

FUNDAMENTOS DE TERMODINÁMICA TÉCNICA

2ª edición / Correspondiente a la 4ª ed. original

MICHAEL J. MORAN
HOWARD N. SHAPIRO

EDITORIAL REVERTÉ

The background of the cover is a vibrant blue sky with wispy white clouds. Overlaid on this are several translucent, multi-colored planes (shades of purple, orange, green, and blue) that intersect and create a complex, three-dimensional geometric structure. Three small, clear glass spheres are scattered throughout the scene, appearing to float or be part of the structure. The overall aesthetic is modern and scientific.

Factores de conversión

MASA Y DENSIDAD

$$\begin{aligned}1 \text{ kg} &= 2,2046 \text{ lb} \\1 \text{ g/cm}^3 &= 10^3 \text{ kg/m}^3 \\1 \text{ g/cm}^3 &= 62,428 \text{ lb/ft}^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}1 \text{ lb} &= 0,4536 \text{ kg} \\1 \text{ lb/ft}^3 &= 0,016018 \text{ g/cm}^3 \\1 \text{ lb/ft}^3 &= 16,018 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

LONGITUD

$$\begin{aligned}1 \text{ cm} &= 0,3937 \text{ in.} \\1 \text{ m} &= 3,2808 \text{ ft}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}1 \text{ in.} &= 2,54 \text{ cm} \\1 \text{ ft} &= 0,3048 \text{ m}\end{aligned}$$

VELOCIDAD

$$1 \text{ km/h} = 0,62137 \text{ millas/h}$$

$$1 \text{ milla/h} = 1,6093 \text{ km/h}$$

VOLUMEN

$$\begin{aligned}1 \text{ cm}^3 &= 0,061024 \text{ in.}^3 \\1 \text{ m}^3 &= 35,315 \text{ ft}^3 \\1 \text{ L} &= 10^{-3} \text{ m}^3 \\1 \text{ L} &= 0,0353 \text{ ft}^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}1 \text{ in.}^3 &= 16,387 \text{ cm}^3 \\1 \text{ ft}^3 &= 0,028317 \text{ m}^3 \\1 \text{ gal} &= 0,13368 \text{ ft}^3 \\1 \text{ gal} &= 37854 \times 10^{-3} \text{ m}^3\end{aligned}$$

FUERZA

$$\begin{aligned}1 \text{ N} &= 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 \\1 \text{ N} &= 0,22481 \text{ lbf}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}1 \text{ lbf} &= 32,174 \text{ lb} \cdot \text{ft/s}^2 \\1 \text{ lbf} &= 4,4482 \text{ N}\end{aligned}$$

PRESIÓN

$$\begin{aligned}1 \text{ Pa} &= 1 \text{ N/m}^2 = 1,4504 \times 10^{-4} \text{ lbf/in.}^2 \\1 \text{ bar} &= 10^5 \text{ N/m}^2 \\1 \text{ atm} &= 1,01325 \text{ bar}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}1 \text{ lbf/in.}^2 &= 6894,8 \text{ Pa} \\1 \text{ lbf/in.}^2 &= 144 \text{ lbf/ft}^2 \\1 \text{ atm} &= 14,696 \text{ lbf/in.}^2\end{aligned}$$

ENERGÍA Y ENERGÍA ESPECÍFICA

$$\begin{aligned}1 \text{ J} &= 1 \text{ N} \cdot \text{m} = 0,73756 \text{ ft} \cdot \text{lbf} \\1 \text{ kJ} &= 737,56 \text{ ft} \cdot \text{lbf} \\1 \text{ kJ} &= 0,9478 \text{ Btu} \\1 \text{ kJ} &= 0,9478 \text{ Btu} \\1 \text{ kJ/kg} &= 0,42992 \text{ Btu/lb}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}1 \text{ ft} \cdot \text{lbf} &= 1,35582 \text{ J} \\1 \text{ Btu} &= 778,17 \text{ ft} \cdot \text{lbf} \\1 \text{ Btu} &= 1,0551 \text{ kJ} \\1 \text{ Btu/lb} &= 2,326 \text{ kJ/kg} \\1 \text{ Btu/lb} &= 2,326 \text{ kJ/kg} \\1 \text{ kcal} &= 4,1868 \text{ kJ}\end{aligned}$$

POTENCIA

$$\begin{aligned}1 \text{ W} &= 1 \text{ J/s} = 3,413 \text{ Btu/h} \\1 \text{ kW} &= 1,341 \text{ hp}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}1 \text{ Btu/h} &= 0,293 \text{ W} \\1 \text{ hp} &= 2545 \text{ Btu/h} \\1 \text{ hp} &= 550 \text{ ft} \cdot \text{lbf/s} \\1 \text{ hp} &= 0,7457 \text{ kW}\end{aligned}$$

CALOR ESPECÍFICO

$$\begin{aligned}1 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} &= 0,238846 \text{ Btu/lb} \cdot \text{°R} \\1 \text{ kcal/kg} \cdot \text{K} &= 1 \text{ Btu/lb} \cdot \text{°R}\end{aligned}$$

$$1 \text{ Btu/lb} \cdot \text{°R} = 4,1868 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

Constantes

CONSTANTE UNIVERSAL DE LOS GASES

$$\bar{R} = \begin{cases} 8,314 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K} \\ 1545 \text{ ft} \cdot \text{ lbf/lbmol} \cdot \text{ }^\circ\text{R} \\ 1,986 \text{ Btu/lbmol} \cdot \text{ }^\circ\text{R} \end{cases}$$

ACELERACIÓN ESTÁNDAR DE LA GRAVEDAD

$$g = \begin{cases} 9,80665 \text{ m/s}^2 \\ 32,174 \text{ ft/s}^2 \end{cases}$$

PRESIÓN ATMÓSFERICA ESTÁNDAR

$$1 \text{ atm} = \begin{cases} 1,01325 \text{ bar} \\ 14,696 \text{ lbf/in.}^2 \end{cases}$$

