underset{\substack{(294\ \text{g/mol})\\ \\ 117\ 600\ \text{g}}}{3H_2SO_4} \xrightarrow{75\%} \underset{\substack{(342\ \text{g/mol})\\ X = 536\ 470{,}59\ \text{g}\\ X = 136\ 800\ \text{g}}}{Al_2(SO_4)_3} + \underset{\substack{(54\ \text{g/mol})\\ \text{reactivo limitante } H_2SO_4\\ \text{reactivo en exceso } Al_2SO_3}}{3H_2O}$$

Como se puede observar, el reactivo limitante es el H_2SO_4, ya que sólo produce 136 800 g de $Al_2(SO_4)_3$ y se consume totalmente, mientras que el Al_2O_3 podría producir 536 470,59 g de $Al_2(SO_4)_3$, esto indica que es el reactivo que se encuentra en exceso.

11. Determinar la cantidad en exceso, así como las cantidades de los otros productos.

La cantidad en exceso se determina con una relación estequiométrica entre el producto y el reactivo en exceso, considerando la máxima cantidad del producto que se puede producir de acuerdo con el reactivo limitante.

$$\underset{\substack{(102\ g/mol)\\ 160\ 000\ g\\ -\ \underline{X = 40\ 800\ g}\\ 119\ 200\ g\ \text{cantidad en exceso}}}{Al_2SO_3} + \underset{(294\ g/mol)}{3H_2SO_4} \xrightarrow{75\%} \underset{(342\ g/mol)\\ 136\ 800\ g}{Al_2(SO_4)_3} + \underset{(54\ g/mol)}{3H_2O}$$

12. Los productos teóricos a partir del reactivo limitante:

$$\underset{(102\ g/mol)}{Al_2SO_3} + \underset{\substack{(294\ g/mol)\\ 117\ 600\ g}}{3H_2SO_4} \xrightarrow{75\%} \underset{\substack{(342\ g/mol)\\ X = 21\ 600\ g}}{Al_2(SO_4)_3} + \underset{(54\ g/mol)}{3H_2O}$$

13. Determinar los productos reales obtenidos aplicando la eficiencia de la reacción.

Para el $Al_2(SO_4)_3$:

$$136\ 800\ g \left|\frac{75\%\ \text{eficiencia}}{100\%\ \text{eficiencia}}\right| = 102\ 600\ g\ \text{de}\ Al_2(SO_4)_3\ \text{real}$$

$$136\ 800\ g \left|\frac{25\%\ \text{pureza}}{100\%\ \text{pureza}}\right| = 34\ 200\ g\ \text{de}\ Al_2(SO_4)_3\ \text{acumulado}$$

Para el H_2O:

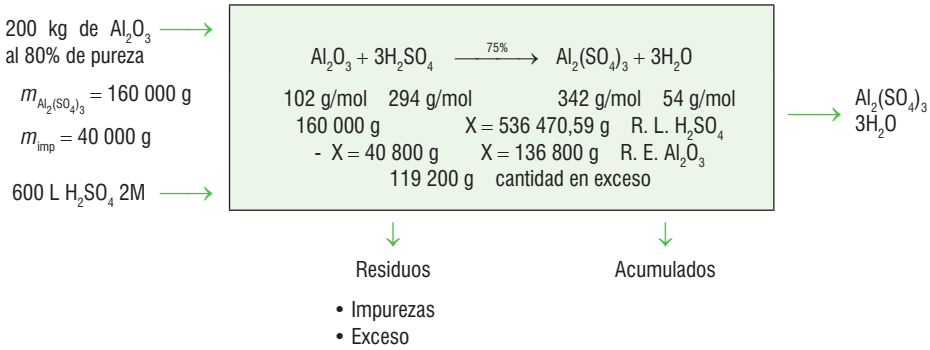
$$21\ 600\ g \left|\frac{75\%\ \text{eficiencia}}{100\%\ \text{eficienciaa}}\right| = 16\ 200\ g\ \text{de}\ H_2O\ \text{real}$$

$$21\ 600\ g \left|\frac{25\%\ \text{pureza}}{100\%\ \text{pureza}}\right| = 5\ 400\ g\ \text{de}\ H_2O\ \text{acumulado}$$

14. Elaborar el diagrama del proceso unitario que incluya todos los reactivos y los componentes de salida.

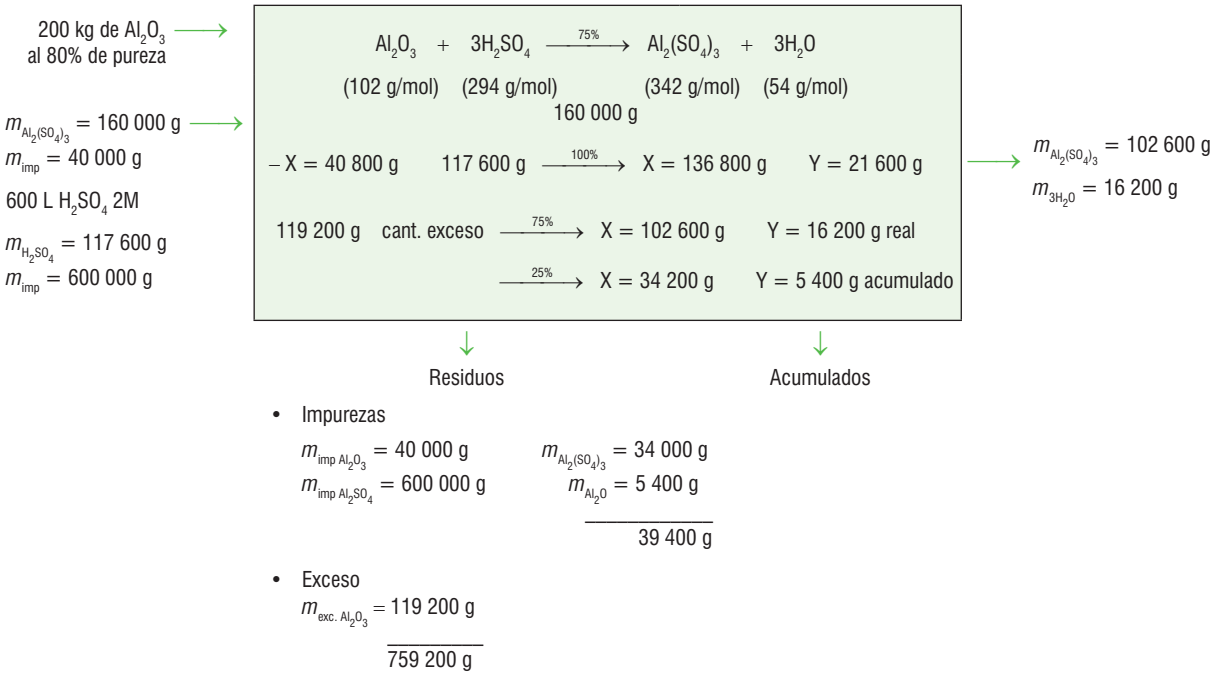
En este diagrama se muestran los datos para determinar el reactivo limitante:

Diagrama 9.30



Considerando la eficiencia y los excesos se tiene:

Diagrama 9.31



15. Realizar el balance del proceso unitario.

Entradas = Salidas

$$m_{Al_2O_3} + m_{H_2SO_4} = m_{Al_2(SO_4)_{3\ real}} + m_{H_2O_{real}} + \text{impurezas} + \text{acumulado}$$

200 000 g + 717 600 g = 102 600 g + 162 000 g + 759 200 g + 39 400 g

917 600 g = 917 600 g

16. Resolver las preguntas del problema.

a) Determinar la cantidad máxima de $Al_2(SO_4)_3$ que se puede producir.

b) La cantidad que se puede producir idealmente es igual a 136 800 g $Al_2(SO_4)_3$, pero lo que se produce realmente es 102 600 g. Esta última cantidad es la respuesta a esta pregunta.

c) Realizar el balance de masa correspondiente.

9.5 Problemas

De la siguiente redacción conteste lo que se le pide.

La anilina es un producto que se utiliza como intermediario para la fabricación de productos químicos, de hule y tintes. La anilina se puede producir en un reactor de acero, a una temperatura entre 220 – 250 °C, a partir de las sustancias que se indican en la siguiente reacción:

$$\underset{\text{clorobenceno}}{C_6H_5Cl} + \underset{\text{amoniaco al 26\%}}{2NH_3} \xrightarrow{\text{catalizador}} \underset{\text{anilina}}{C_6H_5NH_2} + \underset{\text{cloruro de amonio}}{NH_4Cl}$$

1. Si se desea obtener 2 500 kg de anilina, con una eficiencia de 92%, ¿qué cantidad de materias primas deben participar en la reacción?

2. ¿Qué cantidad de amoniaco líquido fue necesario alimentar (densidad = 0,904 g/cm^3)? Dé el resultado en litros.

3. Si la empresa comercializa 2 000 kg de la anilina obtenida para la fabricación de hule y tiene un pedido adicional de 1200 kg de producto para la fabricación de tintes, ¿qué cantidad de materias primas tiene que emplear para cubrir el segundo pedido?

4. Realice el balance final con base en los resultados del inciso i) del problema.

De la siguiente redacción conteste lo que se le pide:

Durante el procesamiento de la caña de azúcar se obtiene un jarabe de desecho llamado melaza, que contiene sacarosa. Dicha sustancia se trata con enzimas y levaduras para producir alcohol etílico según las siguientes reacciones:

i) $C_{12}H_{22}O_{11} + H_2O \xrightarrow{\text{enzimas}} 2C_6H_{12}O_6$

sacarosa — agua al 95% — glucosa

ii) $2C_6H_{12}O_6 \xrightarrow{\text{Lev}} 4C_2H_5OH + 4CO_2$

glucosa — alcohol etílico — dióxido de carbono

De cada 10 toneladas de caña se generan 200 L de melaza, que contiene 45% en peso de sacarosa (densidad de la melaza = 1,34 kg/L). Con base en esta información determine:

5. La cantidad de alcohol etílico, en kilogramos, que se produce considerando el rendimiento de las dos reacciones, si se procesan 95 toneladas de caña.

6. ¿Cuánto dióxido de carbono se genera, en kilogramos?

7. Ilustre el proceso con el respectivo diagrama de flujo.

8. Si la tonelada de caña de azúcar le cuesta $52, ¿cuánto ganará la empresa al obtener el alcohol etílico, si cada litro lo vende a $15? Densidad del alcohol = 0,789 g/cm^3.

9. Efectúe los balances parciales y el balance total.

De la siguiente redacción conteste lo que se le pide:

El suero oral utilizado para casos de deshidratación se vende en sobres de 27,9 g. Su composición porcentual es la siguiente:

Tabla 9.3.

Componente	% peso
Glucosa	71,68
Cloruro de sodio	12,55
Citrato trisódico	10,39
Cloruro de potasio	5,38

Para fabricar la glucosa se lleva a cabo la siguiente reacción:

$$\underset{\text{maltosa}}{C_{12}H_2O_{11}} + \underset{\text{agua}}{H_2O} \xrightarrow{\text{enzima}} \underset{\text{glucosa}}{2C_6H_2O_6}$$

10. Si se dispone de 500 kg de maltosa, ¿qué cantidad de sobres se pueden producir si el rendimiento de la reacción es de 92%?

11. ¿Qué cantidad de cada componente será necesario agregar para generar la mezcla total?

12. Realice el balance de la reacción correspondiente.

De la siguiente redacción conteste lo que se le pide:

Una fábrica que produce artículos decorativos de latón tiene una demanda de 8 000 recipientes por semana. Cada recipiente pesa 15 kg; el latón es una aleación que contiene 60% de cobre y el resto es zinc. El cobre utilizado para la aleación se obtiene mediante dos reacciones químicas.

i) $$\underset{\text{calcopirita}}{2CuFeS_{2(s)}} + \underset{\text{oxígeno}}{4O_{2(g)}} \longrightarrow \underset{\text{sulfato de cobre}}{Cu_2S_{(s)}} + \underset{\text{óxido de fierro}}{2FeO_{(s)}} + \underset{\text{dióxido de azufre}}{3SO_{2(g)}}$$

ii) $$\underset{\text{sulfuro de cobre}}{Cu_2S_{(s)}} + \underset{\text{oxígeno}}{O_{2(g)}} \longrightarrow \underset{\text{cobre}}{2Cu_{(s)}} + \underset{\text{dióxido de azufre}}{SO_{2(g)}}$$

13. ¿Qué cantidad del mineral calcopirita se requiere para la producción de los 8 000 recipientes, considerando que tiene una pureza de 75% en peso?

14. Si el dióxido de azufre formado se extrae por succión y se conduce a otra instalación, ¿qué cantidad se recupera considerando las dos reacciones?

15. ¿Qué cantidad de aire se requiere para ambas reacciones, considerando que el aire tiene una composición de 23% en peso de O_2 y 77% en peso de N_2? Considere que el oxígeno necesario para las reacciones se toma del aire que se inyecta al reactor.

De la siguiente redacción conteste lo que se le pide:

Para neutralizar el hidróxido de sodio (NaOH) presente en cierta solución se utilizaron 25 kg de una solución de ácido clorhídrico (HCl) al 15.75% en peso. De acuerdo con la siguiente reacción (eficiencia de la reacción 93%), determine:

$$NaOH + HCl \longrightarrow NaCl + H_2O$$

16. ¿Qué cantidad en masa de NaOH se neutralizó?

17. ¿Qué cantidad de cloruro de sodio (NaCl) y agua (H_2O) se formó?

18. Realice el balance de masa.

De la siguiente redacción conteste lo que se le pide:

Una industria química tiene en su almacén 620 kg de alúmina, la cual contiene 82% de trióxido de aluminio (Al_2O_3). Con esta materia prima se desea fabricar sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3$) mediante la siguiente reacción, la cual tiene una eficiencia de 82%:

$$\underset{\text{trióxido de aluminio}}{Al_2O_3} + \underset{\text{ácido sulfúrico}}{3H_2SO_4} \longrightarrow \underset{\text{sulfato de aluminio}}{Al_2(SO_4)_3} + \underset{\text{agua}}{3H_2O}$$

Uno de sus clientes le ha solicitado un pedido especial de 3 500 frascos de 1 libra de sulfato de aluminio. El gerente de la empresa desea saber:

19. ¿La alúmina disponible es suficiente? Si no es así, ¿cuánto debe comprar?

20. ¿Cuánto ácido sulfúrico industrial, con pureza de 63% en peso (densidad = 1,8 g/mL) debe adquirir? Dé su resultado en litros.

21. Si la alúmina tiene un costo de $550/kg y el ácido sulfúrico industrial cuesta $230/L, ¿en cuánto debe vender el cliente cada frasco para obtener el 50% de utilidad sobre el costo de las materias primas?

22. Realice el balance de masa correspondiente.

De la siguiente redacción conteste lo que se le pide:

En una industria textil se requiere agua para el área de teñido y por análisis se ha detectado que el afluente contiene 400 mg de $CaCl_2$ por cada litro de agua, lo que la hace dura. Para tratarla y eliminar dicho componente, se adiciona carbonato de sodio, según la siguiente reacción que ocurre al 85% de eficiencia:

$$\underset{\text{cloruro de calcio}}{CaCl_2} + \underset{\text{carbonato de sodio}}{Na_2CO_3} \longrightarrow \underset{\text{carbonato de calcio}}{2CaCO_3} + \underset{\text{cloruro de sodio}}{2NaCl}$$

Determine:

23. La cantidad de Na_2CO_3 que se debe agregar para tratar 3 m^3/s de agua. Exprese su resultado en kilogramo.

24. Si el proceso de ablandamiento se lleva a cabo en un tanque de sedimentación, ¿qué cantidad de $CaCO_3$ se acumulará en un minuto de alimentación de agua dura? Exprese su resultado en kilogramo.

25. Realice el balance de masa correspondiente.

26. El principio activo de la aspirina se fabrica con base en la siguiente reacción:

$$2C_7H_6O_3 + C_4H_6O_3 \longrightarrow 2C_9H_8O_4 + H_2O$$

a) Si se emplea 1 kg de ácido salicílico ($C_7H_6O_3$) y se obtienen 1,10 kg de aspirina ($C_9H_8O_4$), determine el rendimiento de la reacción.

b) Si un laboratorio farmacéutico fabrica 1 000 tabletas/h con 0,5 g de aspirina, determine la cantidad de materias primas que son necesarias en una semana de 5 días, con un turno de 8 horas, considerando la eficiencia de la reacción calculada en el inciso a).

c) Realice el balance de masa correspondiente.

27. El abono KAR.H-60 se fabrica mediante la siguiente formulación:

Tabla 9.4.

Compuesto	Cantidad (kg)
Fosfato potásico	62,00
Urea	30,00

Continúa

Continuación

Sulfato férrico	1,00
Sulfato de cobre	0,25
Cloruro férrico	0,80
Sal sódica	1,00
Acido cítrico	1,00
Agente mojante	1,00
Hexametilen tetramina	7,00

Si se tiene una demanda de 100 toneladas de abono, determine:

a) La cantidad de materias primas necesarias para obtener el fosfato potásico requerido para las 100 toneladas de abono. Considere que el fosfato se obtiene mediante la siguiente reacción química:

$$\underset{\text{ac. fosfórico}}{2H_3PO_4} + \underset{\text{carbonato de potasio}}{3K_2CO_3} \longrightarrow \underset{\text{fosfato potásico}}{2K_3PO_4} + \underset{\text{dióxido de carbono}}{3CO_2} + \underset{\text{agua}}{3H_2O}$$

Para esta reacción, el ácido fosfórico posee una pureza de 50% en peso, y el rendimiento de la reacción es de 92%.

b) Si todo el dióxido de carbono formado se desprende a la atmósfera, ¿qué cantidad se libera?

c) Al eliminarse todo el dióxido de carbono de los productos de reacción, ¿cuál será la composición de la mezcla final?

d) Finalmente, al fosfato potásico se le elimina toda el agua agregando carboxi-metil-celulosa, ¿cuánto se requiere de absorbente si por cada kilogramo de mezcla se usa 0,0128 kg del compuesto?

e) Realice el diagrama del proceso, los balances parciales y el balance total.