RELACIONES ENTRE ESCALAS DE TEMPERATURAS

$$T(^{\circ}\text{R}) = 1,8 T(\text{K})$$

$$T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273,15$$

$$T(^{\circ}\text{F}) = T(^{\circ}\text{R}) - 459,67$$

FUNDAMENTOS DE TERMODINÁMICA TÉCNICA

2 EDICIÓN

MICHAEL J. MORAN

The Ohio State University

HOWARD N. SHAPIRO

Iowa State University of Science and Technology



EDITORIAL
REVERTÉ

Barcelona · Bogotá · Buenos Aires · Caracas · México

Título de la obra original:

Fundamentals of Engineering Thermodynamics, Fourth Edition

Edición original en lengua inglesa publicada por:

John Wiley & Sons, Inc., Hoboken (NJ), USA

Copyright © John Wiley & Sons, Inc.

All Rights Reserved. Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Inc.

Edición en papel:

© Editorial Reverté, S. A., 2004, 2015, 2018

ISBN: 978-84-291-4379-9

Edición e-book (PDF):

© Editorial Reverté, S. A., 2018

ISBN: 978-84-291-9411-1

Versión española por:

José A. Turégano

y

Carmen Velasco

Esta traducción se ha basado en la correspondiente a la primera edición en español realizada por:

Jesús Guallar

Miguel Ángel Lozano

José María Marín

José Antonio Turégano

Carmen Velasco

Grupo de Didáctica en Ingeniería Térmica

Departamento de Ingeniería Mecánica

Universidad de Zaragoza

Propiedad de:

EDITORIAL REVERTÉ, S. A.

Loreto, 13-15, Local B

08029 Barcelona

Tel: (34) 93 419 33 36

reverte@reverte.com

www.reverte.com

Reservados todos los derechos. La reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, queda rigurosamente prohibida, salvo excepción prevista en la ley. Asimismo queda prohibida la distribución de ejemplares mediante alquiler o préstamo públicos, la comunicación pública y la transformación de cualquier parte de esta publicación (incluido el diseño de la cubierta) sin la previa autorización de los titulares de la propiedad intelectual y de la Editorial. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (arts. 270 y siguientes del Código Penal). El Centro Español de Derechos Reprográficos (CEDRO) vela por el respeto a los citados derechos.

Prólogo

En esta cuarta edición (segunda en español) hemos mantenido los objetivos básicos de las tres primeras ediciones:

- presentar un tratamiento completo y riguroso de la Termodinámica técnica desde el punto de vista clásico,
- proporcionar una base firme para cursos posteriores de Mecánica de Fluidos y Transferencia de Calor,
- preparar a los estudiantes de ingeniería para usar la Termodinámica en la práctica profesional.

Este libro contiene material suficiente para un curso de introducción y para un curso posterior que trate fundamentalmente las aplicaciones. Se suponen conocimientos de Física elemental y Cálculo.

Aunque la cuarta edición retiene la organización básica y el nivel de las ediciones previas, hemos introducido varias modificaciones al objeto de facilitar el aprendizaje por parte del estudiante. Se incorporan nuevos elementos de texto y características en el diseño de los contenidos para facilitar la lectura y el estudio de los materiales. Asumiendo la importancia creciente del ordenador en la práctica ingenieril, se incorpora el uso del programa informático *Interactive Thermodynamics: IT*¹ en el texto, de modo que permita a los profesores el uso de software en sus cursos. Sin embargo, la presentación se estructura de forma que quien prefiera omitir dicho material pueda hacerlo sin dificultad.

NUEVO EN LA CUARTA EDICIÓN (SEGUNDA EN ESPAÑOL)

- Nuevos elementos para facilitar el aprendizaje:
 - Cada capítulo empieza con una clara definición de sus objetivos.
 - En el margen, coordinadas con el texto, se van listando una serie de palabras clave.
 - Asimismo, *Criterio metodológico* identifica, cuando aparece al margen, las mejoras introducidas en nuestro método de resolución de problemas.
 - Cada capítulo concluye con un *Resumen del capítulo* y con una *Guía para el estudio* acompañada por una lista de palabras clave para ayudar a los estudiantes en el estudio del material.
 - Cada capítulo presenta un conjunto de cuestiones para discusión bajo el epígrafe *Cuestiones para reflexionar* que pueden responderse a título individual o en grupo para desarrollar una mayor comprensión del texto, promover el pensamiento crítico y poder resolver cuestiones tipo test.
 - Numerosos ejemplos incorporados a lo largo del texto, se identifican con la introducción “*Por ejemplo...*” Esto complementa los 141 ejemplos con la estructura formal que caracteriza el formato de resolución.

¹ **Nota del editor:** La edición española se ha ajustado considerando que dicho software no está disponible para los estudiantes. En todo caso los enunciados que se señalan como adecuados a un tratamiento informático pueden resolverse con el programa Termograf distribuido en colaboración con la editorial.

- Se incluyen más subtítulos y subdivisiones de capítulo para guiar a los estudiantes a través del material.
- Las figuras del texto proporcionan ahora representaciones más realistas de los sistemas ingenieriles del mundo real.
- Otras nuevas características:
 - Se incluyen varios nuevos ejemplos formales con un contenido atractivo para apoyar puntos que presentan dificultades comunes.
 - Ejemplos resueltos, ecuaciones clave y discusiones seleccionadas quedan claramente definidos para refuerzo. Asimismo se emplea una técnica especial para ayudar a los estudiantes a entender la conversión de unidades.
 - Los problemas de final de capítulo se han revisado ampliamente y aparecen ahora clasificados mediante epígrafes para facilitar la selección de problemas.
 - Los problemas de diseño y final abierto también han sido revisados a fondo.
 - En coherencia con la eliminación de los refrigerantes clorofluorocarbonados y del creciente interés en los refrigerantes naturales, las tablas del Refrigerante 12 han sido sustituidas por tablas del propano.
 - Se han ampliado los contenidos sobre análisis de transitorios.
 - Las tablas de gas ideal se han rediseñado para facilitar su empleo y se han incluido valores de poder calorífico superior e inferior para hidrocarburos.
 - En coherencia con los hábitos generales, el término *disponibilidad* ha sido reemplazado por *exergía*, y los símbolos se han adecuado a ello.²
 - Se ha actualizado el material para diseño ingenieril y termoeconómico.

CARACTERÍSTICAS MANTENIDAS DE LAS EDICIONES ANTERIORES

- Una presentación clara y concisa.
- Una metodología para la resolución de problemas que estimula el análisis sistemático.
- Un completo desarrollo del segundo principio de la Termodinámica, que incorpora el concepto de producción de entropía.
- Una presentación actualizada del análisis exergético, que incluye una introducción de la exergía química.
- Desarrollos consistentes de aplicaciones de la Termodinámica técnica, que incluyen ciclos de potencia y de refrigeración, psicrometría y combustión.
- Una generosa selección de problemas de final de capítulo.
- Problemas de diseño y final abierto proporcionados con distintos encabezamientos al final de cada capítulo.
- Flexibilidad en las unidades, utilizando tanto unidades SI como combinaciones de unidades SI e inglesas.³

² **Nota del traductor:** En la traducción se ha seguido el criterio de la primera edición en español, en la que ya se sustituía el término *disponibilidad*, introduciendo los cambios pertinentes en la simbología allí utilizada.

Este libro ha evolucionado a lo largo de muchos años de enseñanza de la asignatura tanto para no graduados como postgraduados. Explicaciones claras y completas, junto a numerosos ejemplos bien explicados, hacen el texto agradable y casi idóneo para el autoaprendizaje. Esto libera al profesor de la conferencia-explicación convencional, y permite dedicar el tiempo de clase a actividades más provechosas. Nuestro objetivo ha sido hacer una exposición clara y concisa sin sacrificar ningún tema. Hemos intentado hacer el material interesante y fácil de leer. Las evaluaciones favorables, tanto de los profesores como de los estudiantes que han usado las anteriores ediciones en una amplia gama de programas de ingeniería, indican que estos objetivos se han cumplido.

Enfoque sistematizado de la resolución de problemas. Otro de nuestros objetivos principales en este libro es estimular a los estudiantes a desarrollar un enfoque sistemático en la resolución de los problemas. Para ello se usa a lo largo del texto un modelo formal de análisis y resolución de los problemas que ayuda a los estudiantes a pensar sistemáticamente sobre los sistemas técnicos. La resolución comienza por un listado de las consideraciones, prosigue utilizando paso a paso los conceptos fundamentales y concluye con comentarios que identifican los aspectos clave de la solución. Las transformaciones de unidades se incluyen explícitamente en las evaluaciones numéricas. La metodología de resolución se ilustra mediante 141 ejemplos formales que se presentan diferenciados del texto principal para ser identificados fácilmente. La metodología que usamos es compatible con la de otros títulos de Wiley bien conocidos: *Introduction to Fluid Mechanics* de R. W. Fox y A. T. McDonald y *Fundamentals of Heat Transfer Mechanics* de F. P. Incropera y D. P. De Witt. Con la elección de este formato para las soluciones queda un conjunto de tres libros similares en presentación, nivel y rigor, que cubren los fundamentos de la Termodinámica, la Mecánica de Fluidos y la Transferencia de Calor, temas comunes a muchos programas de estudio.

Desarrollo completo del segundo principio. Debido al mayor interés actual en los principios de exergía y entropía que en épocas anteriores, en los Capítulos 5, 6 y 7 se incluye un tratamiento profundo del segundo principio de la Termodinámica. La importancia del segundo principio se transmite haciendo hincapié en su relación con la utilización adecuada de los recursos energéticos. Una característica especial es el uso del concepto de generación de entropía, que permite una aplicación efectiva del segundo principio a aspectos que los alumnos dominan rápidamente (Capítulo 6). Otra característica especial es una introducción actualizada al análisis exergético, incluyendo eficiencias exergéticas (Capítulo 7). Igualmente se introducen y aplican la exergía química y la exergía química estándar (Capítulo 13). Los balances de entropía y exergía se introducen y aplican de forma similar a la usada para los balances de energía desarrollados para sistemas cerrados y volúmenes de control, unificando la aplicación del primero y segundo principios. Una vez introducidos, los conceptos del segundo principio se integran a lo largo del texto en los ejemplos resueltos y los problemas de final de capítulo. La presentación se estructura de forma que los profesores que deseen omitir el tema de la exergía puedan hacerlo.

Énfasis en las aplicaciones. En las aplicaciones se ha puesto énfasis en el tratamiento adecuado y en el encadenamiento de las operaciones. Los Capítulos 8 a 14, que tratan de las aplicaciones, permiten cierta flexibilidad en el orden y la cantidad de temas a tratar. Por ejemplo, los sistemas de producción de potencia con vapor y gas se tratan en los Capítulos

³ **Nota del traductor:** En la traducción se ha orientado el uso de modo preponderante al SI. Así, se han eliminado la mayoría de los problemas formulados en unidades inglesas, muchas veces reiterativos de los referidos al SI.