28. Las siguientes reacciones químicas son una fuente de energía eléctrica en las industrias de procesos químicos:

$$\underset{\text{metano}}{CH_{4(g)}} + \underset{\text{oxígeno}}{2O_{2(g)}} \longrightarrow \underset{\text{dióxido de carbono}}{CO_{2(g)}} + \underset{\text{agua}}{2H_2O_{(g)}} + Q$$

$$\underset{\text{metano}}{CH_{4(g)}} + \underset{\text{oxígeno}}{3/2\ O_{2(g)}} \longrightarrow \underset{\text{monóxido de carbono}}{CO_{(g)}} + \underset{\text{agua}}{2H_2O_{(g)}}$$

El gas que se utiliza como materia prima contiene 97% en peso de metano y 3% en peso de nitrógeno, el gas se quema en un horno en presencia de aire (cuya composición es 79% en peso de N_2 y 21% en peso O_2). En estas reacciones químicas, 90% del metano se transforma en CO_2, el 5% en CO y el resto permanece sin quemarse. Para 200 toneladas de gas, determine:

a) ¿Cuánto dióxido de carbono se forma?

b) ¿Cuánto monóxido de carbono se genera?

c) ¿Cuánto aire se requiere para las dos reacciones?

d) ¿Cuántos kilogramos de metano no se queman?

e) ¿Qué proceso unitario representan estas reacciones? Dé su definición.

f) Clasifique la primera reacción química.

g) Realice los balances de masa parciales y el balance total.

29. Determine cuál es el proceso más económico para la obtención de 1 500 libras de anilina ($C_6H_5NH_2$), si se cuenta con los siguientes procesos alternativos:

i) $\underset{90\%}{4C_6H_5NO_2} + 9Fe + 4H_2O \longrightarrow 4C_6H_5NH_2 + 3Fe_3O_4$

ii) $\underset{85\ \%}{C_6H_5Cl} + 2NH_3 \longrightarrow C_6H_5NH_2 + NH_4Cl$

Si los costos son los siguientes.

Tabla 9.5.

Materia prima	Costo
$C_6H_5NO_2$ con pureza de 74% en peso	$ 2,500/kg
Fe con pureza de 98% en peso	$ 1,500/kg
C_6H_5Cl con pureza de 78% en peso	$ 4,000/kg
NH_3 con pureza de 85% en peso	$ 2,50/kg

9.6 Tema de actualidad

Últimas Noticias, martes, 16 de septiembre de 2008

- La Organización Meteorológica Mundial (OMM) afirmó contundentemente que los cambios observados en la estratosfera de nuestro planeta podrían retardar la reconstitución de la capa de ozono.
- La Organización Meteorológica Mundial sostuvo que los cambios observados en la estratosfera podrían retardar la reconstitución de la capa de ozono, a pesar del freno al desgaste que se logró con la firma del Protocolo de Montreal, en 1987.

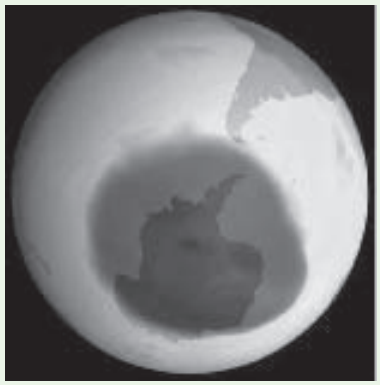


Figura 9.3 *Agujero de la capa de ozono sobre la Antártica*

Hoy en día, el agujero de la capa de ozono sobre la Antártica ya es más grande que lo registrado en 2007; aunque los expertos no creen que este año alcance los niveles que tuvo en 2006, cuando se registraron las dimensiones más grandes en la historia de este agujero, sostuvieron miembros de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Coincidiendo con el Día Mundial de la Preservación de la Capa de Ozono, la OMM advirtió, además, que los cambios observados en la estratosfera podrían retardar la reconstitución de la capa de ozono, a pesar del freno al desgaste que se ha logrado con el Protocolo de Montreal, firmado en 1987.

En las dos últimas semanas, el agujero en la capa de ozono sobre la zona de la Antártica, el cual suele alcanzar su punto máximo entre finales de septiembre y principios de octubre, se ha agrandado rápidamente, dijeron los expertos, hasta el punto de superar el máximo alcanzado en 2007.

El 13 de septiembre de 2008, el agujero de la capa de ozono se extendía a lo largo de 27 millones de kilómetros cuadrados, mientras que en esas mismas fechas en 2007, éste no había superado los 25 millones de kilómetros cuadrados.

La OMM manifestó hoy que los científicos son cada vez más conscientes de las relaciones posibles entre el empobrecimiento de la capa de ozono y el cambio climático.

"El aumento de los gases de efecto invernadero en la atmósfera conllevará a un alza de las temperaturas en la troposfera y en la superficie del globo, mientras que se producirá un efecto de enfriamiento en la estratosfera, en las altitudes en las que se encuentra la capa de ozono", señaló la organización en un comunicado.

El frío colabora en la destrucción del ozono

La disminución de las temperaturas observada en la estratosfera en los últimos años en época de invierno facilita las reacciones químicas que destruyen el ozono.

Geir Braathen, científico experto de la OMM, declaró a la agencia de noticias EFE que a pesar del crecimiento de las dimensiones del agujero de ozono registrado en este año, "esperamos que la situación mejore a largo plazo; lo peor ya lo hemos visto (en 2006)".

"En las latitudes templadas, donde vive la mayor parte de la población mundial, no creemos que la situación vaya a agravarse, sino que irá mejorando lentamente; sin embargo, en las zonas polares la situación es más grave y veremos el agujero de la capa de ozono otros 10 ó 20 años como ahora", subrayó el científico.

Por la firma del Protocolo de Montreal, los gobiernos acordaron eliminar en un 95 por ciento el uso de gases CFC, comúnmente utilizados para refrigeración, decisión a la que se unió, el año pasado, un compromiso de acelerar la reducción progresiva de los hidrofluorocarbonos (HCFC), que sustituyeron a este tipo de gases y que también son perjudiciales para el ozono, además de ser potentes gases de efecto invernadero.

Sin este acuerdo, el adelgazamiento de la capa de ozono hubiera duplicado para el año en 2050, la cantidad de la radiación ultravioleta que llega a la Tierra, capaz de alcanzar la superficie terrestre en el hemisferio norte y, cuadruplicado la del hemisferio sur.

En 2006, el agujero de ozono sobre la Antártica alcanzó un récord histórico, debido a un invierno especialmente frío, dado que se extendió sobre una superficie de 29.5 millones de kilómetros cuadrados, con una pérdida de ozono evaluada en 40 millones de toneladas.

http://www.elmanana.com.mx/notas.asp?id=78776 Agujero de ozono más grande que 2007

Transforman en Brasil una bacteria en piel artificial y lentes de contacto

Un grupo de empresas brasileñas pertenecientes al área de la biotecnología ha conseguido convertir la celulosa producida por una bacteria en productos tales como piel artificial, material para revestir chalecos a prueba de balas, productos curativos biológicos y hasta en lentes de contacto.

Esta tecnología ha sido desarrollada por las empresas Fibrocel y Trigger, ambas compañías con sede en Ibiporá, un municipio sureño en el estado de Paraná, en asociación con el Laboratorio de Materiales Fotónicos de la Universidad Estatal de Sao Paulo (Unesp), informó hoy el Ministerio de Ciencia y Tecnología de Brasil.

Estos experimentos son comandados y supervisados por los profesores Younés Messaddeq y Sindey Ribeiro, miembros de la Unesp e investigadores del Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (CNPq), organismo estatal, perteneciente al Ministerio de Ciencia y Tecnología de Brasil.

La materia prima de estos proyectos es biocelulosa, en particular la celulosa producida por la bacteria *Acetobacter xylinum*.

Entre los productos desarrollados con este material destaca una piel artificial provisional, la cual puede ser usada en tratamientos de quemaduras y heridas de difícil cicatrización.

Esta piel ya es conocida por los cirujanos plásticos, quienes la utilizan con excelentes resultados de recuperación.

Según el Ministerio de Ciencia y Tecnología, la celulosa, el polímero natural más abundante del planeta, además de ser sintetizada por las plantas, es producida por algunos microorganismos, entre los que destacan las bacterias de las especies *Acetobacter xylinum*, *Agrobacterium tumefaciens* y *Sarcina ventricull*. La primera de estas bacterias, abundante en frutas, vegetales, vinagre y bebidas alcohólicas, es (por ahora) la única conocida con capacidad para producir celulosa en cantidades comerciales en medios de cultivo en que utilizan como nutrientes, fuentes de carbono y nitrógeno.

La nota del Ministerio de Ciencia y Tecnología agrega que la versatilidad de la celulosa bacteriana obedece a las características particulares de *Acetobacter xylinum*, el material tiene gran elasticidad, resistencia mecánica y facilidad para ser moldeada, lo que permite que pueda ser convertida en hilos, tubos y bloques. También se caracteriza por ser biodegradable, biocompatible y atóxica, además de no causar alergias.

Tales características convierten a la biocelulosa en una excelente matriz para la preparación de nuevos materiales con aplicaciones en diferentes áreas, desde la textil y los alimentos, hasta la optoelectrónica y la medicina.

Otros productos desarrollados en el laboratorio con el material obtenido de la biocelulosa son membranas antibacterianas: " biocurativos antimicrobianos, los cuales pueden ser usados en el tratamiento de heridas infectadas por bacterias para prevenir infecciones y acelerar el proceso de cicatrización", afirmó Hernane Barud, investigador de este laboratorio.

Los lentes de contacto hechos con este material fueron desarrollados específicamente para la regeneración de la córnea, ya que liberan gradualmente los medicamentos.

Los científicos también han estado trabajando en la disolución controlada de la biocelulosa para la fabricación de derivados con alto valor agregado y gran importancia para el país, como el acetato de celulosa y la celulosa microcristalina.

Asimismo, en la actualidad se trabaja en proyectos para convertir la biocelulosa en un material soluble, para que pueda ser usada en productos de higiene, como dentífricos, acondicionadores, alimentos y hasta celulosa comestible, así como en proyectos para transformarla en chalecos a prueba de balas, películas para preservación de documentos y pantallas flexibles para computadoras.

9.7 Bibliografía

Chang, Raymond, ***Fisicoquímica***, McGraw-Hill Interamericana, 9ª edición, México, 2008.

Choppin, Gregory R., ***Química***, Grupo Editorial Patria, México, 2008.

Farrington, Daniels A., ***Fisicoquímica***, Grupo Editorial Patria, México, 1985.

Fogler, Scott H., ***Elementos de ingeniería de las reacciones químicas***, Prentice Hall, 3ª edición, México, 2008.

Hein, Morris, ***Química general***, Cengage Learning, 2008.

I.N. Levine, ***Fisicoquímica,*** 2 volúmenes, 5ª edición, McGraw-Hill Interamericana, México 2004.

Laidler, Keith J., ***Fisicoquímica***, Grupo Editorial Patria, México 2007.

Timberlake, Karen C., ***Química***, Prentice Hall, México, 2008.

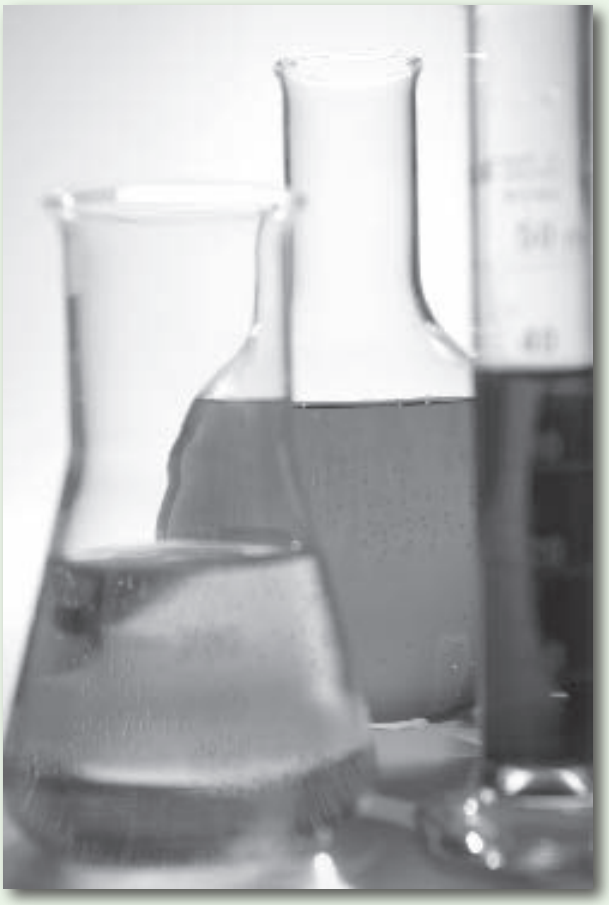
Treybal Robert E., ***Operaciones de transferencia de masa***, McGraw-Hill Interamericana, 2ª edición, México, 1996.

Welty James R., ***Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa***, Limusa, 3ª edición, México, 2005.

Capítulo

10

Soluciones



Muestras de diversas soluciones. (*Jupiter Images Corporation*)

10.1 Introducción

Al examinar con detenimiento los materiales y objetos que nos rodean, es posible notar que algunos de éstos constan de dos o más sustancias; tales combinaciones se denominan mezclas (véase tabla 10.1). Los componentes de una mezcla conservan todas sus propiedades como si fueran sustancias separadas, o sea que dichos componentes no se han alterado al unirse para formar parte de la mezcla.

Un tipo de mezcla en estado líquido, que aparece con frecuencia en el estudio de los procesos más importantes que ocurren en la naturaleza, es la solución o disolución. Son ejemplos de disolución: la absorción de alimentos por los organismos vivos, los procesos de meteorización de rocas por acción del agua, la penetración de sales en el suelo, la limpieza de tejidos y el deterioro que sufre el concreto en contacto con la lluvia (proceso que se conoce como lixiviación). Todos éstos son ejemplos de fenómenos que se llevan a cabo a través de la disolución de diversas sustancias en líquidos, comúnmente, en agua.

Tabla 10.1. Mezclas cotidianas y sus componentes principales.

Mezcla	Componentes principales
Arena de mar	óxido de silicio y cloruro de sodio
Papel satinado	caolín y celulosa
Chicle	montmorillonita, polímeros, agua y azúcar
Sangre	agua, sales inorgánicas y proteínas
Concreto	agua, silicato de calcio y óxido de silicio
Salsa catsup	agua, vinagre, sal, azúcar y nuez moscada
Mermelada	agua, frutas y azúcar
Crema batida	agua, grasa, proteínas y aire
Crema para el cuerpo	lanolina, carbohidratos y esencias
Smog	humo, aire, CO_2 y vapor de agua
Polvos anticucarachas	bórax, almidón y azúcar
Pasta dentífrica	agua, alcohol, glicerina y carbonato de sodio
Bebida cuba libre	alcohol, azúcar y agua

10.2 Definición de solución

Una **solución** es una mezcla homogénea formada por dos o más componentes; a las sustancias que se encuentran en menor proporción en las soluciones se les llama **solutos** y a la que se encuentra en mayor proporción, **solvente** o **disolvente**. El disolvente también se define como la sustancia que disuelve a los solutos.

En cualquier solución en que se halle presente, el agua es considerada como el disolvente; por ejemplo, en una solución formada por cloruro de sodio y agua (también conocida como salmuera), sin importar la cantidad en la que se encuentre, al cloruro de sodio se le identifica como el soluto y al agua, como el disolvente.

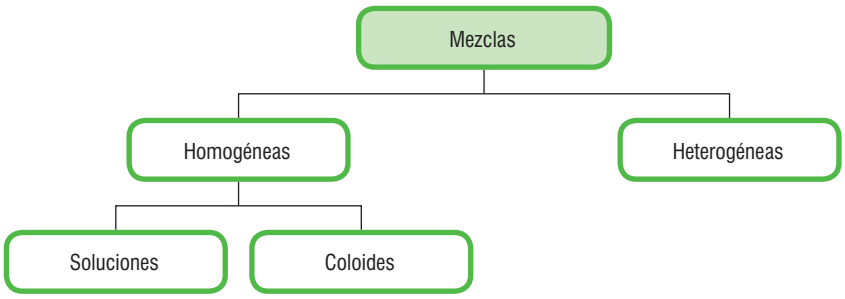


Figura 10.1 *Clasificación de las mezclas en las cuales se pueden encontrar las soluciones.*

10.3 Clasificación de las soluciones

Hay diferentes tipos de soluciones y se les puede clasificar de distintas maneras:

a) En función de la cantidad de soluto presente. Con base en este criterio, las soluciones pueden ser:

- **Insaturadas.** Cuando el soluto no ha llegado a su nivel máximo de solubilidad; esto es, que se puede seguir agregando soluto y se seguirá disolviendo. Por ejemplo, cuando se prepara una salmuera: si se agrega una cucharada de sal (aproximadamente 50 g) en un vaso con 250 mL de agua se observa que la sal se disuelve completamente. En este momento se tiene una solución insaturada.
- **Saturadas.** Este tipo de soluciones se forma cuando la cantidad de soluto llega a su máximo nivel de solubilidad, por lo que ya no se podrá disolver más soluto en el disolvente. Usando el ejemplo anterior, se forma una solución saturada cuando se agrega sal al agua hasta que, aun agitando, ya no se disuelva más soluto y parte de éste se observe como un sólido precipitado en el seno de la solución. Si esa mezcla no homogénea se filtra a través de un paño, el líquido filtrado quedará libre de la sal no disuelta y se tendrá una salmuera saturada.
- **Sobresaturadas.** Estas soluciones se forman cuando al calentar la mezcla se logra disolver más soluto; es decir, cuando aparentemente se rebasa el límite de solubilidad del soluto. Siguiendo con el ejemplo anterior, si se vuelve a agregar la sal filtrada a la solución y se calienta la mezcla, se logra disolver la sal en exceso. Si esa solución se deja enfriar, en reposo, para que no se precipite el exceso de sal, se tendrá una solución sobresaturada.

b) En función de su concentración. En este caso se habla de soluciones con una cierta cantidad de soluto que permanece constante, en las cuales se cambia la cantidad de disolvente.

- **Concentrada**. Cuando el disolvente se halla en menor cantidad con respecto a otra solución. Por ejemplo, la solución insaturada inicial de 50 g de sal (NaCl) y 250 mL de agua, es más concentrada que una solución formada por 50 g de NaCl y 400 mL de agua.
- **Diluida**. Cuando el disolvente se encuentra en mayor cantidad con respecto a otra solución, por ejemplo la solución anterior formada por 50 g de NaCl y 400 mL de agua es más diluida que la de 50 g de NaCl y 250 mL de agua.
- Para identificar cuál solución es concentrada o diluida sólo es necesario saber cuánto disolvente tiene una y cuánto tiene la otra. También se puede decir que una solución a la que se le agrega más disolvente que la original es una solución diluida y a la que se le elimina disolvente por evaporación se le llama concentrada. Como se puede ver, para clasificarlas en función de su concentración debemos comparar las soluciones con una que se tenga de muestra.

c) En función del tipo del soluto. En estas soluciones es necesario identificar si el soluto es un ácido, una base o una sal.