8 y 9 y los sistemas de refrigeración y bomba de calor corresponden al Capítulo 10. Pero los profesores que prefieran tratar todos los ciclos de vapor juntos, pueden incluir la refrigeración por absorción y por compresión de vapor en el Capítulo 8. Los sistemas energéticos más avanzados e innovadores, tales como los sistemas de cogeneración, ciclos combinados y ciclos de refrigeración se incorporan a lo largo de los Capítulos 8 a 10, allí donde encajan de manera lógica, y no se relegan a un capítulo final específico. Como el estudio de los flujos de gas está relacionado de manera natural con los temas de turbinas de gas y motores de propulsión, en el Capítulo 9 se incluye una introducción al flujo compresible unidimensional. Los capítulos que tratan de las aplicaciones proporcionan ejemplos del uso de los principios de la exergía.

Amplia variedad de problemas de final de capítulo. Se han reemplazado o revisado numerosos problemas de final de capítulo (véase nota 2), que ahora aparecen clasificados bajo cabeceras para facilitar la selección. Los problemas se organizan secuencialmente en correlación con la materia introducida y en orden creciente de dificultad. Van desde ejercicios sencillos, que ilustran conceptos básicos, hasta problemas más complejos que pueden incluir sistemas con varios componentes. Se ha realizado un esfuerzo especial para incluir problemas que incluyen una organización superior y precisan de un pensamiento crítico. Se pide a los estudiantes la construcción de gráficos, el análisis de tendencias y la discusión de lo que observan; con ello se estimulan las habilidades analíticas y se impulsa el desarrollo de una visión ingenieril. Se han incluido un cierto número de problemas para los que se recomienda el uso de ordenador y que se identifican con un icono de ordenador personal.

Énfasis en el diseño. Como continuación en el énfasis puesto en ediciones previas sobre la componente de diseño que debe contener el curriculum ingenieril, hemos ampliado los aspectos relacionados con el diseño aún más en la presente edición. Así, se ha revisado en torno a un tercio de los problemas de diseño o final abierto incluidos al final de cada capítulo. También se ha incluido material actualizado sobre diseño ingenieril, y termoeconomía en la Sección 1.7: Diseño y análisis ingenieril, y en la Sección 7.7: Termoeconomía. En la Sección 1.7 destacamos que el diseño, por naturaleza, es un proceso exploratorio y que los lectores no deben esperar que los problemas de diseño tengan una respuesta clara y simple. Más bien, el análisis de restricciones debe considerarse al objeto de seleccionar la mejor opción entre un cierto número de alternativas. La Sección 7.7 inicia en la importancia de los condicionantes económicos en el diseño. El tema se inicia en el contexto del diseño y encaja de manera natural con el tratamiento de la exergía en el Capítulo 7, en el que se asocian las irreversibilidades con el coste.

Problemas de diseño real y de final abierto. La presente edición incluye hasta diez problemas de diseño o final abierto por capítulo. Estos problemas proporcionan breves experiencias en diseño que ofrecen a los estudiantes la oportunidad para desarrollar su creatividad y juicio ingenieril, formular criterios en tareas de diseño, aplicar restricciones reales y considerar alternativas. El énfasis fundamental de los problemas de diseño y final abierto se hace sobre la temática del texto, pero los estudiantes pueden necesitar adicionales consultas antes de poder definir una alternativa. Los profesores pueden elegir reducir el objetivo de los problemas para permitir alcanzar resultados con esfuerzos modestos, o pueden decidir usar los problemas como punto de partida para trabajos de grupo más extensos. Una característica importante de muchos de los problemas de diseño y final abierto es que se requiere de los estudiantes el desarrollo de sus habilidades de comunicación para presentar los resultados en forma de informes escritos, memoranda, esquemas y gráficas.

Flexibilidad en las unidades. El texto se ha escrito para permitir flexibilidad en el uso de las unidades. Puede ser estudiado usando sólo unidades del sistema internacional, o *combinando* el uso de unidades inglesas y unidades SI. A lo largo del texto se refuerza el uso adecuado de los factores de conversión de unidades. En esta edición, los factores de conversión se establecen mediante un sistema especial que ayuda a los estudiantes a identificar la conversión de unidades. La constante de conversión fuerza-masa, g_c , se trata implícitamente y las ecuaciones en las que intervienen la energía cinética y potencial se tratan consistentemente independientemente del sistema de unidades usado.

Otros aspectos. El texto presenta otras características especiales. Entre ellas están:

- El tratamiento del primer principio de la Termodinámica en el Capítulo 2 comienza con los conceptos de energía y trabajo, que resultan ya familiares a los estudiantes desde cursos de Física e Ingeniería mecánica anteriores, y procede operativamente hasta el balance de energía de los sistemas cerrados. Los ciclos termodinámicos se introducen en el Capítulo 2, junto con la definición de rendimiento térmico de los ciclos de potencia y coeficientes de operación de refrigeradores y bombas de calor. Esto permite la resolución de problemas elementales de ciclos, usando el primer principio, antes de tratarlos en profundidad en capítulos posteriores.
- En el Capítulo 3 se introducen las relaciones entre propiedades y los datos de sustancias puras, simples y compresibles, *después* de haber desarrollado el concepto de energía en el Capítulo 2. Esta ordenación tiene las siguientes ventajas:
 - refuerza el hecho de que el concepto de energía se aplica a todos los sistemas en general y no se limita a los casos de sustancias compresibles puras.
 - proporciona al profesor la oportunidad de despertar el interés de los alumnos a medida que estudian el Capítulo 2, asignándoles problemas elementales sobre análisis energéticos desde el comienzo del curso.
 - permite que los alumnos alcancen una mayor práctica en la aplicación del concepto de energía mientras aprenden, en el Capítulo 3, las relaciones entre propiedades y el empleo de datos.
- En el Capítulo 3 introducimos los datos y relaciones entre propiedades para el gas ideal usando el factor de compresibilidad como punto de partida y *continuamos* con la discusión de las tablas de vapor. Esta organización de los temas pone de manifiesto a los estudiantes, generalmente por primera vez, las limitaciones del modelo del gas ideal. Al utilizar este modelo, insistimos en que los calores específicos varían generalmente con la temperatura e incorporamos el uso de las tablas. Las relaciones con calores específicos constantes se presentan también y se emplean de manera apropiada. Creemos que los estudiantes deben aprender cuándo es adecuado utilizar valores constantes para los calores específicos y que ello les ayuda a interpretar que estos valores constantes corresponden a un caso especial.
- En el Capítulo 4 los principios de conservación de la masa y la energía se extienden a los volúmenes de control. El énfasis primordial se pone en los casos en que se supone flujo unidimensional, pero también se presentan los balances de masa y energía en formas integradas que permiten enlazar con temas que se tratarán en cursos posteriores de Mecánica de Fluidos y Transferencia de Calor. Los volúmenes de control se tratan en estado estacionario, pero también se discuten a fondo los casos transitorios. Tanto si los problemas son de carácter transitorio o estacionario, los modelos termodinámicos correspondientes se deducen a partir de las expresiones generales de los principios de conservación de la masa y la energía.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los muchos usuarios de nuestras previas ediciones, pertenecientes a más de cien universidades y colegios de los Estados Unidos, Canadá, y otros países, su contribución a esta revisión a través de sus comentarios y crítica constructiva. Debemos un agradecimiento especial al profesor Ron Nelson, Iowa State University, por actualizar *Interactive Thermodynamics: IT* y desarrollar su manual de usuario. También damos las gracias a la Dra. Margaret Drake, The Ohio State University, por su contribución en materiales suplementarios, al profesor P. E. Liley, Purdue University School of Mechanical Engineering, por su asesoramiento sobre datos de propiedades, y al profesor George Tsatsaronis, Technische Universität Berlin, por sus consejos en relación con la termoeconomía.