- **Solución ácida.** Un ácido es una sustancia donadora de iones hidrógeno (H^+), por lo que una solución ácida es aquella formada por un ácido y agua. Por ejemplo,

el ácido clorhídrico (HCl) en agua, el ácido sulfúrico (H_2SO_4) en agua o el ácido fosfórico (H_3PO_4) en agua.

- **Solución básica**. Una base es una sustancia donadora de iones oxhidrilo (OH^-), de esta manera una solución básica es aquella formada por una base y agua. Por ejemplo, hidróxido de sodio (NaOH), hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) o hidróxido de aluminio $Al(OH)_3$, cada una de ellas en agua.

- **Solución neutra**. Es la solución formada por una sal y agua. Un ejemplo es la salmuera, la cual está formada por cloruro de sodio (NaCl) y agua. Por lo regular, las soluciones neutras se obtienen de la reacción de neutralización entre un ácido y una base, donde el ácido dona el ion H^+ y la base el ion OH^- para formar la molécula de agua, los iones restantes del ácido y de la base forman la molécula de sal de la siguiente manera:

$$NaOH + HCl \longrightarrow NaCl + H_2O$$

Si la queremos ver como una reacción iónica ocurriría de la siguiente manera:

$$Na^+OH^- + H^+Cl^- \longrightarrow Na^+Cl^- + H^+OH^-$$

Como se puede observar, la sal formada (NaCl), o cloruro de sodio, carece de iones hidrógeno y de iones oxhidrilo que donar. Sin embargo, de acuerdo con las cargas de cada ion se puede intercambiar un ion Na^+ por un ion H^+ para formar el ácido clorhídrico (HCl) y, por otro lado, se puede intercambiar un ion Cl^- por un ion OH^-, con lo cual se formaría el hidróxido de sodio (NaOH).

Otros ejemplos de soluciones son las aleaciones; algunas se muestran en la tabla 10.2.

Tabla 10.2. Algunos tipos de soluciones según la cantidad de soluto que contienen.

Nombre	Característica
Saturada	Contiene tanto soluto disuelto como puede contener el disolvente.
Sobresaturada	Rebasa el límite de solubilidad del soluto, habiendo una precipitación del soluto, si se agita, pero si se calienta desaparece el precipitado y se forma la solución.
Diluida	El soluto incluido está en una cantidad menor a la del límite de solubilidad.

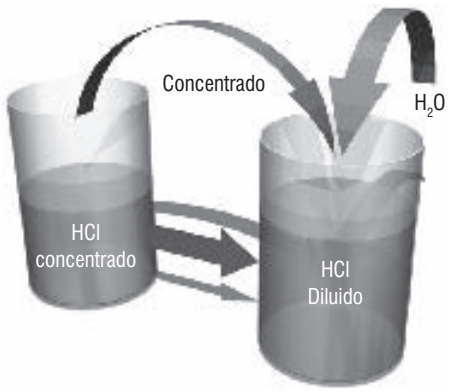


Figura 10.2 *Formación de solución diluida a partir de una solución ácida concentrada.*

Estado de agregación	Solución
Sólido	Sólido-sólido: aleaciones de zinc y estaño obteniéndose latón Sólido-gas: hidrógeno en paladio Sólido- líquido: mercurio en plata formándose una amalgama
Líquido	Líquido-líquido: alcohol en agua Líquido-sólido: sal en agua (salmuera) Líquido-gas: oxígeno en agua
Gas	Gas-gas: oxígeno en nitrógeno Gas-líquido: bióxido de carbono en agua, en los refrescos Gas-sólido: hidrógeno adsorbido sobre la superficie de Ni, Pd, Pt

10.4 Concentración en las soluciones

En el caso de las soluciones, la concentración es la relación que existe entre el soluto y el disolvente. En general, las formas de expresar la concentración de las soluciones son las siguientes:

a) **Fracción peso** ($\overline{x}_i$): es la relación en masa del soluto, o el disolvente, con la masa de la solución:

$$\overline{x}_{\text{soluto}} = \frac{m_{\text{soluto}}}{m_{\text{solución}}}$$

$$\overline{x}_{\text{disolvente}} = \frac{m_{\text{disolvente}}}{m_{\text{solución}}}$$

Donde la masa de la solución es la suma de las masas del soluto y el disolvente:

$$m_{\text{solución}} = m_{\text{disolvente}} + m_{\text{soluto}}$$

b) **Fracción mol (x)**: es la relación en moles del soluto o el disolvente con los moles de la solución:

$$x_{\text{soluto}} = \frac{n_{\text{soluto}}}{n_{\text{solución}}}$$

$$x_{\text{disolvente}} = \frac{n_{\text{disolvente}}}{n_{\text{solución}}}$$

donde n de la solución es la suma de los moles del soluto y el disolvente:

$$n_{\text{solución}} = n_{\text{disolvente}} + n_{\text{soluto}}$$

Recuérdese que n es el número de moles, el cual es la relación entre la masa de la sustancia (soluto o disolvente) y el peso molecular de la misma, por lo que:

$$n_{\text{soluto}} = \frac{m_{\text{soluto}}}{PM_{\text{soluto}}}$$

$$n_{\text{disolvente}} = \frac{m_{\text{disolvente}}}{PM_{\text{disolvente}}}$$

Como se sabe, en las mezclas de gases existe una relación entre la masa total de la mezcla y el peso molecular promedio de la mezcla; sin embargo, en el caso de las

soluciones líquidas no existe esta relación, por lo que el número de moles de la solución sólo se puede obtener sumando los moles tanto del soluto como del disolvente, ya que el peso molecular promedio es definido sólo para mezclas de gases y no de líquidos ni sólidos.

c) **Por ciento en peso (% peso)**: es la relación de la masa del soluto o el disolvente en el 100% que corresponde a la solución. De la misma manera, en los gases el por ciento en peso también equivale a la fracción peso del soluto, o del disolvente, por 100.

$$\%\,\text{peso}_{\text{soluto}} = \frac{m_{\text{soluto}}}{m_{\text{solución}}} \times 100 = \overline{x}_{\text{soluto}} \times 100$$

$$\%\,\text{peso}_{\text{solvente}} = \frac{m_{\text{disolvente}}}{m_{\text{solución}}} \times 100 = \overline{x}_{\text{disolvente}} \times 100$$

d) **Por ciento mol (% mol)**: al igual que el por ciento en peso, el % mol es la relación de los moles de soluto, o del disolvente, por el 100% de los moles de la solución, o el producto de su fracción mol por 100.

$$\%\,\text{mol}_{\text{soluto}} = \frac{n_{\text{soluto}}}{n_{\text{solución}}} \times 100 = x_{\text{soluto}} \times 100$$

$$\%\,\text{mol}_{\text{disolvente}} = \frac{n_{\text{disolvente}}}{n_{\text{solución}}} \times 100 = x_{\text{disolvente}} \times 100$$

e) **Molaridad (M)**: es la relación del número de moles del soluto disuelto en un volumen, expresado en litros, de solución:

$$M = \frac{n_{\text{soluto}}}{V_{\text{solucion}}(L)} = \frac{\text{mol}}{L}$$

Sus unidades dimensionales son mol/L. Si se requiere saber el volumen de la solución y se conoce el número de moles de soluto y la molaridad, el volumen se puede despejar de la ecuación como sigue:

$$V_{\text{solución}}(L) = \frac{n_{\text{soluto}}}{M} = \frac{\cancel{\text{mol}}}{\frac{\cancel{\text{mol}}}{L}} = L$$

De la misma manera, se puede despejar el número de moles del soluto:

$$n_{\text{soluto}} = M \times V_{\text{solución}}(L) = \frac{\text{mol}}{L} \times L = \text{mol}$$

Tabla 10.3. Ejemplos de cantidad de sustancia para preparar soluciones M, M/2 (0,5 M) y M/3 (0,33 M).

Sustancia	Peso molecular (g/mol)	Gramos de soluto por litro		
		1 M	0,5 M	0,33 M
HCl	36,5	36,5	18,25	12,17
H_2SO_4	98	98	49	32,67
H_3PO_4	98	98	49	32,67
NaOH	40	40	20	13,33

f) **Normalidad (N)**: es la relación entre el número de equivalentes gramo de soluto disueltos en un volumen, expresado en litros, de la solución:

$$N = \frac{Eq_{soluto}}{V_{solución}(L)} = \frac{Eq}{L}$$

Para poder determinar la normalidad de una solución es necesario definir el número de equivalentes gramo, que es la relación que existe entre la masa de un soluto y el peso equivalente del mismo.

$$Eq_{soluto} = \frac{m_{soluto}}{PE_{soluto}} = \frac{g}{\frac{g}{Eq}} = Eq$$

Como puede observarse, hace falta definir el peso equivalente para poder determinar el equivalente gramo. El peso equivalente es la relación entre el peso molecular del soluto y su valencia:

$$PE_{soluto} = \frac{PM_{soluto}}{Z} = \frac{\frac{g}{mol}}{\frac{Eq}{mol}} = \frac{g}{Eq}$$

Donde PM es el peso molecular del soluto y Z su valencia (poder de combinación de un elemento, compuesto o radical con otra sustancia). Para entender qué es la valencia y cómo se determina, se debe empezar por su definición; valencia es el número de equivalentes de un elemento o compuesto presente en un mol de compuesto.

$$Z\ (\text{valencia}) = \frac{\text{Equivalente}}{\text{mol}} = \frac{Eq}{\text{mol}}$$

En el caso del soluto, éste es el número de equivalentes gramo de soluto por cada mol del soluto.

$$Z_{soluto} = \frac{Eq_{soluto}}{\text{mol soluto}} = \frac{Eq}{\text{mol}}$$

Como el soluto de una solución puede ser una sustancia ácida, una sustancia básica o una sal, será necesario aplicar la definición anterior a las sustancias mencionadas. Para un ácido, que es una sustancia donadora de protones, su valencia será el número de protones H^+ que done. Por ejemplo:

- HCl tiene un H^+ para donar, su valencia = 1
- H_2SO_4 tiene dos H^+ para donar, su valencia = 2
- H_3PO_4 tiene tres H^+ para donar, su valencia = 3

En el caso de las bases, que son sustancias donadoras de oxhidrilos (OH^-), su valencia será el número de oxhidrilos que done. Por ejemplo:

- NaOH tiene un OH^- para donar, su valencia = 1
- $Ca(OH)_2$ tiene dos OH^- para donar, su valencia = 2
- $Mn(OH)_3$ tiene tres OH^- para donar, su valencia = 3

Para las sales, sustancias que carecen de H^+ y OH^-, se debe preguntar cuántos iones Na^+ podrían ser sustituidos por H^+ en la fórmula, y este número será la valencia de la sal, por ejemplo:

- NaCl: el ion Na^+ tiene una carga positiva, como el H^+, por lo cual sólo se puede sustituir un Na^+ por un H^+, esto indica que su valencia es igual a uno. De la misma manera ocurriría con el OH^-, ya que el ion cloro Cl^- tiene una carga negativa igual al OH^-, por lo cual sólo puede sustituirse un Cl^- por un OH^- y su valencia será = 1.

  De tal forma que si se sustituye un ion H^+ por el ion Na^+ se formará el HCl o el ácido clorhídrico. Si se sustituye el ion OH^+ por el ion Cl^- se formará el NaOH o hidróxido de sodio, el cual es una base.

  Ocurriría lo mismo con los otros ejemplos mencionados en los ácidos y las bases.

- $CaSO_4$, sulfato de calcio: $Ca^{+2}\ SO_4^{-2}$, tiene en su fórmula un ion calcio con dos cargas positivas, por lo que para sustituirlo por iones H^+ se necesitan dos iones H^+, por tanto su valencia sería 2; sucedería lo mismo con el ion sulfato que tiene dos cargas negativas, por lo que se necesitarían dos iones OH^- para poder sustituirlo, por lo cual su valencia sería 2. Entonces, se formarían el ácido sulfúrico (H_2SO_4) y el hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$).

El número de valencia de cada elemento se puede encontrar en la tabla periódica de los elementos y para los radicales será necesario consultar las tablas correspondientes.

Por medio de una ecuación de neutralización es posible darse cuenta de que la reacción entre un ácido y una base es un intercambio iónico. Ejemplo:

$$NaOH + HCl \longrightarrow NaCl + H_2O$$

Recordemos que:

$$HCl \longrightarrow H^+ + Cl^-$$
$$NaOH \longrightarrow Na^+ + OH^-$$
$$H_2O \longrightarrow H^+ + OH^-$$

Para el segundo ejemplo:

$$H_2SO_4 + Ca(OH)_2 \longrightarrow CaSO_4 + 2H_2O$$

$$H_2SO_4 \longrightarrow 2H^+ + SO_4^{-2}$$
$$Ca(OH)_2 \longrightarrow Ca^{+2} + 2OH^-$$
$$2H_2O \longrightarrow 2H^+ + 2OH^-$$

Así pues, para determinar la valencia en el caso de sustancias ácidas, básicas y sales, se sustituyen las fórmulas correspondientes en la ecuación general de normalidad.

$$N = \frac{Eq_{soluto}}{V_{solución}} = \frac{\frac{m_{soluto}}{PE_{soluto}}}{V_{solución}} = \frac{\frac{m_{soluto}}{\frac{PM_{soluto}}{Z}}}{V_{solución}(L)} = \frac{\frac{m_{soluto} \times Z}{PM_{soluto}}}{V_{solución}(L)} = \frac{n_{soluto} \times Z}{V_{solución}(L)}$$

$$N = M \times Z$$

Aplicando la fórmula se ha encontrado la ecuación anterior, que relaciona con facilidad la normalidad con la molaridad. Esta ecuación será de mucha utilidad para poder resolver problemas.

Recuérdese que:

$$n_{\text{soluto}} = \frac{m_{\text{soluto}}}{PM_{\text{soluto}}}, \quad M = \frac{n_{\text{soluto}}}{V_{\text{solución}}(L)}$$

$$Eq = \frac{m_{\text{soluto}}}{PE_{\text{soluto}}}, \quad PE_{\text{soluto}} = \frac{PM_{\text{soluto}}}{Z}$$

g) **Molalidad (m)**: es la relación entre el número de moles del soluto y la masa del disolvente expresada en kilogramos.

$$m = \frac{n_{\text{soluto}}}{\text{kg}_{\text{disolvente}}} = \frac{\text{mol}}{\text{kg}}$$

Para determinar la molalidad, sólo necesitamos establecer el número de moles del soluto con la fórmula correspondiente y recordar que la masa del disolvente está relacionada con la masa de la solución y la masa del soluto de la siguiente manera.

$$n_{\text{soluto}} = \frac{m_{\text{soluto}}}{PM_{\text{soluto}}} = \frac{\text{g}}{\frac{\text{g}}{\text{mol}}} = \text{mol}$$

$$m_{\text{solución}} = m_{\text{disolvente}} + m_{\text{soluto}}$$

Por tanto $$m_{\text{disolvente}} = m_{\text{solución}} - m_{\text{soluto}}$$

y al hacer la conversión:

$$m_{\text{disolvente}}\,(\text{g})\left|\frac{1\text{ kg}}{1000\text{ g}}\right| = m_{\text{disolvente}}\,(\text{kg})$$

En las soluciones acuosas, formadas por un soluto (sólido) disuelto en el disolvente (agua), el sólido no representa un volumen significativo respecto al volumen de la solución, por lo cual se puede considerar que el volumen de la solución corresponde al volumen del disolvente (agua); de esta manera, podemos decir que:

$$V_{\text{solución}} = V_{\text{disolvente}}$$

Y como el disolvente es agua, utilizando su densidad:

$$\rho = \frac{m_{H_2O}}{V_{H_2O}} = 1\frac{\text{g}}{\text{mL}}$$

Es posible obtener la masa del disolvente por un simple despeje, de esta forma se tiene:

$$m_{H_2O} = m_{\text{disolvente}} = \rho_{H_2O} \times V_{H_2O} = \rho_{H_2O} \times V_{\text{solución}}$$

Transformando la masa a kilogramos se puede calcular la molalidad de la solución deseada.

Tabla 10.4. Composición de algunos reactivos concentrados comunes.

Reactivo	Fórmula	Peso molecular g/mol	% Masa	Densidad (g/mL)	Molaridad mol/L
Ácido acético	CH_3CO_2OH $HC_2H_3O_2$	60,05	100	1,05	17,5
Ácido clorhídrico	HCl	36,46	37	1,18	12,0
Ácido nítrico	HNO_3	63,01	70	1,42	15,8
Ácido fosfórico	H_3PO_4	98,00	85	1,70	14,7
Ácido sulfúrico	H_2SO_4	98,07	96	1,84	18,0
Amoniaco	NH_3	17,03	28	0,90	14,8

Una manera de resumir estas expresiones se presenta en la tabla 10.5:

Tabla 10.5. Unidades para expresar la concentración de una solución.

Nombre	Definición	Unidades usadas con más frecuencia	Propiedad de una cantidad medida de solución, cuando se suministra
Por ciento en peso	Unidades de peso de soluto contenidas en 100 unidades de peso de solución	*Gramos de soluto* 100 g de solución	Peso de solución
Concentración en peso	Peso de soluto contenido en una unidad de volumen de solución	*Gramos de soluto* Litro de solución	Volumen de solución
Molaridad (M)	Número de moles de soluto contenidos en 1 L de solución	*Moles de soluto* Litro de solución	Volumen de solución
Normalidad (N)	Número de equivalentes gramo de soluto contenidos en un litro de solución	*Equivalentes gramo de soluto* Litro de solución	Volumen de solución
Molalidad (m)	Número de moles de soluto contenidos por kilogramo de disolvente	*Moles de soluto* Kilogramo de disolvente	Peso de solución

Antes de abordar la metodología para resolver problemas de soluciones, es necesario puntualizar algunos aspectos:

1. **Densidad de una solución.** Es la relación entre la masa de la solución y su volumen.

$$\rho_{\text{solución}} = \frac{m_{\text{solución}}}{V_{\text{solución}}} = \frac{\text{g}}{\text{mL}}$$

Recordando que:

$$m_{\text{solución}} = m_{\text{soluto}} + m_{\text{disolvente}}$$
$$V_{\text{solución}} = V_{\text{soluto}} + V_{\text{disolvente}}$$

2. **Densidad del soluto.** Es la relación entre la masa del soluto y su volumen:

$$\rho_{\text{soluto}} = \frac{m_{\text{soluto}}}{V_{\text{soluto}}} = \frac{\text{g}}{\text{mL}}$$

3. **Densidad del disolvente.** Es la relación entre la masa del disolvente y su volumen:

$$\rho_{\text{disolvente}} = \frac{m_{\text{disolvente}}}{V_{\text{disolvente}}} = \frac{\text{g}}{\text{mL}}$$

4. Las densidades del soluto y el disolvente no se pueden sumar para obtener la densidad de la solución:

$$\rho_{\text{solución}} \neq \rho_{\text{disolvente}} + \rho_{\text{soluto}}$$

5. En caso de que el soluto sea sólido y el disolvente sea agua, se podrá decir que:

$$V_{\text{solución}} = V_{\text{disolvente}} = V_{H_2O}$$

6. En el caso de soluciones en las que el soluto sea líquido, no puede aplicarse esa consideración. Por tanto, se deberá obtener el volumen de la siguiente manera:

$$V_{\text{solución}} = V_{\text{disolvente}} + V_{\text{soluto}}$$

10.5 Metodología para resolver problemas de formación de soluciones

1. Leer el problema.
2. Analizar el problema.
3. Generar el diagrama donde se contemplen todos los datos del problema, incluyendo sus unidades dimensionales.
4. Anotar las fórmulas y los despejes correspondientes.
5. Resolver las preguntas del problema.

Ejemplo 1

Se agregan 200 g de cloruro de sodio (NaCl) a 500 mL de agua; se encuentra que la densidad de la mezcla es de 1,40 g/mL. Determine para la solución formada:

a) Molaridad.

b) Normalidad.

c) Molalidad.

d) Fracción peso.

e) Fracción mol.

f) % peso.

g) % mol.

Para solucionar el problema propuesto se sugiere seguir los pasos utilizados en las metodologías anteriores.

1. Leer el problema

Por medio de esta lectura es posible darse cuenta de que se requiere determinar todas las formas de expresión de las soluciones al agregar una cantidad de sal al agua.

2. Analizar el problema

En este análisis se observa que se trata de una solución acuosa formada por 200 g de NaCl, cantidad que se agrega a 500 mL de agua. Al tener la masa del cloruro de sodio y conociendo su peso molecular se puede obtener el número de moles del soluto; al transformar el volumen de agua a litros y recordando que cuando se trata de un soluto sólido disuelto en agua, el volumen de la solución es igual al volumen del disolvente, es posible determinar el inciso a) (molaridad).

Para resolver el inciso b) que se refiere a la normalidad, se sabe que el NaCl tiene un solo ion Na+ que se puede intercambiar por un ion H+, por lo que se deduce que la valencia de la sal es 1 y como $N = M \times Z$, en este caso, resolviendo el inciso a) quedaría resuelto también el inciso b).

Para el inciso c) que se refiere a la molalidad, se conoce n_{soluto} y la masa del disolvente en kilogramos, por lo que la pregunta se responde utilizando $m_{disolvente} = \rho_{disolvente} \times V_{disolvente}$ y transformando 1 kilogramo = 1 000 g.

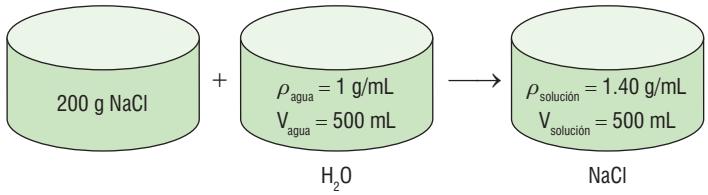
Para el inciso d) que se refiere a la fracción peso, ya se conocen la masa del soluto y la masa del disolvente; por tanto, ya se conoce la masa de la solución, por lo cual $x_{soluto} = m_{soluto}/m_{solución}$. Recuérdese que $m_{solución} = m_{soluto} + m_{disolvente}$.

Para el inciso e) que se refiere a la fracción mol, se determinará el número de moles de agua: $n_{disolvente} = m_{disolvente}/PM_{disolvente}$; al número obtenido se le sumará el número de moles del soluto, para obtener el número de moles de la solución $n_{solución} = n_{soluto} + n_{disolvente}$. Con esos datos se determinará la fracción mol $x_{soluto} = n_{soluto}/n_{solución}$.

Para el inciso f) que se refiere al % peso, lo único que se tiene que hacer es aplicar la fórmula: % peso $= \bar{x}_{soluto} \times 100$.

Para el inciso g) que se refiere al % mol, sólo aplicamos la fórmula % mol $= x_{soluto} \times 100$ y con este último resultado se tendrá resuelto el problema.

3. Generar un diagrama donde se consideren todos los datos del problema, incluyendo sus unidades dimensionales.



a) $M = ?$
b) $N = ?$
c) $m = ?$
d) $\bar{x}_{NaCl} = ?$
e) $x_{NaCl} = ?$
f) % peso = ?
g) % mol = ?

4. Anotar todas las fórmulas y los despejes correspondientes:

NaCl	+	H_2O	$\longrightarrow$	NaCl
$m = 200$ g		$\rho = 1$ g/mL		$\rho = 1{,}4$ g/mL
		$V = 500$ mL		a) $M = ?$
				b) $N = ?$
				c) $m = ?$
				d) $\bar{x}_{NaCl} = ?$
				e) $x_{NaCl} = ?$
				f) % peso$_{NaCl} = ?$
				g) % mol$_{NaCl} = ?$
				$V = 500$ mL

a)
$$n_{NaCl} = \frac{m_{NaCl}}{PM_{NaCl}} = \frac{200\text{ g}}{58{,}5\,\frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 3{,}42\text{ mol}$$

$$V_{solución} = 500\text{ mL}\left(\frac{1\text{ L}}{1\,000\text{ mL}}\right) = 0{,}5\text{ L}$$

$$M = \frac{N_{NaCl}}{V_{solución}(\text{L})} = \frac{3{,}42\text{ mol}}{0{,}5\text{ L}} = 6{,}84\,\frac{\text{mol}}{\text{L}} = 6{,}84M$$

b)
$$N = M \times Z = \left(6{,}84\,\frac{\text{mol}}{\text{L}}\right)\left(1\,\frac{Eq}{\text{mol}}\right) = 6{,}84\,\frac{Eq}{\text{L}} = 6{,}84\,N$$

c) Molalidad

$$m = \frac{n_{NaCl}}{\text{kg}_{H_2O}} = \frac{3{,}42\text{ mol}}{0{,}5\text{ kg}} = 6{,}84\,\frac{\text{mol}}{\text{kg}} = 8{,}84\,m$$

$$\rho_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{V_{H_2O}} \Rightarrow m_{H_2O} = \rho_{H_2O} \times V_{H_2O} = \left(1\,\frac{\text{g}}{\text{mL}}\right)(500\text{ mL}) = 500\text{ g}\left|\frac{1\text{ kg}}{1\,000\text{ g}}\right|$$

Entonces:

$$m_{H_2O} = m_{disolvente} = 0{,}5\text{ kg}$$

d) Fracción peso

$$\bar{x}_{NaCl} = \frac{m_{NaCl}}{m_{solución}} = \frac{200\text{ g}}{700\text{ g}} = 0{,}2875$$

$$m_{solución} = m_{NaCl} + m_{H_2O} = 200\text{ g} + 500\text{ g} = 700\text{ g}$$

e) Fracción mol

$$x_{NaCl} = \frac{n_{NaCl}}{n_{solución}} = \frac{3{,}42\text{ mol}}{31{,}2\text{ mol}} = 0{,}1096$$

$$n_{\text{solución}} = n_{\text{NaCl}} + n_{H_2O} = 3{,}42 \text{ mol} + 27{,}7 \text{ mol} = 31{,}2 \text{ mol}$$

$$n_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{PM_{H_2O}} = \frac{500 \text{ g}}{18 \dfrac{\text{g}}{\text{mol}}} = 27{,}78 \text{ mol}$$

f) $\%\ \text{peso} = \bar{x}_{\text{NaCl}} \times 100 = 0{,}2857 \times 100 = 28{,}57\%$

g) $\%\ \text{mol} = x_{\text{NaCl}} \times 100 = 0{,}1087 \times 100 = 10{,}96\%$

Como se puede observar, en los problemas de formación de soluciones sencillas es muy fácil determinar todas las formas de expresión de la concentración siguiendo esta metodología y aplicando las fórmulas correspondientes.

10.6 Mezclas de soluciones

Existen varias formas de expresar problemas relacionados con mezclas de soluciones. Éstas son las más importantes:

1. Mezclas de dos o más soluciones conocidas para formar otra con concentración desconocida.
2. Mezclas de dos o más soluciones conocidas para formar otra con concentración y volumen conocidos.
3. Mezclas de una o más soluciones conocidas, con agua, para formar una solución con concentración desconocida, pero volumen conocido.
4. Mezcla de una o más soluciones conocidas, con agua, para formar una solución con concentración conocida y volumen desconocido.
5. Eliminación de agua por evaporación para concentrar la solución hasta una concentración y un volumen conocido.
6. Neutralización de soluciones ácidas o básicas (mezcla de soluciones ácidas con básicas).

Antes de analizar cada una de estas mezclas, es necesario establecer fórmulas que permitan resolver los problemas con facilidad.

Lo primero que debe plantearse es que todo lo que entra en un sistema debe ser igual a lo que sale; es decir, primero debe asimilarse y comprenderse la idea del balance de masa que se ha estado manejando en las mezclas tanto de gases como de líquidos, cuando se afirma que la suma de la masa de los componentes es igual a la masa total. En el caso de las soluciones, se debe pensar que la suma de la masa de los componentes, es decir, que la mezcla, debe ser igual a la masa de la solución total; o cambiar lo mismo cuando se suma la masa de las soluciones para formar otra, con este criterio es posible, generalmente, hacer un balance de masa en función de la concentración.

$$M_1V_1 + M_2V_2 = M_3V_3$$

En función del análisis de cada ecuación, se podrá aproximar más a la comprobación del balance.

$$\frac{\text{mol}_1}{L_1}(L_1) + \frac{\text{mol}_2}{L_2}(L_2) = \frac{\text{mol}_3}{L_3}(L_3)$$

Al hacer el análisis, se obtiene:

$$\text{mol}_{\text{soluto}_1} + \text{mol}_{\text{soluto}_2} = \text{mol}_{\text{soluto}_3}$$

Recuérdese que está en función del número de moles de soluto presentes en la solución. Si las dos soluciones tienen el mismo soluto:

$$\frac{m_{\text{soluto}_1}}{PM_{\text{soluto}}} + \frac{m_{\text{soluto}_2}}{PM_{\text{soluto}}} = \frac{m_{\text{soluto}_3}}{PM_{\text{soluto}}}$$

Como el *PM*, no cambia, se suprime en la fórmula, de tal forma que:

$$m_{\text{soluto}_1} + m_{\text{soluto}_2} = m_{\text{soluto}_3}$$

en unidades dimensionales

$$\frac{\text{g}_{\text{soluto1}}}{\text{g/mol}_{\text{soluto}}} + \frac{\text{g}_{\text{soluto2}}}{\text{g/mol}_{\text{soluto}}} = \frac{\text{g}_{\text{soluto3}}}{\text{g/mol}_{\text{soluto}}}$$

$$\text{g}_{\text{soluto}_1} + \text{g}_{\text{soluto}_2} = \text{g}_{\text{soluto}_3}$$

Entonces, se puede decir que la suma de las masas de soluto que están contenidas en las soluciones uno y dos será igual a la masa del soluto en la solución tres. De esta manera, se confirma que la ley de la conservación de la masa se cumple; lo mismo ocurre con el disolvente, por lo que:

$$m_{\text{disolvente}_1} + m_{\text{disolvente}_2} = m_{\text{disolvente}_3}$$

$$n_{\text{disolvente}_1} + n_{\text{disolvente}_2} = n_{\text{disolvente}_3}$$

De la misma manera, para toda solución obtenida por la mezcla de dos soluciones:

$$m_{\text{solución}_1} + m_{\text{solución}_2} = m_{\text{solución}_3}$$

$$n_{\text{solución}_1} + n_{\text{solución}_2} = n_{\text{solución}_3}$$

Este mismo proceso se presenta cuando se mezclan más de dos soluciones. Se debe tomar en cuenta que la densidad no es una propiedad aditiva, por lo que la densidad de una mezcla de soluciones debe determinarse de la siguiente manera:

$$\rho_{\text{solución}_3} = \frac{m_{\text{solución}_3}}{V_{\text{solución}_3}} = \frac{m_{\text{solución}_1} + m_{\text{solución}_2}}{V_{\text{solución}_1} + V_{\text{solución}_2}} = \frac{\text{g}}{\text{mL}} = \frac{\text{kg}}{\text{L}}$$

Como se puede observar, los volúmenes de las soluciones se suman para conocer el volumen de la solución resultante:

$$V_{\text{solución}_1} + V_{\text{solución}_2} = V_{\text{solución}_3}$$

Otra fórmula que es de gran ayuda en la resolución de problemas de mezclas de soluciones es la siguiente:

$$M = \left(\bar{x}_{\text{soluto}}\right)\left(\rho_{\text{solución}}\right)\left\{\frac{1}{PM_{\text{soluto}}}\right\}\left(1\,000\right)$$

En seguida se analizará esta fórmula dimensionalmente:

$$M = \left(\frac{\text{g}}{\text{g}}\right)\left(\frac{\text{g}}{\text{mL}}\right)\left(\frac{\text{mol}}{\text{g}}\right)\left(\frac{\text{mL}}{\text{L}}\right) = \frac{\text{mol}}{\text{L}}$$

Con lo cual se confirma que dimensionalmente esta expresión es correcta. Esta fórmula surge de la resolución de un problema sencillo. Por ejemplo, determinar la molaridad de una solución que contiene 30% peso de HCl (ácido clorhídrico) con una densidad de 1,03 g/mL y un volumen de un litro.

Sabemos que la masa de la solución se despeja de la densidad así:

$$\rho_{\text{solución}} = \frac{m_{\text{solución}}}{V_{\text{solución}}}$$

entonces

$$m_{\text{solución}} = \rho_{\text{solución}} \times V_{\text{solución}} = \left|1{,}03\ \frac{\text{g}}{\text{mL}}\right| 1\ \text{L} \left|\frac{1\,000\ \text{mL}}{\text{L}}\right| = 1\,030\ \text{g}$$

Aplicando la fórmula de % peso:

$$\%\text{peso} = \frac{m_{\text{soluto}}}{m_{\text{solución}}} \times 100$$

entonces

$$m_{\text{soluto}} = \frac{m_{\text{solución}} \times \%\ \text{peso}}{100\%\ \text{peso}} = \frac{(1\,030\ \text{g})(30\%\ \text{peso})}{100\%\ \text{peso}} = 309\ \text{g}$$

Utilizando la fórmula del número de moles:

$$n_{\text{soluto}} = \frac{m_{\text{soluto}}}{PM_{\text{soluto}}} = \frac{30{,}9\ \text{g}}{36{,}5\ \frac{\text{g}}{\text{mL}}} = 8{,}466\ \text{mol}$$

Aplicando la fórmula de molaridad se tiene:

$$M = \frac{n_{\text{soluto}}}{V_{\text{solución}}} = \frac{8{,}46\ \text{mol}}{1\ \text{L}} = 8{,}466\ \frac{\text{mol}}{\text{L}}$$

Este procedimiento es largo; ahora se resolverá el mismo problema aplicando la fórmula:

$$M = (0{,}30)\left(1{,}03\ \frac{\text{g}}{\text{mL}}\right)\left(\frac{\text{mol}}{36{,}5\ \text{g}}\right)\left(\frac{1\,000\ \text{mL}}{\text{L}}\right) = 8{,}466\ \frac{\text{mol}}{\text{L}}$$

El resultado es exactamente igual, por lo que se podrá usar esta fórmula con toda confianza.

Una vez analizadas estas fórmulas, se estudiará cada caso para la mezcla de soluciones.

10.6.1 Mezcla de dos o más soluciones conocidas para formar otra de concentración desconocida

Para este tipo de mezclas basta con sumar los volúmenes que se van a mezclar para obtener el volumen de la solución final.

$$V_1 + V_2 = V_3$$

y aplicar el balance de materia correspondiente:

$$M_1V_1 + M_2V_2 = M_3V_3$$

Como ya se conocen todos los datos, excepto la molaridad 3, se le deberá despejar para obtener la concentración final.

$$M_3 = \frac{M_1V_1 + M_2V_2}{V_3}$$

10.6.2 Mezclar dos o más soluciones conocidas para formar otra con concentración y volumen conocido

En este caso se conocen los volúmenes de las soluciones conocidas, pero no se sabe qué cantidad de cada una se tiene que agregar, por lo que se genera la siguiente ecuación:

$$V_1 + V_2 = V_3 \qquad 1$$

$$M_1V_1 + M_2V_2 = M_3V_3 \qquad 2$$

Como se conocen las tres concentraciones y el volumen 3, se tienen dos ecuaciones con dos incógnitas, por lo que se debe despejar el volumen 1 de la primera ecuación y sustituirlo en la segunda:

$$V_1 = V_3 - V_2$$

$$M_1(V_3 - V_2) + M_2V_2 = M_3V_3$$

$$M_1V_3 - M_1V_2 + M_2V_2 = M_3V_3$$

$$V_2(M_2 - M_1) = M_3V_3 - M_1V_3$$

$$V_2(M_2 - M_1) = V_3(M_3 - M_1)$$

$$V_2 = \frac{V_3\left(M_3 - M_1\right)}{\left(M_2 - M_1\right)}$$

Al sustituir los valores es posible determinar el volumen de la solución 2 y con éste se puede calcular el volumen de la solución 1.

$$V_1 = V_3 - V_2$$

10.6.3 Mezcla de una o más soluciones conocidas, con agua, para formar una solución de concentración desconocida pero volumen conocido

Como se conoce el volumen 3, se deben generar las ecuaciones correspondientes de balance de volumen y masa:

$$V_1 + V_2 = V_3$$

$$M_1V_1 + M_2V_2 = M_3V_3$$

En este caso, como la mezcla es con agua que es sólo el disolvente sin soluto, es decir cuya concentración es cero, se tiene que:

$$M_2 = 0$$

Entonces,

$$M_1V_1 = M_3V_3$$

Se despeja la M_3:

$$M_3 = \frac{M_1V_1}{V_3}$$

De esta manera, se determina la concentración de la solución 3.