Agradecemos también a Joseph Hayton, nuestro editor, y muchos otros en John Wiley & Sons, Inc., organización en la que han aportado su talento y energía para esta edición. En especial nuestro reconocimiento al finado Clifford Robichaud, nuestro editor durante varios años, cuya visión e incansable soporte están presentes en esta edición, y de cuyo humor y espíritu emprendedor lamentamos la pérdida.

Nos sentimos especialmente gratificados por el buen recibimiento que este libro ha tenido, y esperamos que las mejoras introducidas en esta edición sirvan para una presentación aún más eficaz. Apreciaremos profundamente sus comentarios, críticas y sugerencias.

*Michael J. Moran
Howard N. Shapiro*

Índice analítico

PARA EMPEZAR: CONCEPTOS Y DEFINICIONES 1

1

- 1.1 El uso de la termodinámica 1
- 1.2 Definición de los sistemas 3
- 1.3 Descripción de los sistemas y de su comportamiento 5
- 1.4 Medida de masa, longitud, tiempo y fuerza 9
- 1.5 Dos propiedades mensurables: volumen específico y presión 13
- 1.6 Medida de la temperatura 18
- 1.7 Diseño y análisis en ingeniería 24
- 1.8 Cómo utilizar este libro con eficacia 28
- 1.9 Resumen del capítulo y guía para el estudio 29

LA ENERGÍA Y LA PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA 35

2

- 2.1 Concepto mecánico de la energía 35
- 2.2 Energía transferida mediante trabajo 39
- 2.3 Energía de un sistema 52
- 2.4 Transferencia de energía por calor 56
- 2.5 El balance de energía para sistemas cerrados 60
- 2.6 Análisis energético de ciclos 73
- 2.7 Resumen del capítulo y guía para el estudio 76

PROPIEDADES DE UNA SUSTANCIA PURA, SIMPLE Y COMPRESIBLE 85

3

- 3.1 Definición del estado termodinámico 85

EVALUACIÓN DE PROPIEDADES: CONSIDERACIONES GENERALES 86

- 3.2 La relación $p-v-T$ 87
- 3.3 El cálculo de las propiedades termodinámicas 93
- 3.4 Gráfica generalizada de compresibilidad 113

CÁLCULO DE PROPIEDADES CON EL MODELO DE GAS IDEAL 119

- 3.5 El modelo de gas ideal 120
- 3.6 Energía interna, entalpía y calores específicos de gases ideales 122
- 3.7 Cálculo de Δu y Δh en gases ideales 125
- 3.8 Procesos politrópicos de un gas ideal 133
- 3.9 Resumen del capítulo y guía para el estudio 135

4 ANÁLISIS ENERGÉTICO EN UN VOLUMEN DE CONTROL 143

- 4.1 Conservación de la masa para un volumen de control 143
- 4.2 Conservación de la energía para un volumen de control 152
- 4.3 Análisis de volúmenes de control en estado estacionario 157
- 4.4 Análisis de transitorios 180
- 4.5 Resumen del capítulo y guía para el estudio 191

5 EL SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA 201

- 5.1 Utilización del segundo principio 201
- 5.2 Formulaciones del segundo principio 205
- 5.3 Identificación de irreversibilidades 207
- 5.4 Aplicación del segundo principio a los ciclos termodinámicos 213
- 5.5 La escala Kelvin de temperatura 219
- 5.6 Medidas del rendimiento máximo para ciclos que operan entre dos reservorios 222
- 5.7 El ciclo de Carnot 227
- 5.8 Resumen del capítulo y guía para el estudio 230

6 LA ENTROPÍA Y SU UTILIZACIÓN 237

- 6.1 La desigualdad de clausius 237
- 6.2 Definición de variación de entropía 240
- 6.3 Obtención de valores de entropía 241
- 6.4 Variación de entropía en procesos internamente reversibles 249
- 6.5 Balance de entropía para sistemas cerrados 253
- 6.6 Balance de entropía para volúmenes de control 266
- 6.7 Procesos isoentrópicos 276
- 6.8 Rendimientos isoentrópicos de turbinas, toberas, compresores y bombas 279
- 6.9 Transferencia de calor y trabajo en procesos de flujo estacionario internamente reversibles 292
- 6.10 Resumen del capítulo y guía para el estudio 296