10.6.4 Mezcla de una o más soluciones conocidas para formar otra con concentración conocida y volumen desconocido

En este caso se conocen los volúmenes de las soluciones disponibles, pero se desconoce cuánto de cada solución se debe mezclar para formar la máxima cantidad de solución de concentración conocida. Por lo que primero se deberá suponer que se agrega toda la cantidad disponible de la solución 1 y se generan los balances.

$$V_1 + V_2 = V_3 \qquad 1$$

$$M_1V_1 + M_2V_2 = M_3V_3 \qquad 2$$

Se tienen dos ecuaciones con dos incógnitas; como una de éstas es el volumen 3, simplemente se sustituye en la ecuación 2:

$$V_3 = V_1 + V_2$$

$$M_1V_1 + M_2V_2 = M_3(V_1 + V_2)$$

$$M_1V_1 + M_2V_2 = M_3V_1 + M_3V_2$$

Se factorizan dos de los volúmenes

$$V_2(M_2 - M_3) = V_1(M_3 - M_1)$$

entonces

$$V_2 = \frac{V_1(M_3 - M_1)}{(M_2 - M_1)}$$

Se sustituyen los valores y se determina el volumen 2. Como se conoce el volumen disponible, se compara y si es menor al volumen determinado, el volumen 3 que se obtuvo será el volumen máximo.

$$V_3 = V_{\text{máximo}} = V_1 + V_2$$

Pero si el volumen 2 (V_2) determinado es mayor al disponible, entonces se deberá hacer una segunda suposición. Supóngase ahora que se agrega todo el volumen 2 disponible para determinar el volumen 1.

$$V_1 + V_2 = V_3 \qquad 1$$

$$M_1V_1 + M_2V_2 = M_3V_3 \qquad 2$$

Sustituir V_3 en la ecuación 2, con lo que se tiene:

$$V_3 = V_1 + V_2$$

$$M_1V_1 + M_2V_2 = M_2(V_1 + V_2)$$

$$M_1V_1 + M_2V_2 = M_3V_1 + M_3V_2$$

Se factorizan dos de los volúmenes

$$V_1(M_1 - M_3) = V_2(M_3 - M_2)$$

entonces

$$V_2 = \frac{V_2(M_3 - M_1)}{(M_1 - M_3)}$$

Como en este caso el V_1 será menor al volumen disponible que el encontrado en la suposición anterior, el volumen máximo será:

$$V_3 = V_{\text{máximo}} = V_1 + V_2$$

10.6.5 Eliminación de agua por evaporación para concentrar la solución hasta una concentración y volumen conocidos

En este caso se trata de una solución diluida existente en la planta, por lo que se requiere otra concentración mayor y un volumen específico; como en los demás casos, se deberán generar los balances correspondientes.

$$V_1 + V_2 = V_3 \qquad 1$$

$$M_1V_1 + M_2V_2 = M_3V_3 \qquad 2$$

Recuérdese que como se está eliminando agua, la molaridad de la solución 2 (solvente solamente) es igual a cero; por tanto, se despeja el volumen 1 de la ecuación 2.

$$V_1 = \frac{M_3V_3}{M_1}$$

Al conocer este volumen, en forma inmediata se puede conocer el volumen de agua que debe ser evaporada para tener la solución de concentración 3:

$$V_2 = V_1 - V_3$$

10.6.6 Neutralización de soluciones ácidas básicas (mezcla de soluciones ácidas con básicas)

En este caso se debe neutralizar la solución ácida con una básica o una básica con una ácida para producir una sal y agua, la reacción generalizada es la siguiente:

$$AH + BOH \longrightarrow AB + H_2O$$

Donde:

AH: es el ácido
BOH: es la base
AB: es la sal formada

Para resolver este tipo de mezclas se requiere el siguiente balance de masa:

$$M_AV_A = M_BV_B$$

donde M_A: molaridad del ácido $= \dfrac{n_{\text{ácido}}}{V_{\text{ácido}}\ (\text{L})}$

V_A: volumen del ácido

M_B = molaridad de la base $= \dfrac{n_{\text{base}}}{V_{\text{base}}\ (\text{L})}$

V_B = volumen de la base

esto quiere decir que:

$$\left(\frac{n_{\text{ácido}}}{V_{\text{ácido}}\ (\text{L})}\right)V_{\text{ácido}} = \left(\frac{n_{\text{base}}}{V_{\text{base}}\ (\text{L})}\right)(V_{\text{base}})$$

$$n_{\text{ácido}} = n_{\text{base}}$$

$$\text{mol}_{\text{ácido}} = \text{mol}_{\text{base}}$$

De tal modo que si se requiere conocer el volumen necesario de ácido para neutralizar una base sólo se debe despejar de la ecuación:

$$V_A = \frac{M_B V_B}{M_A}$$

de la misma manera se determina el volumen de la base.

10.7 Metodología para resolver problemas de mezclas de soluciones

1. Leer el problema.
2. Analizar el problema.
3. Generar un diagrama en donde se incluyan todos los datos del problema, considerando las preguntas del mismo.
4. Determinar la molaridad de cada solución involucrada.
5. Generar los balances de volumen y masa para determinar todos los volúmenes y la molaridad de las soluciones.
6. Resolver las preguntas del problema.

10.8 Aplicación de la metodología en los diferentes tipos de soluciones

En seguida se estudiará con detenimiento la aplicación de la metodología para diferentes formas de mezclas de soluciones.

10.8.1 Mezcla de dos o más soluciones conocidas para formar otra con concentración desconocida

Supóngase que dispone de tres tanques con H_2SO_4; el primero contiene 8 000 L de solución de H_2SO_4 (ácido sulfúrico) al 25% peso y densidad de 1,20 g/mL; el segundo tanque contiene 2 000 L de solución 4,2 M de H_2SO_4 y el tercero contiene 4 000 L de solución 14 N de H_2SO_4.

Si se mezclaran todas las soluciones, ¿cuál sería la concentración molar de la solución resultante?

Solución:

1. Leer el problema.

Al leer el problema es posible darse cuenta de que se trata de tres soluciones de H_2SO_4 que se deben mezclar para formar una cuarta, y se pide la concentración molar de la solución 4.

2. Analizar el problema.

En la primera solución se dan el % peso, la densidad y el volumen; con estos datos y aplicando la fórmula:

$$M = \left(\overline{x}_{\text{soluto}}\right)\left(\rho_{\text{solución}}\right)\left(\frac{1}{PM_{\text{soluto}}}\right)\left(1\,000\right)$$

se puede determinar la molaridad de la solución 1.

Para la segunda solución se dan la molaridad y el volumen de solución, por lo que ya se conoce M_2.

Para la tercera solución se dan la normalidad y el volumen de la solución, por lo que se puede utilizar la fórmula:

$$N_3 = M_3 \times Z$$

En la que se despeja la molaridad:

$$M_3 = \frac{N_3}{Z}$$

Recuérdese que para este ácido, Z es igual a 2, ya que tiene $2H^+$ sustituibles en su fórmula; por tanto, ya se conoce M_3.

En seguida se generan los balances:

$$V_1 + V_2 + V_3 = V_4 \qquad 1$$

$$M_1V_1 + M_2V_2 + M_3V_3 = M_4V_4 \qquad 2$$

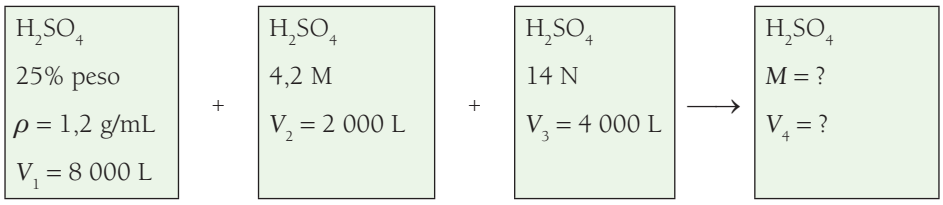
Como se conocen los datos de los volúmenes 1, 2 y 3, sumándolos ya se sabe también el volumen 4, por lo que la única incógnita en la ecuación 2 es M_4, que por despeje queda:

$$M_4 = \frac{M_1V_1 + M_2V_2 + M_3V_3}{V_4}$$

Ecuación que nos permite obtener el valor de M_4 y con esto dar respuesta a la pregunta del problema.

3. Generar un diagrama en donde se incluyan todos los datos del problema, considerando las preguntas del mismo.

Para generar un diagrama en problemas de soluciones se recomienda representar las soluciones en tanques donde se incluyan todos los valores de las variables que se conocen de cada solución.



Como se puede observar, el diagrama permite visualizar todos los datos de cada solución así como lo que pide el problema, esto facilita la resolución del mismo.

4. Determinar la molaridad de cada solución involucrada.

Como se indicó en el análisis, ahora se deberán determinar las molaridades de cada tanque, usando las fórmulas necesarias:

$$T_1 : M_1 = \left(\overline{x}_{\text{soluto}}\right)\left(\rho_{\text{solución}}\right)\left(\frac{1}{PM_{\text{soluto}}}\right)(1\,000) = \left|0,25\right|\left|\frac{1,2\text{ g}}{\text{mL}}\right|\left|\frac{\text{mol}}{98\text{ g}}\right|\left|\frac{1\,000\text{ mL}}{\text{L}}\right| = 3,06\,\frac{\text{mol}}{\text{L}}$$

T_2: $M_2 = 4.2$ M

T_3: $M_3 = \frac{N_3}{Z} = \frac{14}{2} = 7$ M

5. Generar los balances de volumen y masa para determinar los volúmenes y la molaridad de las soluciones.

$$V_1 + V_2 + V_3 = V_4 \quad (1)$$

$$M_1V_1 + M_2V_2 + M_3V_3 = M_4V_4 \quad (2)$$

Ahora se sustituirán los valores conocidos para resolver el problema y determinar todas las concentraciones y los volúmenes involucrados.

$$V_4 = (8\,000\text{ L}) + (2\,000\text{ L}) + (4\,000\text{ L}) = 14\,000\text{ L}$$

Se despeja M_4 de la ecuación 2, la cual está dada por:

$$M_4 = \frac{M_1V_1 + M_2V_2 + M_3V_3}{V_4}$$

Al sustituir los valores:

$$M_4 = \frac{(3{,}06\text{ M})(8\,000\text{ L}) + (4{,}2\text{ M})(2\,000\text{ L}) + (7\text{ M})(4\,000\text{ L})}{14\,000\text{ L}}$$

$M_4 = 4.35$ M

6. Resolver las preguntas del problema.

Como la única pregunta del problema es la molaridad del tanque, se puede dar la respuesta en forma inmediata:

$$M_4 = 4{,}35\text{ M}$$

10.8.2 Mezcla de dos o más soluciones conocidas para formar un volumen conocido, de otra concentración

Ejemplo 2

Se tienen dos tanques; el primero contiene 100 L de una solución de HNO_3 (ácido nítrico) al 40% peso y densidad de 1,2463 g/mL; el segundo contiene 300 L de solución de HNO_3 al 15% peso y densidad de 1,082 g/cm^3.

Se requiere conocer qué volumen de cada una de las soluciones se debe agregar a un tercer tanque para preparar 200 L de una solución de HNO_3 al 30% peso y densidad de 1,18 kg /L.

Solución:

1. Leer el problema.

En la lectura del problema es posible darse cuenta de que se dispone de dos soluciones y que se desea formar una tercera. Para cada solución se dan el % peso y la densidad, con lo cual se puede obtener la molaridad de todos los tanques y resolver el problema.

2. Analizar el problema.

En este problema se indican los volúmenes disponibles de las dos soluciones, sin embargo no se conoce cuál es el volumen que se debe agregar para formar los 200 L que se piden; por tanto, se piden los volúmenes 1 y 2; éstas son las incógnitas del problema, por lo que primero se deberán determinar las molaridades de todas las soluciones con la siguiente ecuación:

$$M = \left(\overline{x}_{\text{soluto}}\right)\left(\rho_{\text{solución}}\right)\left(\frac{1}{PM_{\text{soluto}}}\right)\left(1\,000\right)$$

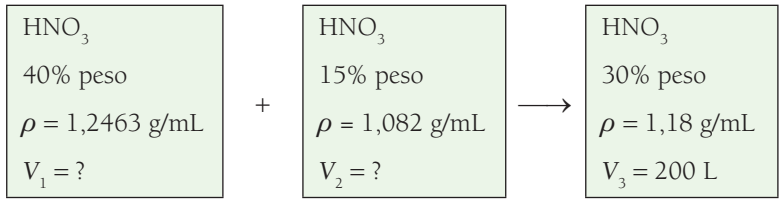
En seguida se debe generar el balance de volumen y masa:

$$V_1 + V_2 = V_3 \qquad 1$$

$$M_1V_1 + M_2V_2 = M_3V_3 \qquad 2$$

En este punto es posible darse cuenta de que se conoce todo menos los volúmenes 1 y 2, por lo que es necesario despejar V_1 en la ecuación 1 y sustituirlo en la ecuación 2:

3. Generar un diagrama donde se incluyan todos los datos del problema, considerando las preguntas del mismo.



T_1: $V = 100$ L $\qquad$ T_2: $V = 300$ L

Como se puede observar, para que no se confundan los volúmenes disponibles, éstos se indican afuera del tanque, dado que ese volumen no será el que se tenga que mezclar. Por esa razón, en el interior del tanque se coloca V_1 y V_2 y se indica que eso es lo que se tiene como incógnita.

4. Determinar la molaridad de cada solución involucrada.

$$T_1 : M_1 = \left(\overline{x}_{\text{soluto}}\right)\left(\rho_{\text{solución}}\right)\left(\frac{1}{PM_{\text{soluto}}}\right)\left(1\,000\right) = \left|0,40\right|\left|\frac{1,2463\ \text{g}}{\text{mL}}\right|\left|\frac{\text{mol}}{63\ \text{g}}\right|\left|\frac{1000\ \text{mL}}{\text{L}}\right| = 7,913\,\frac{\text{mol}}{\text{L}}$$

$$T_2 : M_2 = \left|0,15\right|\left|\frac{1,032\ \text{g}}{\text{cm}^3}\right|\left|\frac{\text{mol}}{63\ \text{g}}\right|\left|\frac{1\,000\ \text{mL}}{\text{L}}\right|\left|\frac{\text{cm}^3}{\text{mL}}\right| = 2,576\,\frac{\text{mol}}{\text{L}}$$

$$T_3 : M_3 = \left|0,30\right|\left|\frac{1,18\ \text{g}}{\text{cm}^3}\right|\left|\frac{\text{mol}}{63\ \text{g}}\right|\left|\frac{1\,000\ \text{mL}}{\text{L}}\right| = 5,619\,\frac{\text{mol}}{\text{L}}$$

5. Generar los balances de volumen y masa para determinar los volúmenes y la molaridad de las soluciones.

$$V_1 + V_2 = V_3 \qquad 1$$

$$M_1V_1 + M_2V_2 = M_3V_3 \qquad 2$$

Despejar V_1 de la ecuación 1 y sustituirlo en la ecuación 2:

$$V_1 = V_3 - V_2$$

$$M_1(V_3 - V_2) + M_2V_2 = M_3V_3$$

$$M_1V_3 - M_1V_2 + M_2V_2 = M_3V_3$$

Se factorizan dos de los volúmenes

$$V_2(M_2 - M_1) = V_3(M_3 - M_1)$$

entonces

$$V_2 = \frac{V_3(M_3 - M_1)}{(M_2 - M_1)}$$

Al sustituir los valores:

$$V_2 = \frac{(200\ \text{L})(5{,}619\ \text{M} - 7{,}913\ \text{M})}{(2{,}576\ \text{M} - 7{,}913\ \text{M})} = 85{,}966\ \text{L}$$

A continuación se deberá determinar el volumen 1:

$$V_1 = V_3 - V_2 = 200\ \text{L} - 85{,}966\ \text{L} = 114{,}034\ \text{L}$$

6. Resolver las preguntas del problema.

Como sólo hay una pregunta, se le da respuesta de forma inmediata: se deben agregar 114,034 L de solución de HNO_3 al 40% peso y 85,966 L de solución de HNO_3 al 15% peso para formar 200 L de una solución de HNO_3 al 30% peso.

10.8.3 Mezcla de una o más soluciones conocidas con agua para formar una solución de concentración desconocida, pero volumen conocido

Ejemplo 3

Supóngase que se tiene una solución de NaOH (hidróxido de sodio) al 12% peso, cuya densidad es 1,05 g/mL, que se encuentra almacenada en un tanque cilíndrico de 2 m de diámetro y 1,5 m de altura, ocupando 54% del volumen de la capacidad total del tanque. Por un error se le agregó agua destilada en tal cantidad que ahora el volumen de la solución es de 63% de la capacidad del tanque. Determinar la *M* y la *N* de la solución, después de haber agregado el disolvente.

Solución:

1. Leer el problema.

Al leer el problema se observa que el volumen de cada una de las soluciones está dado en función de los porcentajes que ocupan de la capacidad del tanque, por lo que se requiere determinar el volumen del tanque para saber cuál es el volumen de cada solución. Por otro lado, sólo se conocen los datos de % peso y la densidad del tanque inicial, pero se pide la concentración de la solución resultante.

2. Analizar el problema.

En primer lugar se debe determinar el volumen total del tanque. Dado que se trata de un tanque cilíndrico, se recurrirá a la fórmula siguiente para determinar su volumen.

$$V = \pi r^2 h$$

Como se conoce el diámetro del tanque, se deberá utilizar la siguiente fórmula:

$$D = 2r$$

Donde **D** es igual al diámetro del tanque y **r** es el radio, por tanto:

$$r = \frac{D}{2}$$

Una vez que se conoce el volumen, se deberá determinar el porcentaje de la capacidad ocupada por cada solución.