7 ANÁLISIS EXERGÉTICO 309

- 7.1 Introducción a la exergía 309
- 7.2 Definición de exergía 310
- 7.3 Balance de exergía para un sistema cerrado 322
- 7.4 Exergía de flujo 330
- 7.5 Balance de exergía para volúmenes de control 334
- 7.6 Eficiencia exergética (segundo principio) 346
- 7.7 Termoeconomía 353
- 7.8 Resumen del capítulo y guía para el estudio 360

8

**INSTALACIONES DE PRODUCCIÓN DE POTENCIA
MEDIANTE VAPOR 373**

- 8.1 Las instalaciones de potencia de vapor 373
- 8.2 Análisis de las instalaciones de potencia con vapor: el ciclo Rankine 375
- 8.3 Para mejorar el funcionamiento: sobrecalentamiento y recalentamiento 389
- 8.4 Para mejorar el rendimiento: el ciclo de potencia regenerativo 396
- 8.5 Otros aspectos del ciclo de vapor 407
- 8.6 Estudio de un caso: balance exergético de una planta de potencia 410
- 8.7 Resumen del capítulo y guía para el estudio 418

9

**INSTALACIONES DE PRODUCCIÓN DE POTENCIA
MEDIANTE GAS 427**
MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA 427

- 9.1 Terminología de motores 428
- 9.2 El ciclo Otto de aire-estándar 430
- 9.3 El ciclo diesel de aire-estándar 436
- 9.4 El ciclo dual de aire-estándar 440

CENTRALES ELÉCTRICAS DE TURBINA DE GAS 444

- 9.5 Las centrales de turbina de gas 444
- 9.6 El ciclo Brayton de aire-estándar 445
- 9.7 Turbinas de gas regenerativas 456
- 9.8 Turbinas de gas regenerativas con recalentamiento y refrigeración 461
- 9.9 Turbinas de gas para propulsión aérea 472
- 9.10 Ciclo combinado turbina de gas-ciclo de vapor 477
- 9.11 Los ciclos Ericsson y Stirling 484

FLUJO COMPRESIBLE EN TOBERAS Y DIFUSORES 485

- 9.12 Aspectos preliminares del flujo compresible 485
- 9.13 Flujo unidimensional estacionario en toberas y difusores 490
- 9.14 Flujo de gases ideales con valores específicos constantes en toberas y difusores 497
- 9.15 Resumen del capítulo y guía para el estudio 505

10

SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN Y BOMBA DE CALOR 515

- 10.1 Sistemas de refrigeración con vapor 515
- 10.2 Análisis de los sistemas de refrigeración por compresión de vapor 518
- 10.3 Propiedades de los refrigerantes 527
- 10.4 Sistemas de compresión de vapor en cascada y multietapa 529
- 10.5 Refrigeración por absorción 531
- 10.6 Bomba de calor 534
- 10.7 Sistemas de refrigeración con gas 536
- 10.8 Resumen del capítulo y guía para el estudio 543

11 RELACIONES TERMODINÁMICAS 551

- 11.1 Ecuaciones de estado 551
- 11.2 Relaciones matemáticas importantes 559
- 11.3 Deducción de relaciones entre propiedades 563
- 11.4 Cálculo de las variaciones de entropía, energía interna y entalpía 569
- 11.5 Otras relaciones termodinámicas 579
- 11.6 Construcción de tablas de propiedades termodinámicas 586
- 11.7 Gráficas generalizadas para la entalpía y la entropía 592
- 11.8 Relaciones p - v - t para mezclas de gases 600
- 11.9 Estudio de sistemas multicomponentes 605
- 11.10 Resumen del capítulo y guía para el estudio 620

12 MEZCLAS NO REACTIVAS DE GASES IDEALES Y PSICROMETRÍA 629

MEZCLAS DE GASES IDEALES: CONSIDERACIONES GENERALES 629

- 12.1 Descripción de la composición de la mezcla 629
- 12.2 Relaciones p - v - t en mezclas de gases ideales 634
- 12.3 Cálculo de U , H , S y calores específicos 637
- 12.4 Análisis de sistemas que contienen mezclas 639

APLICACIÓN A LA PSICROMETRÍA 653

- 12.5 Principios básicos de la psicrometría 653
- 12.6 Aplicación de los balances de masa y energía a los sistemas de acondicionamiento de aire 662
- 12.7 Las temperaturas de saturación adiabática y de bulbo húmedo 667
- 12.8 Diagramas psicrométricos 671
- 12.9 Análisis de procesos de acondicionamiento de aire 674
- 12.10 Resumen del capítulo y guía para el estudio 690

13 MEZCLAS REACTIVAS Y COMBUSTIÓN 701

FUNDAMENTOS DE LA COMBUSTIÓN 701

- 13.1 El proceso de combustión 701
- 13.2 Conservación de la energía en sistemas reactivos 711
- 13.3 Cálculo de la temperatura adiabática de llama 725
- 13.4 Entropía absoluta y tercer principio de la termodinámica 729
- 13.5 Células de combustible 736

EXERGÍA QUÍMICA 738

- 13.6 Introducción a la exergía química 738
- 13.7 Exergía química estándar 743
- 13.8 Resumen sobre la exergía 748
- 13.9 Eficiencia exergética de los sistemas reactivos 751
- 13.10 Resumen del capítulo y guía para el estudio 755

14

EQUILIBRIO QUÍMICO Y DE FASES 765

CONSIDERACIONES PRELIMINARES SOBRE EL EQUILIBRIO 765

14.1 Introducción de los criterios de equilibrio 765

EQUILIBRIO QUÍMICO 770

14.2 Ecuación del equilibrio de reacción 770

14.3 Cálculo de la composición de equilibrio 773

14.4 Ejemplos adicionales del uso de la constante de equilibrio 783

EQUILIBRIO DE FASES 794

14.5 Equilibrio entre dos fases de una sustancia pura 794

14.6 Equilibrio en sistemas multicomponentes y multifásicos 795

14.7 Resumen del capítulo y guía para el estudio 801

APÉNDICES 808

Índice de tablas 808

Índice de figuras y gráficos 856

A

RESPUESTAS A PROBLEMAS SELECCIONADOS 864

ÍNDICE ALFABÉTICO 867

PARA EMPEZAR: CONCEPTOS Y DEFINICIONES

1

Introducción...

La palabra Termodinámica procede de las palabras del griego *therme* (calor) y *dynamis* (fuerza). Aunque varios aspectos de lo que ahora se conoce como Termodinámica han sido objeto de interés desde la antigüedad, el estudio formal de la Termodinámica empezó en los comienzos del siglo XIX a partir de las consideraciones sobre la potencia motriz del *calor*: la capacidad de los cuerpos calientes para producir *trabajo*. Hoy su alcance es mucho mayor, teniendo que ver, en general, con la *energía* y con las relaciones entre las *propiedades* de la materia.

La Termodinámica es tanto una rama de la Física como una ciencia de la ingeniería. El científico está normalmente interesado en alcanzar una comprensión de los fundamentos del comportamiento físico y químico de la materia en reposo y en cantidades determinadas y utiliza los principios de la Termodinámica para relacionar sus propiedades. Los ingenieros están interesados, en general, en estudiar *los sistemas* y cómo éstos interaccionan con su *entorno*; y para facilitar esta tarea extienden el objeto de la Termodinámica al estudio de sistemas a través de los cuales fluye materia.

El **objetivo del capítulo** es introducir al estudiante en algunos de los conceptos y definiciones fundamentales que utilizaremos en nuestro estudio de la Termodinámica técnica. En la mayor parte de los casos la introducción es breve, dejando para capítulos posteriores una exposición más amplia.

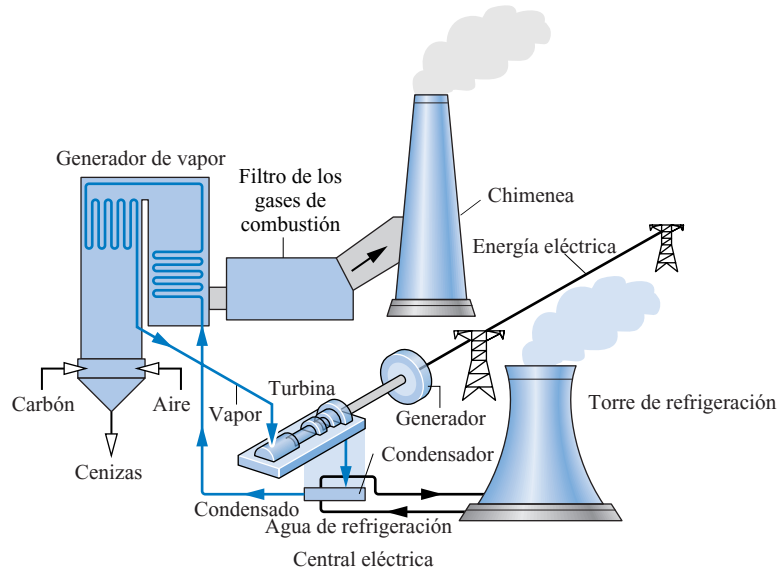
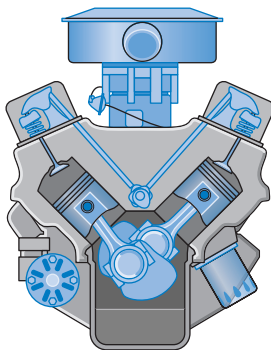
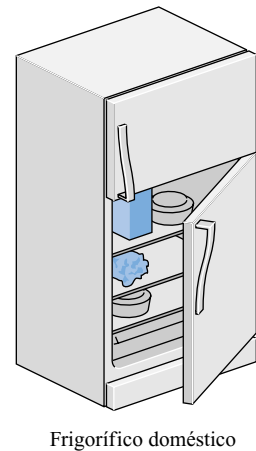
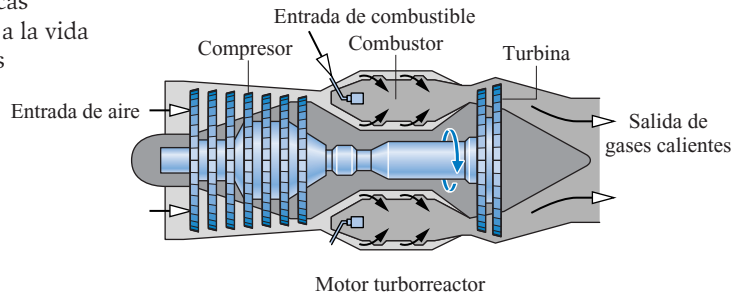
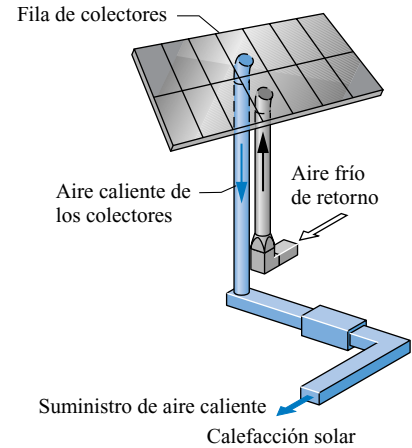
objetivo del capítulo

1.1 EL USO DE LA TERMODINÁMICA

Los ingenieros utilizan los principios derivados de la Termodinámica y otras ciencias de la ingeniería, tales como la Mecánica de fluidos y la Transferencia de calor y masa, para analizar y diseñar objetos destinados a satisfacer las necesidades humanas. El vasto campo de aplicación de estos principios se muestra en la Tabla 1.1, que recoge algunas de las áreas en las que la Termodinámica técnica es importante. Los ingenieros buscan perfeccionar los diseños y mejorar el rendimiento, para obtener como consecuencia el aumento en la producción de algún producto deseado, la reducción del consumo de un recurso escaso, una disminución en los costes totales o un menor impacto ambiental. Los principios de la Termodinámica juegan un papel importante a la hora de alcanzar estos objetivos.