Ahora se deberá determinar la molaridad de la primera solución con la fórmula siguiente:

$$M = \left(\overline{x}_{\text{soluto}}\right)\left(\rho_{\text{solución}}\right)\left\{\frac{1}{PM_{\text{soluto}}}\right\}\left(1\,000\right)$$

En seguida se deberán generar los balances:

$$V_1 + V_2 = V_3 \qquad 1$$

$$M_1V_1 + M_2V_2 = M_3V_3 \qquad 2$$

Como ya se conocen V_1, V_2 y M_1, además se sabe que se agregó agua, y se sabe que M_2 es igual a 0, se deberá despejar M_3 de la ecuación 2:

$$M_3 = \frac{M_1V_1}{V_3}$$

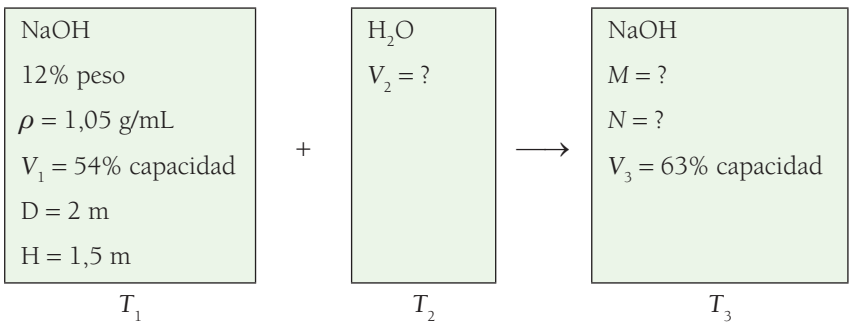
De esta manera, ya se conoce la molaridad y sólo hace falta conocer la normalidad, la cual puede ser calculada con la siguiente fórmula:

$$N_3 = M_3Z$$

Sabiendo que el NaOH sólo tiene un OH^- intercambiable y que por tanto $Z = 1$, con esto se tendrá el problema resuelto.

$$N_3 = M_3$$

3. Generar un diagrama donde se incluyan todos los datos del problema, considerando las preguntas del mismo.



4. Ahora se deberán determinar las molaridades de cada solución involucrada.

$$T_1 : M_1 = \left(\overline{x}_{\text{soluto}}\right)\left(\rho_{\text{solución}}\right)\left\{\frac{1}{PM_{\text{soluto}}}\right\}\left(1\,000\right)$$

T_2: $M_2 = 0$

T_3: $M_3 = ?$

5. Generar los balances de volumen y masa para determinar los volúmenes y la molaridad de las soluciones.

En este punto, primero se deberá determinar el volumen del tanque 1 aplicando la fórmula del volumen de un cilindro:

$$V = \pi r^2 h$$

$$D = 2r \Rightarrow r = \frac{D}{2} = \frac{2{,}0 \text{ m}}{2} = 1{,}0 \text{ m}$$

$$h = 1{,}5 \text{ m}$$

$$V = \pi(1{,}0 \text{ m})^2 (1{,}5 \text{ m}) = 4{,}7124 \text{ m}^3 \left| \frac{1\,000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \right| = 4\,712{,}4 \text{ L}$$

Para el primer tanque, el volumen de la solución es de 54% de la capacidad del tanque, por tanto es de:

$$V_1 = 4\,712{,}4 \text{ L} \left| \frac{54\%}{100\%} \right| = 2\,544{,}69 \text{ L}$$

Para el tanque 3 el volumen es de:

$$V_3 = 4\,712{,}4 \text{ L} \left| \frac{63\%}{100\%} \right| = 2\,968{,}81 \text{ L}$$

Ahora deberán aplicarse los balances correspondientes de volumen y masa:

$$V_1 + V_2 = V_3 \qquad 1$$

$$M_1 V_1 + M_2 V_2 = M_3 V_3 \qquad 2$$

Despejando el volumen 2 del balance:

$$V_2 = V_3 - V_1 = 2\,968{,}81 \text{ L} - 2\,544{,}69 \text{ L} = 424{,}12 \text{ L}$$

Donde V_2 es la cantidad de agua que se le agregó accidentalmente al tanque, por lo que la concentración final es:

$$M_3 = \frac{M_1 V_1}{V_3} = \frac{(3{,}15 \text{ M})(2\,544{,}69 \text{ L})}{2\,968{,}81 \text{ L}} = 2{,}7 \text{ M}$$

5. Resolver las preguntas del problema.

$$M_3 = 2{,}7 \text{ M}$$

Utilizando la ecuación siguiente se determina la normalidad:

$$N_3 = M_3 Z$$

$$N_3 = (2.7 \text{ M})(1) = 2.77 \text{ N}$$

10.8.4 Mezcla de una o más soluciones conocidas para formar otra con concentración conocida y volumen desconocido

Ejemplo 4

Se dispone de tres tanques de H_2SO_4 (ácido sulfúrico). El primero contiene 300 ft^3 de una solución de H_2SO_4 al 25% peso y densidad 1,20 g/mL, el segundo contiene 500 L de solución 3,5 M de H_2SO_4 y el tercero contiene 0,8 m^3 de solución 10 N.

Si se mezclaran los contenidos de los tres tanques, ¿qué molaridad y qué normalidad tendría la solución resultante?

Solución:

1. Leer el problema.

En la lectura del problema es posible observar que se dan los volúmenes en diferentes unidades dimensionales, por lo que será necesario realizar las conversiones pertinentes antes de resolverlo; asimismo, en la lectura del problema es posible observar que se da la concentración en % peso; molaridad y normalidad, por lo cual se deberán aplicar las fórmulas para homogeneizar las concentraciones a molaridad. Por último, se requiere conocer el volumen resultante, para ello sólo se deben sumar los volúmenes de los tres tanques, y con la fórmula de balance de masa se obtendrá la concentración.

2. Analizar el problema.

En esta parte de la metodología se volverá a leer el problema, con el fin de encontrar los datos necesarios para su solución.

"Se dispone de tres tanques de H_2SO_4. El primero contiene 300 ft^3 de solución de H_2SO_4", esto se debe convertir a litros:

$$V_1 = 300\ \text{ft}^3 \left| \frac{28,32\ \text{L}}{1\ \text{ft}^3} \right| = 8\,496\ \text{L}$$

"Al 25% peso y densidad 1,20 g/mL", este dato se deberá convertir a molaridad, aplicando la fórmula siguiente:

$$M_1 = \left(\bar{x}_{\text{soluto}}\right)\left(\rho_{\text{solución}}\right)\left(\frac{1}{PM_{\text{soluto}}}\right)\left(1\,000\right)$$

De esta manera se conocen el volumen y la concentración del tanque 1.

"El segundo tanque contiene 500 L de solución de H_2SO_4 a 3.5 M", en este caso se conocen la concentración y el volumen del tanque.

"El tercero contiene 0,8 m^3 de solución", como este dato se halla en m^3 y se requiere tener el dato del volumen en litros, se deberá realizar una conversión.

$$V_3 = 0,8\ \text{m}^3 \left| \frac{1\,000\ \text{L}}{1\ \text{m}^3} \right| = 800\ \text{L}$$

"La concentración 10 N", en este paso, se deberá trasformar a molaridad con la fórmula siguiente:

$$N_3 = M_3 \times Z$$

$$\Rightarrow M_3 = \frac{N_3}{Z}$$

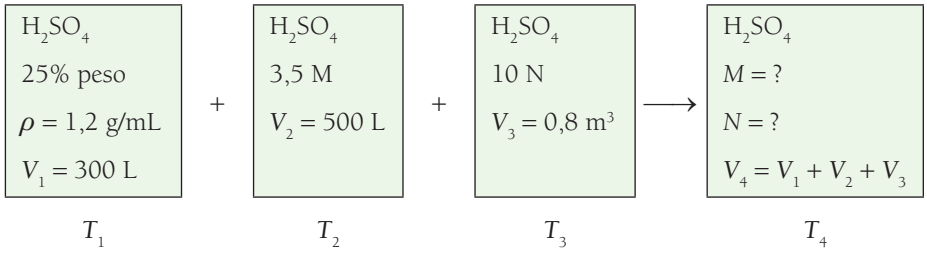
Recuérdese que $Z = 2$, porque el H_2SO_4 tiene $2H^+$ sustituibles, y con esto se determinan la concentración y el volumen del tanque 3. Una vez conocidas las concentraciones y los volúmenes de todos los tanques, se deberá generar un diagrama que represente las soluciones y aplicar el balance de masa con la fórmula:

$$V_1 + V_2 + V_3 = V_4 \qquad 1$$

$$M_1V_1 + M_2V_2 + M_3V_3 = M_4V_4 \qquad 2$$

Como ya se conocen todas las variables, excepto M_4, ésta debe despejarse. Así se obtendrá el resultado del problema.

3. Generar un diagrama donde se incluyan todos los datos del problema, contemplando las preguntas del mismo.



Se deberán determinar los volúmenes de cada tanque, en litros, recordando que la molaridad tiene unidades de mol/L.

$$V_1 = 300\ \text{ft}^3 \left| \frac{28,32\ \text{L}}{1\ \text{ft}^3} \right| = 8\,496\ \text{L}$$

$$V_2 = 500\ \text{L}$$

$$V_3 = 0,8\ \text{m}^3 \left| \frac{1\,000\ \text{L}}{1\ \text{m}^3} \right| = 800\ \text{L}$$

$$V_4 = V_1 + V_2 + V_3 = 8\,496\ \text{L} + 500\ \text{L} + 800\ \text{L} = 9\,796\ \text{L}$$

4. Ahora hay que determinar las molaridades de cada solución involucrada.

$$M_1 = \left(\bar{x}_{\text{soluto}}\right)\left(\rho_{\text{solución}}\right)\left(\frac{1}{PM_{\text{soluto}}}\right)(1000) = (0,25)\left(1,20\ \frac{\text{g}}{\text{ml}}\right)\left(\frac{\text{mol}}{98\ \text{g}}\right)\left(1000\ \frac{\text{mol}}{\text{L}}\right) = 3,06\ \text{M}$$

$$M_2 = 3,5\ \text{M}$$

$$M_3 = \frac{N_3}{Z} = \frac{10\ \text{N}}{2} = 5\ \text{M}$$

Con esos valores se debe generar el balance de masa correspondiente:

$$M_1V_1 + M_2V_2 + M_3V_3 = M_4V_4 \qquad 2$$

Finalmente se determinará la M_4, que es la única concentración que no se conoce:

$$M_4 = \frac{(3,06\ \text{M})(8\,496\ \text{L}) + (3,5\ \text{M})(5\,000\ \text{L}) + (5\ \text{M})(800\ \text{L})}{9\,796\ \text{L}} = 3,24\ \text{M}$$

5. Resolver las preguntas del problema.

$$M_4 = 3,24\ \text{M}$$

$$N_4 = M_4 \times Z = (3,24\ \text{M})(2) = 6,48\ \text{N}$$

10.8.5 Eliminación de agua por evaporación para concentrar la solución hasta una concentración conocida y un volumen desconocido

Ejemplo 5

Se requiere preparar 600 L de solución de NaCl (salmuera de solución de cloruro de sodio) 7,5 M y se dispone de 5 000 dm^3 de solución de NaCl al 15% peso y densidad de 1,05 g/mL. ¿Cuánta cantidad de agua se debe evaporar para obtener la solución deseada?

1. Leer el problema.

En la lectura se observa que se requiere concentrar una solución por evaporación, que se dan los volúmenes disponibles y los deseados en distintas unidades, los cuales se deberán convertir a litros, y que se pide obtener la molaridad de la solución existente para resolver el problema.

2. Analizar el problema.

"Se requiere preparar 600 L de solución de NaCl (salmuera de solución de cloruro de sodio). 7,5 M". Ya se conoce la concentración y el volumen disponible del tanque 3. "Se dispone de 5 000 dm^3 de solución de NaCl al 15% peso y densidad 1,05 g/mL".

Aquí se deben realizar las conversiones pertinentes:

$$V_{\text{disponible}} = 5\,000\ \text{dm}^3 \left| \frac{1\ \text{L}}{1\ \text{dm}^3} \right| = 5\,000\ \text{L}$$

Además se tiene que la molaridad es:

$$M = \left(\overline{x}_{\text{soluto}}\right)\left(\rho_{\text{solución}}\right)\left(\frac{1}{PM_{\text{soluto}}}\right)\left(1\,000\right) = \left(0{,}15\right)\left(1{,}05\ \frac{\text{g}}{\text{mL}}\right)\left(\frac{1}{98\ \frac{\text{g}}{\text{mol}}}\right)1\,000$$

Ya se conocen la concentración y el volumen disponible del tanque 1. "¿Cuánta cantidad de agua se requiere evaporar para obtener la solución deseada?".

Para resolver el problema se requiere conocer primero el volumen del tanque 1, que permita obtener la solución deseada por lo que se debe determinar el volumen del tanque 1 por medio del balance de masa.

$$M_1V_1 + M_2V_2 = M_3V_3$$

Como el tanque 2 contiene agua, éste no tiene molaridad, por eso determinar V_1 es relativamente sencillo.

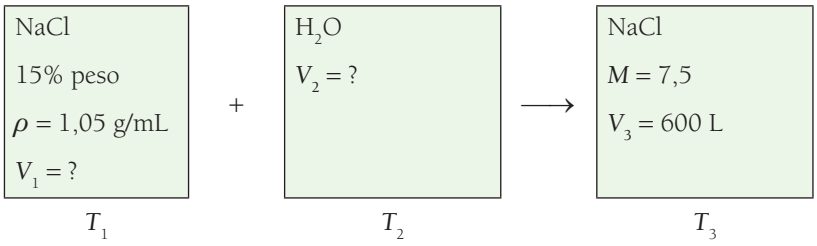
$$V_1 = \frac{M_3V_3}{M_1}$$

Una vez conocidos V_1 y V_3, se podrá determinar V_2, que representa el volumen de agua que deberá ser evaporada, lo cual se hará mediante el balance de volumen correspondiente:

$$V_2 = V_3 - V_1$$

En este momento el problema ya está resuelto.

3. Generar un diagrama en donde se incluyan todos los datos del problema, considerando las preguntas del mismo.



$V = 5\,000\ \text{dm}^3$

Como se puede ver en el diagrama, se anota el volumen disponible en el exterior del tanque, debido a que no se sabe cuánto de este volumen se debe concentrar para obtener la solución deseada; por tanto, el volumen 1 es una incógnita indirecta del problema.

Se deberán determinar los volúmenes en litros, recuérdese que las unidades de la molaridad son mol/L.

$$V_{\text{disponible}} = 5\,000\ \text{dm}^3 \left| \frac{1\ \text{L}}{1\ \text{dm}^3} \right| = 5\,000\ \text{L}$$

$$V_3 = 600\ \text{L}$$

4. Determinar las molaridades de cada solución involucrada.

$$M_1 = \left(\overline{x}_{\text{soluto}}\right)\left(\rho_{\text{solución}}\right)\left(\frac{1}{PM_{\text{soluto}}}\right)(1\,000) = (0{,}15)\left(1{,}05\ \frac{\text{g}}{\text{mL}}\right)\left(\frac{1}{58{,}5\ \frac{\text{g}}{\text{mol}}}\right)\frac{1\,000\ \text{mL}}{\text{L}} = 2{,}69\ \text{M}$$

5. Generar el balance de masa correspondiente.

$$M_1V_1 + M_2V_2 = M_3V_3 \longrightarrow V_1 = \frac{M_3V_3}{M_1} = \frac{(7{,}5\ \text{M})(600\ \text{L})}{2{,}69\ \text{M}} = 1\,672{,}86\ \text{L}$$

Como se puede ver, el volumen disponible es mayor al volumen necesario (V_1) para formar la solución deseada, lo cual indica que sí se puede obtener la solución 3.

6. Resolver las preguntas del problema.

Se genera el balance de volumen y se despeja el volumen 2.

$$V_1 + V_2 = V_3$$

Entonces

$$V_2 = V_3 - V_1 = 600\ \text{L} - 1\,672{,}86\ \text{L} = -1\,072{,}86\ \text{L}$$

El signo negativo indica que ésta es la cantidad de agua que se debe evaporar para obtener la solución de NaCl con una concentración 7,5 M.

El problema está resuelto por completo.

10.8.6 Neutralización de soluciones ácidas básicas (mezclas de soluciones ácidas con básicas)

Problema: Se desea saber cuánto NaOH (hidróxido de sodio) al 3.2 N se requiere para neutralizar 500 L de solución de HCl (ácido clorhídrico) al 36% peso y densidad 1.17 g/mL.

1. Leer el problema

En la lectura se observa que se trata de una neutralización, por tanto se deberá usar la fórmula:

$$M_A V_A = M_B V_B$$

2. Analizar el problema

Con los datos del problema se determina la M_B de la base aplicando la fórmula:

$$M_B = \frac{N_B}{Z}$$

como el NaOH tiene solo un ^{-}OH disponible, $Z = 1$. Con los datos del HCl se puede determinar la molaridad del ácido:

$$M_A = (\bar{x})(P)\left(\frac{1}{PM}\right)(1\,000)$$

Se despeja el V_B y se obtiene el resultado.

$$V_B = \frac{M_A V_A}{M_B}$$

3. Generar un diagrama en donde se incluyan todos los datos del problema

NaOH	=	HCl
3,2 N		36% peso
$V_B = ?$		$P = 1.17$ g/mL
		$V = 500$ L
T_B		T_A

4. Determinar las molaridades de las soluciones.

$$T_B : M_B = \frac{N_B}{Z} = \frac{3.2\text{ N}}{1} = 3.2\text{ M}$$

$$T_A : M_B = (\bar{x})(P)\left(\frac{1}{PM}\right)(1\,000) = (0.36)\left(1.17\,\frac{\text{g}}{\text{mL}}\right)\left(\frac{\text{mol}}{36.5\text{ g}}\right)\left(1\,000\,\frac{\text{mL}}{\text{L}}\right) = 11.54\text{ M}$$

5. Generar el balance de masa correspondiente.

$$M_A V_A = M_B V_B,$$

se despeja el volumen de la base por ser la única incógnita en la fórmula:

$$V_B = \frac{M_A V_A}{M_B} = \frac{(11.54\text{ M})(500\text{ L})}{3.2\text{ M}} = 1\,803{,}082\text{ L}$$

6. Resolver las preguntas del problema.

Como sólo se pregunta la cantidad de NaOH necesaria para neutralizar el HCl, la respuesta es que se requieren 1 803,082 L de solución de NaOH 3,2 M para neutralizar 500 L de HCl al 36% peso y densidad 1,17 g/mL.

10.9 Factores que afectan la solubilidad

El grado en que una sustancia se disuelve en otra depende de la naturaleza del soluto, así como de la del disolvente y también de la temperatura y, al menos en los gases, de la presión.

- **Superficie de contacto.** La interacción soluto-disolvente aumenta cuando hay mayor superficie de contacto y el cuerpo se disuelve con más rapidez (pulverizando el soluto).
- **Agitación.** Al agitar la solución se van separando las capas de disolvente que se forman alrededor del soluto y nuevas moléculas del disolvente continúan la disolución.
- **Efectos de la presión.** La solubilidad de un gas en cualquier solución aumenta al incrementarse la presión del gas sobre el disolvente. En cambio, las soluciones de los sólidos y los líquidos no muestran un efecto apreciable por la presión. La solubilidad de un gas aumenta en proporción directa a la presión. Los embotelladores aprovechan el efecto de la presión sobre la solubilidad al producir bebidas carbonatadas como el champagne, la cerveza y muchas bebidas gaseosas.
- **Efectos de la temperatura.** La solubilidad en agua de la mayor parte de los sólidos se incrementa al aumentar la temperatura de la solución. A diferencia de las soluciones de los sólidos, la solubilidad de los gases disminuye al aumentar la temperatura.

  El aumento de solubilidad se puede lograr con la variación de la temperatura; de hecho existen gráficos que indican la variación de solubilidad de una sustancia dada en un disolvente, tales gráficos son conocidos como curvas de solubilidad (véase figura 10.3).

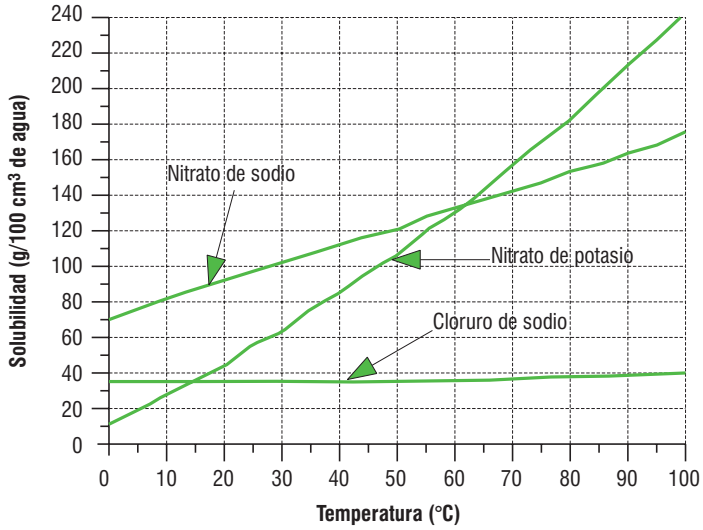


Figura 10.3 *Curvas de solubilidad de diferentes sustancias disueltas en agua.*

10.10 Problemas

1. Se desea preparar 580 L de solución H_2SO_4 5 N, para lo cual se dispone de dos soluciones. La primera se encuentra en un tanque cilíndrico de un diámetro de 2,5 m y altura de 2 m lleno al 20% de su capacidad y una

concentración de 1,5 M. La segunda es una solución 66% peso con una densidad de 1,5 g/mL y un volumen de 510 L. A partir de la información anterior determine:

a) ¿Qué volumen se requiere de cada una de las soluciones disponibles para obtener la solución deseada?

b) La cantidad máxima de solución H_2SO_4 5 N que se puede obtener a partir de las soluciones disponibles.

2. ¿Cuántos mililitros de HCl concentrado (36% peso y $\rho = 1{,}22$ g/mL) se agregan para obtener 0,02 m^3 de solución de HCl 2,5 m (molal), si la densidad de la solución preparada es de $\rho = 1{,}05$ g/mL? Asimismo, determine la molaridad, normalidad, % peso, % mol y fracción peso de la solución.

3. Se dispone de tres tanques con H_2SO_4. El primero contiene 5 000 L de solución de H_2SO_4 al 25% peso y densidad de 1,20 g/mL. El segundo contiene 1 500 L de solución 4,2 M de H_2SO_4. El tercero contiene 2 000 L de solución 14 N de H_2SO_4.

a) Si se mezclaran los contenidos de los tres tanques, ¿qué molaridad tendría la solución resultante?

b) Si se desea preparar una solución 5 M, agregando todo el contenido del segundo tanque y las cantidades necesarias del primero y el tercero, determine el volumen máximo que se puede preparar.

4. Se dispone de una línea de desecho que maneja 84 000 L/h de H_2SO_4 de 4.5% peso y densidad de 1,04 g/mL, la cual debe neutralizarse antes de enviarse al drenaje. Se tiene otra línea también de desecho, de 5 200 L/h de $Al(OH)_3$ al 2,36% peso y densidad de 1,10 g/mL. Determine:

a) M, N, m de la solución ácida.

b) ¿Qué cantidad de ácido o base es necesario para neutralizar las líneas antes de descargarlas al drenaje?

5. Una planta de cromado desea preparar 2 m^3 de una solución 0,5 M de ácido clorhídrico. Se cuenta con HCl al 30% peso y densidad de 1,2 g/mL en una cantidad de 250 L y toda el agua necesaria. Determine:

a) Si se puede preparar la cantidad deseada

b) ¿Qué cantidad de HCl y agua se usaría?

c) Si se empleara el HCl al 0,5 M para preparar la solución al 30% peso, ¿qué haría y en qué cantidades?

6. Se tienen dos tanques; el primero contiene 40 L de HNO_3 al 40% peso y tiene una densidad de 1,2463 g/mL y el segundo contiene 200 L de HNO_3 al 15% peso y tiene una densidad de 1,082 g/mL.

a) Se requiere conocer qué volumen de cada una de las soluciones se debe agregar a un tercer tanque para preparar 200 L de solución que tenga una composición de HNO_3 al 30% peso y densidad de 1,18 g/mL.

b) Si alguno de los dos tanques no es suficiente, ¿qué se debe hacer y en qué cantidad?

7. Se dispone de una solución diluida de H_2SO_4 al 12% peso y cuya densidad es de 1,18 g/mL, que se encuentra almacenada en un recipiente cilíndrico de 2 m de de diámetro y 1,5 m de altura, ocupando un volumen de 30% de la capacidad; por un error se le agrega agua destilada en tal cantidad que ahora el volumen de la disolución es de 58% de la capacidad del recipiente. Determine:

M, N, m, % peso y % mol de la solución después de haber agregado el disolvente. Considere que la densidad del agua es 1 g/mL.

8. Se desean obtener 500 L de ácido acético (CH_3COOH) con una concentración 3 M, para lo cual se dispone de dos soluciones: una de concentración al 30% peso y densidad de 1,24 g/mL y la otra al 10% peso y densidad de 0,98 kg/L. Determine:

a) Los kilogramos de cada una de las dos soluciones de referencia, para obtener la solución con la concentración deseada.

b) La N y el % peso de la solución final.

9. Se requiere preparar 900 L de una solución de HCl de concentración 0,8 N, para ello se dispone de HCl de una pureza al 36% peso, con una densidad de 1,19 g/mL y toda el agua necesaria.
Determine:

a) Las cantidades necesarias de ácido y agua para preparar la solución deseada.

b) Si en un día de uso la solución pierde por evaporación 18% peso del disolvente, ¿qué normalidad tendrá la solución?

10. A 4,450 g de H_2SO_4 de 100% de pureza se agregan a 82,2 g de H_2O y se encuentra que la densidad de la mezcla es de 1,029 g/mL. Determine:

a) El % peso de la solución.

b) La fracción mol.

c) La molalidad.

d) La molaridad.

e) La normalidad.

11. En un tanque se tienen 200 m^3 de ácido fosfórico (H_3PO_4) al 38% peso y densidad 1,05 g/mL. A esta solución se le agregan 30 m^3 de agua y se desea saber:

a) La concentración normal y molar inicial.

b) La concentración normal y molar final.

c) La cantidad de ácido al 80% peso que se requiere para preparar la solución inicial.

12. En cierto proceso industrial se utilizan 6,3 m^3 de solución de HCl al 20% peso, cuya densidad es de 1,40 g/mL. Para la preparación únicamente se dispone de 1 500 L de solución 20 N. Determine la cantidad de agua que se requiere agregar y, en caso necesario, del ácido que se necesita para cubrir la necesidad de la industria.

13. Si se preparan 0,3 m^3 de H_2SO_4, 2,16 m (molal) y se sabe que la densidad es de 1,303 g/mL para esta solución. Determine:

a) M, N y % peso.

b) Si la solución anterior se mezcla con 0,2 m^3 de H_2SO_4 5 M, calcule cuál será la molaridad de la mezcla resultante.

14. Una salmuera se prepara disolviendo 500 g de NaCl en 200 L de agua, la densidad de la solución es de 1,01 g/mL. Si se diluye en agua hasta 250 L, exprese la concentración de la salmuera antes y después de la dilución, en molaridad y normalidad.

15. Se desean preparar 8 000 L de solución 2 N de ácido nítrico (HNO_3) a partir de ácido concentrado al 74% peso y densidad de 1,43 g/mL a 20 °C. Determine:

a) La cantidad de ácido concentrado y agua necesarios.

b) La densidad de la solución diluida.

c) Molaridad y molalidad de la solución final.

16. Se cuenta con dos tanques de soluciones en el almacén de una industria química y se requiere formar una solución 3 M de HCl, en una cantidad de 2 500 dm^3. El primer tanque contiene 3 ft^3 de una solución de HCl 10,5 N y el segundo tanque contiene 5 000 L de solución 1,2 M.

Determine:

a) La cantidad de cada solución que debe agregarse a un tercer tanque para formar la solución deseada.

b) La cantidad máxima de solución 3 M que se puede preparar con el contenido de los dos tanques disponibles.

c) En caso de que las soluciones no fueran suficientes, ¿qué se debe hacer y en qué cantidad?

17. Determine la M, N, m, % peso y % mol de una solución formada por 450 kg de ácido acético (CH_3COOH) y 4 000 L de agua.

18. Se mezclaron accidentalmente dos tanques con soluciones de HNO_3, el primero contenía 67 L de solución al 1,8 m (molal) y el segundo 90 dm^3 de solución al 6,7 M. Determine la concentración final de la solución.

19. Se desean preparar 800 L de solución 0,05 N de ácido sulfúrico (H_2SO_4). A partir del ácido concentrado al 100% peso y toda el agua necesaria, determine la cantidad de agua y ácido que es necesario mezclar para formar la solución deseada.

20. Con el tiempo, las soluciones se evaporan. Determine la concentración molar de una solución de NaOH que originalmente se encontraba a una concentración 0,8 N, si se sabe que se ha evaporado el 50% peso de agua.

21. Determine la cantidad de agua que se debe agregar a una solución de vinagre (CH_3COOH) si se desea que cambie su concentración de 15% peso y densidad de 1,03 g/mL a una solución al 0,02 M.

22. Como resultado de la obtención de la aspirina se generan aguas madres que contienen ácido sulfúrico (H_2SO_4) en solución al 2,5 N. Determine la cantidad de solución de NaOH 1,5 M que se debe emplear para neutralizar 750 mL de agua madre.

23. Se requiere preparar 600 L de solución de NaOH 1,5 M para neutralizar las aguas madres que contienen ácido sulfúrico; se cuenta con 2,4 kg de NaOH al 97% pureza y toda el agua necesaria.

Determine:

a) La cantidad de NaOH y agua necesarias para formar la solución deseada.

b) ¿Son suficientes los 2,4 kg de NaOH que se tienen en el almacén?

c) En caso de que se tenga un excedente de NaOH, ¿qué cantidad máxima de solución 1,5 M se puede preparar?

24. Si se mezclaran los siguientes tanques que contienen ácido propiónico (CH_3CH_2COOH) a 20 dm^3 de solución al 0,05% peso y densidad de 1,009 g/cm^3.

a) 30 ft^3 de solución 3 N.

b) 12.5 L de solución 6 M.

c) 5 600 cm^3 de agua.

Determine la concentración M y N que resulta de esta mezcla.

25. En una planta industrial se requieren 450 L de salmuera (solución de NaCl al 15% peso y densidad 1,05 kg/L) y no se cuenta con sal. Determine la cantidad de NaCl que debe comprarse para cumplir con el requerimiento.

26. Para la electrólisis del cobre se requiere de una solución 3 M de sulfato de cobre ($CuSO_4$), si el sulfato de cobre tiene una pureza de 56% peso, ¿qué cantidad de él se requiere agregar a 400 L de agua para formar la solución deseada?

27. En un tanque se tienen 50 dm^3 de ácido fosfórico (H_3PO_4) al 38% peso y densidad 1,05 g/mL. A esta solución se le agregan 3 m^3 de agua y se desea saber:

a) La concentración normal y molar inicial.

b) La concentración normal y molar final.

28. Se dispone de tres tanques con H_2SO_4. El primero contiene 3 500 L de solución de H_2SO_4 al 25% peso y densidad de 1,20 g/mL, el segundo contiene 630 L de solución 4,2 M de H_2SO_4; y por último, el tercero contiene 80 L de solución 14 N de H_2SO_4.

a) Si se mezclaran los contenidos de los tres tanques, ¿qué molaridad y qué normalidad tendría la solución resultante?

b) Si se desea preparar una solución 4,8 M, agregando todo el contenido del segundo tanque y las cantidades necesarias del primero y el tercero, determine el volumen máximo que se puede preparar.

29. Se requiere preparar 490 L de una solución de HCl de concentración 1,3 N, para ello se dispone de HCl al 36% peso con una densidad de 1,19 g/mL y toda el agua necesaria.
Determine:

a) Las cantidades necesarias de ácido y agua para preparar la solución deseada.

b) Si en un día de uso la solución pierde por evaporación 8,8% peso del disolvente. ¿Qué normalidad y qué molaridad tendrá la solución resultante?

30. 580 g de NaOH al 98% de pureza se agregan a 450 g de H_2O y se encuentra que la densidad de la mezcla es de 1,007 g/mL. Determine:

a) El % peso de la solución.

b) La fracción mol.

c) La molalidad.

d) La molaridad.

e) La normalidad.

10.11 Tema de actualidad

Retira China lácteos de supermercados por escándalo de contaminación

Por: Notimex, sábado 20 de septiembre de 2008

Beijing. Miles de productos lácteos comenzaron a ser retirados hoy de los supermercados chinos tras el escándalo por la presencia de melamina en leche líquida y productos derivados, lo cual puso en duda la efectividad del sistema de control de calidad.

La melamina en leche líquida se halló en tres de las principales marcas chinas del sector: Bright, Mengniu y Yili, esta última patrocinadora de los Juegos Olímpicos Beijing 2008.

La cifra de víctimas –cuatro muertos y seis mil 244 bebés afectados– se ha estabilizado, pero se teme que el escándalo por la leche contaminada se extienda a otras regiones, como Hong Kong.

Las autoridades sanitarias del ex enclave británico encontraron melamina en otros productos lácteos como el yogur y el helado de la marca Yili, y retiraron todos los productos de la marca Mengniu de las dos principales cadenas de supermercados.

Por su parte, la cadena estadunidense de cafeterías Starbucks dejó de servir leche en dos tercios de sus establecimientos como medida de precaución, ya que su suministrador de leche es la compañía Mengniu.

Una portavoz de la compañía en Shanghai, Caren Li, indicó que no hay motivo de alarma, sino que la decisión se tomó para evitar cualquier inquietud por parte de los consumidores.

Algunas escuelas internacionales en Pekín, como el liceo francés o la escuela sueca, informaron a los padres que retiraban los productos lácteos de los menús.

El escándalo de la leche provocó hasta la fecha la detención de 18 personas y la destitución de varios cargos políticos, entre ellos la del alcalde de Shijiazhuang (capital provincial donde se encuentra la sede de Sanlu) y la presidenta de la citada empresa.

Figura 10.4 *La melamina en leche líquida se halló en tres de las principales marcas chinas del sector: Bright, Mengniu y Yili, esta última patrocinadora de los Juegos Olímpicos, Beijing 2008 (Jupiter Images Corporation).*

Esta nueva crisis se añade a una serie de problemas que los últimos años tuvo el gigante asiático en el sector alimentario: cerdos dopados con anabolizantes, pescado con altos índices de hormonas, comida para animales que contenían melamina y provocó la muerte de perros y gatos en Estados Unidos de América.

Estos escándalos, agravados por el hecho de que China sea el primer país exportador del planeta, dañan seriamente la imagen del "Made in China", un problema que preocupa mucho a Pekín.

En el caso de la leche el riesgo es aún mayor, ya que este producto y sus derivados no forman parte de la dieta tradicional y este escándalo podría arruinar la confianza de los consumidores.

Las autoridades y las compañías chinas llevan décadas intentando estimular el consumo de leche entre la población, cuyos índices son mucho menores que en Occidente.

La bolsa, que estos días vive jornadas turbulentas por la crisis financiera, también se ha visto afectada por el escándalo.

La cotización de Yili en la bolsa de valores de Shanghai descendió el jueves un 10% y la de Bright un 3.55%, cayendo ambas a sus niveles más bajos desde marzo de 2006.

Pero además de evidenciar la falta de controles fiables, este escándalo vuelve a poner en tela de juicio la transparencia en cuestiones de seguridad alimentaria, como sucedió durante la gripe aviar.

La agencia noticiosa Xinhua reveló que la marca de leche china Sanlu, principal implicada en el escándalo de la leche adulterada para bebés —en ella se encontraron los primeros casos— intentó sobornar a un consumidor que quiso destapar el caso hace ya tres meses.

Sanlu pagó 280 dólares a un hombre para que borrara varias notas en internet donde aseguraba que varios bebés habían sentido molestias tras consumir productos de esa marca.

Empresas químicas

Planta asturiana de DuPont, premiada por el tratamiento de aguas residuales

Oviedo, 4 oct (EFECOM). La planta que la multinacional DuPont tiene en el valle de Tamón-Nubledo, en Asturias, ha obtenido el Premio Europeo Responsible Care 2008 que anualmente concede el Consejo de la Industria Química Europea (CEFIC), por el tratamiento que reciben sus aguas residuales.

DuPont ha recibido este premio como reconocimiento a su programa basado en la sustitución del ácido acético consumido en una planta de biotratamiento de aguas residuales en las instalaciones del Valle de Tamón, por un efluente acuoso rico en glucosa derivado de las labores de limpieza de una cercana fábrica de Chupa Chups.

El tribunal encargado de designar al ganador del premio ha destacado el éxito derivado de la colaboración entre DuPont y el fabricante de caramelos, que ha permitido obtener mejoras medioambientales y un ahorro de costos a ambas compañías, que asciende a 335.000 euros anuales: 300.000 en el suministro de ácido acético para DuPont y 35.000 euros en costos de tratamiento del producto residual para Chupa Chups.

El premio, que por primera vez ha recaído en una empresa situada en España, ha sido entregado por el presidente de CEFIC, Francois Cornélis, al Presidente de DuPont en España y Portugal, Enrique Macián, durante la celebración de la Asamblea General de la organización europea, que ha tenido lugar hoy en Atenas, informa la Federación Empresarial de la Industria Química Española.

El pasado año, el Premio lo obtuvo DOW Holanda por un proyecto que versaba también sobre la eficiencia en los tratamientos de depuración de aguas industriales. EFECOM lj/prb

10.12 Bibliografía

Alcántara Barbosa, María del Consuelo, *Química de hoy*, McGraw-Hill Interamericana Editores, México.

Anders, Paul, *Principios de Química*, Limusa, 2ª. edición, México.

Chamizo, Q. A., A. Garritz, *Química*, Pearson, México.

Chang, Raymond, *Química,* McGraw-Hill Interamericana Editores, 9ª. edición, México.

Castellan Gilbert, *Fisicoquimica,* Editorial Fondo Educativo Interamericano, México.

Fernández F.R., *La Química en la Sociedad*,, UNAM, México, 1994.

Maron & Prutton, *Fundamentos de Fisicoquímica*, Limusa, México.

Ramírez R.V. y Monsalvo V. R., *Química I*, Publicaciones Culturales, México, 2002.

Respuestas a problemas seleccionados

Capítulo 2

1. a) $m_{\text{durazno producido}} = 0{,}306$ Ton/h

   $m_{\text{piña producido}} = 0{,}375$ Ton/h

2. Cantidad de envases de durazno = 721 613 envases

3. $T = 230$ °F

15. $Cp = 723{,}06 + 2{,}07 \times 10^{-2}\ T_R$

23. $\rho = 5{,}96$ g/cm^3

27. P en la Ciudad de México = 0,769 bar

29. a) Volumen = $1{,}659 \times 10^{-23}$ cm^3/átomo

Capítulo 3

3. a)

Componente	% peso
H_2O	45,45
NaOH	54,55
Total	**100**

b)

Componente	m_i (kg)
H_2O	14,875
NaOH	17,850
Total	**32,725**

c) 7 555 recipientes.

7. a)

Alimentación	m_i (kg)
Café	15,013
H_2O	45,042
Total	**60,055**

b) $m_{\text{sólidos solubles}} = 33{,}06$ lb

c) $m_{H_2O} = 45\,042$ g

d) $T = 280{,}2$ K

11. Tabla de resultados para el problema:

Concepto	Producto elaborado	
	Pulpa de piña	Pulpa de durazno
a) gal/año	4 444,7	571,75
b) kg/año	2 964 000	99 861,84
c) Envases/año	644 347	131 743
d) lb/año	6 528 634,36	219 960
e) $\$H_2O$/año		$114 000/año

22. a)

Componente	m_i (Ton/día)
Gas natural	1 466,80
Gasolina	922,14
Nafta	514,68
Queroseno	428,90
Combustóleo	669,09
Otros	287,36

b) Ganancia = 7 000 dólares/día

Ganancia = 49 000 dólares/semana

c) $m_{\text{distribuida}} = 293\,360$ kg

24. a)

Componente	m_i (kg/día)
Carbón	400
Azufre	600
Nitrato de potasio	3 000

b) Para la molienda: molino de bolas

Para el mezclado: mezclador de cono

c)

Componente	Costo/día	Costo/6 meses
Carbón	$ 704,85	$ 128 281,94
Azufre	$ 244,90	$ 444 997,97
Nitrato de potasio	$21 145,00	$3 848 458,10

Capítulo 4

13. Mol de aire que entra = 0,969 mol

14. $T_{\text{mezcla}} = 309{,}73$ K

15.

Componente	P_i (atm)
CO_2	0,056
Aire	1744

16. $\overline{PM} = 29{,}31$ g/mol

17. $\rho_{\text{mezcla}} = 2{,}1$ g/L

21. a) $m_{CO_2} = 35{,}2$ g

b) $P_{\text{Total}} = 10$ atm

23. a)

Componente	P_i (lb/in^2)
CH_4	25,872
CO_2	18,816
H_2O	53,655
O_2	4,263
N_2	14,700

b)

Componente	% mol
CH_4	22,03
CO_2	16,00
H_2O	45,69
O_2	3,67
N_2	12,59

c)

Componente	m_i (lb)
CH_4	1,10
CO_2	2,20
H_2O	2,57
O_2	0,37
N_2	1,10

Capítulo 5

1. a)

Punto	P_i (atm)	V_i (L)	T_i (K)
1	27,20	53,15	699,67
2	5,44	265,64	699,67
3	3,40	265,64	437,47
4	3,40	244,68	454,26

3. 1) $m_{CH_4} = 68{,}26$ Ton
   2) $V_1 = 4\,000\,000$ L
   3) $V_2 = 5\,516\,035$ L
   4) $T_3 = 47{,}3$ K
   5) $P_4 = 4{,}14$ atm

19.

Proceso	Q (cal)	W (cal)	ΔE (cal)	ΔH (cal)
1–2 Q = 0 rev	0	–132 585,97	132 585,97	185 620,36
1–2 Q = 0 irrev	0	–189 246,24	132 585,97	185 620,36

22.

Proceso	Q (cal)	W (cal)	ΔE (cal)	ΔH (cal)
1–2 V = cte	1 365	0	1 365	1 911
2–3 Q = 0	0	1 365	–1 365	–1 911
3–4 T = cte	–948,6	–948,6	0	0
Total	**416,4**	**416,4**	**0**	**0**

29.

Proceso	Q (cal)	W (cal)	ΔE (cal)	ΔH (cal)
1–2 V = cte	1 021 220,0	0	1 021 220,0	1 429 708,0
2–3 P = cte	1 429 707,7	408 487,9	1 021 220,0	1 429 708,0
3–4 V = cte	–1 531 830,7	0	–1 531 830,7	–2 144 563,0
4–1 P = cte	–714 852,4	–204 243,0	–510 609,0	–714 852,0
Total	**204 244,6**	**416,4**	**0**	**0**

Capítulo 8

1. a)

Componente	% mol
N_2	91,00
N_2O_4	09,00
Total	**100,00**

b) $\overline{PM} = 33{,}76$ g/mol

5.

Componente	V_i (L)	T_i (K)
O_2	22,59	13,80
N_2	8,55	45,44
CO_2	34,43	23,92
H_2O	34,43	11,84
Total	**100,00**	**100,00**

11. a) $G_v = 10\,336{,}92$ L/h

b)

Componente	X_i
NH_3	0,091
NO	0,364
H_2O	0,545
Total	**1,000**

c)

Componente	P_i (atm)
NH_3	0,091
NO	0,364
H_2O	0,545
Total	**1,000**

25. $\Delta H°_R = -13{,}29$ kcal/mol

$\Delta E°_R = -13{,}29$ kcal/mol

Capítulo 9

5. $m_{C_2H_5OH} = 585{,}58$ kg

6. $m_{CO_2} = 560{,}12$ kg

13. $m_{\text{calcopirita}} = 277\,417{,}13$ kg

14. $m_{SO_2} = 133{,}85$ kg

15. $m_{\text{aire}} = 394\,385{,}48$ kg

27. a)

Componente	m_i (Ton)
H_3PO_4	59,88
K_2CO_3	63,24

b) $m_{CO_2} = 18{,}55$ Ton

Componente	% Peso
H_3PO_4	89,93
K_2CO_3	10,07
Total	**100,00**

d) $m_{\text{carboxi-metilcelulosa}} = 964{,}608$ Ton

Capítulo 10

1. a) $V_1 = 512{,}56$ L

$V_2 = 67{,}44$ L

b) $V_{máx} = 2\,221{,}86$ L

3. a) $M_4 = 4{,}31$ M

b) $V_{máx} = 6\,695{,}88$ L

5. a) Sí se puede.

b) $V_{HCl} = 101{,}39$ L

$V_{H_2O} = 1\,898{,}61$ L

c) Se toman 4 950 L de HCl al 0,5 M y se evaporan 4 680 L de H_2O para formar 250 L de HCl al 30% peso.

7. $M = 0{,}75$ M

$N = 1{,}5$ N

$m = 0{,}73$ m

% peso = 6,7 %

% mol = 1,3 mol

9. a) $V_{HCl} = 61{,}344$ L

$V_{H_2O} = 836{,}656$ L

b) $N = 0{,}994$ N

Índice analítico

A

Acumulado, 321
Administración, 10
Adsorción, 236
Agitación, 231-232
Almacenamiento, 207-210
  de gases, 218-222
  de líquidos, 215-218
  de materiales específicos, 222
  de sólidos, 210-215
Almacenes
  cubiertos, 212
  de planta, 211, 212
Área
  de empacado, 7
  de investigación, 7
Átomo, 136, 280

B

Balance
  de calor, 172, 173
  de energía, 291, 292
  de energía en sistemas con reacción química, 279-309
  de masa, 249-250
  de masa en los procesos unitarios, 322
  de masa en operaciones unitarias, 249-250
  de masa en sistemas con reacción química, 279-309
  de una reacción, 290, 291, 292
Balanceo de ecuaciones, 282
Barómetro, 77
Bernoulli, Daniel, 111
Bombas
  clasificación de las, 196, 197
  tipos de, 197, 198

C

Calcinación, 325-327, 337
Calidad, 3
  control de, 10, 18
Calor, 150-151
  de reacción, 324
  latente, 151, 172
  latente de vaporización, 83
  sensible, 151, 171, 172
  y temperatura, diferencias entre, 150, 151
Cambio a presión constante, 303
Cambio adiabático, 303
Camillas, 199, 200
Capacidad calorífica, 150-151
Carretillas, 200
Catalizadores positivos, 322
Centrifugación, 190
Ciclo(s)
  de Atkinson, 159, 160
  de Brayton o Joule, 159
  de Carnot, 157
  de Diesel, 157
  de Otto, 158
  de Rankine, 158
  Stirling, 160
  Stirling ideal, 161
  termodinámico, 155-160
Ciencia, 8
Cifra significativa, 52-53
Cintas transportadoras, 204
Clasificación de las empresas, 5, 6
Clasificación de las operaciones unitarias, 190
Clasificación de las reacciones químicas, 286, 287
Clasificación de las soluciones, 355-357
Clasificación de los procesos unitarios, 323-339
Coeficiente estequiométrico, 280-282
Comburente, 323
Combustible, 323
Combustión, 323, 337
Compresión, 239
  adiabática, 155
  isobárica, 155
Concentración, 76, 83
Contenedores, 214, 215
Conversión, 48-52, 56, 248
Cortado, 239

D

Dalton, John, 289
Decantación, 238
Densidad, 70-73
Destilación, 234-238
Diagrama
  conceptual de una empresa industrial, 8-11
  de flujo, 242-249
  de procesos, 7, 143, 144, 145
  de variables, 143, 144, 145
Dirección de la reacción, 320
Disolvente, 354
  densidad del, 363
Dispersión, 232-233

E

Economía de la industria, 10
Ecuación
  de Clausius-Clapeyron, 84
  de estado, 113, 147
  de estado termodinámico, 147
  de Poiseuille, 80
  general de la conservación de la energía, 149
  química, 280-282
Edificios de depósitos, 212, 213
Eficiencia, 284
  de una reacción, 284, 321
Electrólisis, 20, 331-332, 338
Empresa industrial, materiales y flujo de productos, 15
Emulsión, 238
Energía interna, 148
Enfriamiento isocórico o isométrico, 155
Entalpía, 151, 152, 304
  de vaporización, 83, 84
  de vaporización molar, 83, 84
Equilibrio dinámico, 83
Escalas de temperatura, 68-70
Estado
  de agregación, 136
  gaseoso, 136
Estanques, 216
Estanterías, 215
Estequiometría, 280-285, 289-290
Esterificación, 332, 333, 338
Evaporación, 236
Expansión
  isobárica, 155
  isoentrópica, 157
  isotérmica, 155, 157
Extracción, 238

F

Factores que afectan la solubilidad, 384
Fermentación, 334-336, 339
  acética, 334, 335, 339
  alcohólica, 334, 339
  láctica, 335, 336, 339
Filtración, 190
Flotación, 238
Formación de mezclas, 225, 226
Fórmula química, 280, 281
Fracción
  mol, 86-89, 357
  peso, 84-86, 357

presión, 90-91
volumen, 89-90
Frotación o cizalla, 239
Funciones de estado, 302

G

Gas
diatómico, 155
ideal, 136
monoatómico, 155
poliatómico, 155
Gasto
másico, 92
volumétrico, 92
Giorgi, Giovani, 42
Grados de libertad, 147

H

Hertz, 43
Hidrogenación, 336, 339
Hidrólisis, 331, 338
Hílido, 282, 283

I

Impacto, 239
Impureza, 320, 321
Índice de peligrosidad, 83
Ingeniería industrial, 10
Intercambio de calor, 150
Intercambio iónico, 327-329, 337
International Union of Pure and Applied Chemistry, 42
International Union of Pure and Applied Physics, 42
Investigación de mercado, 19
Isótopo, 282, 283

J

Joule, 42, 44

L

Laboratorio analítico de control de calidad, 10
Laboratorio de investigación y desarrollo, 9
Ley
cero de la termodinámica, 170, 171
de Avogadro y Amagat, 138, 139
de Boyle y Mariotte, 112, 138
de Charles y Gay Lussac, 112, 113, 137-138
de conservación de la masa, 289
de Dalton o ley de las proporciones múltiples, 289
de las proporciones constantes, 289
de las proporciones equivalentes, 290
de Lavoisier-Laplace, 308
de los gases ideales, 73, 136
de Raoult, 235
del estado gaseoso, 113, 136
general de los gases, 112-114
Leyes de la termoquímica, 304-309
Leyes estequiométricas, 289-290

M

Magnitudes derivadas, 42-44
Manejo de sólidos, 238-242
Máquinas flow, 204, 205
Materias primas, 10, 12, 14
clasificación de las, 12
Medición, 39-41
Mezcla(s)
clasificación de las, 354
de gases, 114-116
de soluciones, 366-372
tipo de, 20
Mezclado, 226-231
Mezcladores, tipos de, 227-231
Mol, 42, 75, 76, 86-89, 280
Molalidad, 361
Molaridad, 358
Molienda, 239, 241-242
Múltiplos y submúltiplos de unidades, 44-46

N

Neutralización, 329-331, 338
Newton, 43, 44
Nivel
laboratorio, 16, 18
piloto, 16
productivo, 16
Normalidad, 359
Número de Avogadro, 280
Número de masa, 283

O

Operación unitaria, 15, 20, 189-268
ejemplos de, 16
Oxidación, 323, 327, 337

P

Palets, 119, 200, 215
Pared
adiabática, 147
aislante, 147
diatérmica, 148
Pascal, 77
Peso
atómico, 280, 283
específico, 74-75
específico relativo, 74-75
molecular, 83, 87, 280, 283
Plan de trabajo, elementos básicos, 7
Planta
piloto, 7, 11
productiva, 11
química productiva, 10
Prefijos, 44-47
Prensado, 238
Presión, 77-79
absoluta, 79
atmosférica, 77
barométrica, 77
de vapor, 81-83
hidrostática, 78
manométrica, 78
Primera ley de la termodinámica, 148-149, 303
aplicación de la, 153-155
Primera ley de la termoquímica, 304
Principio de Avogadro, 112
Principio de la conservación de la energía, 289
Problemas de mezcla de gases sin reacción, 116-127
Proceso(s)
adiabático, 153, 154, 155, 156
continuos, 23
de calentamiento isobárico, 158
de calentamiento isométrico, 158
de enfriamiento isobárico, 158
de enfriamiento isométrico, 158
físico, 9
físicoquímico, 9
industrial, 1, 15, 29
intermitentes, 23
isobárico, 137, 153, 156
isocórico, 139
isométrico, 139, 153, 154, 156
isotérmico, 138, 153, 156
químico, 9, 21, 29, 249, 319
selección del, 19
unitario, 15, 16, 189

Producción
continua, 4
discontinua, 5
industrial, 1-3
intermitente, 4
por lotes, 4
Producto, 2, 3, 4, 5, 11, 286, 320
acumulado, 286
costo de un, 19
recuperado, 11
residuo, 286
Propiedades
de los gases ideales, 104-111
extensivas, 21, 146
intensivas, 21, 22, 146
Pureza, 285
del reactivo, 285, 320

Q

Quebrantado, 241, 242

R

Reacción
alimentada estequiométricamente, 324
autocatalítica, 287
catalítica, 287
de descomposición, 287
de desplazamiento simple, 287
de doble desplazamiento, 287
de neutralización, 287
de síntesis, 287
endotérmica, 287
enzimática, 287
exotérmica, 287
heterogénea, 287
homogénea, 287
no catalítica, 287
Reacción química, 286-287
ácido-base, 286
redox, 286
Reactivo, 283, 284, 320
en exceso, 283, 284, 285, 322
limitante, 283, 284, 322
Reactor
burbujas, 288
continuo, 288
discontinuo, 288
isobárico, 288
isotérmico, 288
lecho fijo, 288
lecho fluidizado, 288
lecho percolador, 288
membrana, 288
mezcla perfecta, 288
recirculación, 288
tubular, 288
Reactores químicos, tipos de, 287-288
Recipientes, 214, 217, 218, 219
Reducción de tamaño, 239-242
Remolques, 201
Rendimiento, 284
Residuo, 189

S

Saponificación, 333, 339
Secado, 236
Sector
primario, 3
secundario o industrial, 3
terciario o de servicio, 3
Sedimentación, 190
Segunda ley de la termoquímica, 308
Separación de mezclas, 234-238
Silos, 213, 214
Sistema Cegesimal de Unidades, 40
Sistema de unidades, 37-66
Sistema Internacional de Unidades (SI), 40, 41-46
equivalencia entre algunas unidades del, 49
escritura de las unidades del, 53-56
unidades que no son del, 46-47
Sistema métrico decimal, 40
Sistema reaccionante, 279
Sistemas de unidades relacionados con las leyes de los gases ideales, 139-140
Sistemas termodinámicos, 148
Solución, 354
ácida, 355, 356
básica, 356
concentrada, 355
densidad de una, 362
diluida, 355
insaturada, 355
líquida ideal, 237
neutra, 356
saturada, 355
sobresaturada, 355
Soluto, 354
densidad del, 363
Solvente, 354
Subproducto, 11
recuperado, 11

T

Tamizado, 190, 238
Tanques, 216
Tarimas, 199, 200
Técnica industrial, 10
Técnicas para el balance de materiales, 291-292
Tecnología, 9
Temperatura, 68-70
absoluta, 73
Teoría cinética molecular, 111, 112
Termodinámica, 145-148
química, 302-304
Termoquímica, 304
ley de Lavoisier-Laplace, 308
proceso a presión constante, 304
proceso a volumen constante, 304
primera ley de la, 304
segunda ley de la, 306
Torricelli, 77
Trabajo, 149-150
Transporte, 190
a granel, 201
de gases, 191-193
de líquidos, 197, 198, 199
de sólidos, 199-207
por bombas, 194-196
por tuberías, 193-194
Trituración, 238, 239, 241-242

U

Unidades básicas y derivadas, 42-44
Unidades de concentración, 76

V

Variables de estado, 21-24
Vecindad, 147
Viscosidad, 79-81
Volt, 42, 43
Volumen específico, 75

W

Watt, 43