Tabla 1.1 Áreas específicas de aplicación de la Termodinámica Técnica

- Motores de automoción
- Turbinas
- Compresores, bombas
- Centrales eléctricas de combustible fósil y nuclear
- Sistemas de propulsión para aviones y cohetes
- Sistemas de combustión
- Sistemas criogénicos, de separación y condensación de gases
- Sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado
 - Refrigeración por compresión de vapor y absorción
 - Bombas de calor
- Refrigeración de equipos electrónicos
- Sistemas de energías alternativas
 - Células de combustible
 - Dispositivos termoeléctricos y termoiónicos
 - Convertidores magnetohidrodinámicos (MHD)
 - Sistemas solares activos de calefacción, refrigeración y producción de electricidad
 - Sistemas geotérmicos
 - Producción de electricidad mediante olas, mareas y por desequilibrio térmico oceánico
 - Energía eólica
- Aplicaciones biomédicas
 - Sistemas de apoyo a la vida
 - Órganos artificiales



1.2 DEFINICIÓN DE LOS SISTEMAS

Una etapa importante de cualquier análisis de ingeniería consiste en describir con precisión lo que va a ser estudiado. En Mecánica, si se pretende determinar el movimiento de un cuerpo, el primer paso consiste normalmente en definir un *cuerpo libre* e identificar todas las fuerzas que otros cuerpos ejercen sobre él. Después se aplica la segunda ley de Newton para el movimiento. En Termodinámica se utiliza el término *sistema* para identificar el objeto de nuestro análisis. Una vez que el sistema está definido y se han establecido las interacciones relevantes con otros sistemas es el momento de aplicar una o más leyes físicas o relaciones.

Un *sistema* es cualquier cosa que deseemos estudiar, algo tan simple como un cuerpo libre o tan complejo como una refinería petroquímica completa. Podemos querer estudiar la cantidad de materia contenida dentro de un tanque cerrado por paredes rígidas o bien considerar algo como una tubería de gas a través de la cual fluye materia. Incluso el vacío, que no contiene materia, puede ser objeto de interés. La composición de la materia en el interior del sistema puede ser fija o puede cambiar mediante reacciones químicas o nucleares. La forma o volumen del sistema analizado no es necesariamente constante, como sucede con un cilindro que contiene gas y es comprimido por un pistón, o con un globo cuando se hincha

Cualquier cosa externa al sistema se considera una parte del *entorno* del sistema. El sistema se distingue de su entorno, o alrededores, por un *límite* específico, la *frontera* que puede estar en reposo o en movimiento. Veremos que las interacciones entre un sistema y su entorno, que tienen lugar a través de dicha frontera, juegan un papel importante en la Termodinámica técnica, siendo esencial que la frontera esté definida cuidadosamente antes de proceder a cualquier análisis termodinámico. Sin embargo, puesto que los mismos fenómenos físicos pueden ser analizados a menudo en términos de diferentes elecciones de sistema, frontera y entorno, la elección de un determinado límite para definir un sistema concreto estará condicionada por aquello que nos permita el correspondiente análisis de acuerdo con nuestro interés.

TIPOS DE SISTEMAS

A lo largo del libro se distinguirán dos tipos básicos de sistemas. A ellos nos referiremos respectivamente como *sistemas cerrados* y *volúmenes de control*. Un sistema cerrado consiste en una cantidad fija de materia, por lo que también recibe el nombre de *masa de control*, mientras que un volumen de control o *sistema abierto* es una región del espacio a través de la cual puede fluir masa.

Un *sistema cerrado* se define como una cantidad determinada de materia. Dado que un sistema cerrado contiene siempre la misma materia, esto implica que no hay transferencia de masa a través de su frontera. Un *sistema aislado* es un tipo especial de sistema cerrado que no interactúa en ninguna forma con el entorno.

La Fig. 1.1 muestra un gas en un dispositivo cilindro–pistón. Consideraremos al gas como un sistema cerrado. La frontera se sitúa exactamente junto a las paredes internas del dispositivo cilindro–pistón, como muestran las líneas de puntos de la figura. Si el cilindro se colocara sobre una llama, el gas se expandiría elevando el pistón. La parte de frontera entre el gas y el pistón se mueve con éste. No hay masa cruzando ni ésta ni cualquier otra parte de la frontera.

El análisis termodinámico sobre dispositivos tales como bombas y turbinas a través de los que fluye masa se hará en sucesivas secciones de este libro. Estos análisis pueden hacerse, en principio, estudiando una cantidad determinada de materia, un sistema

sistema

entorno
frontera

sistema cerrado

sistema aislado

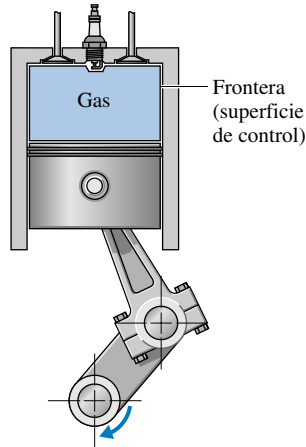


Figura 1.1 Ejemplo de sistema cerrado (masa de control). Gas contenido en un dispositivo cilindro-pistón.

volumen de control

cerrado, que pasa a través del dispositivo. En la mayor parte de los casos, sin embargo, es más sencillo pensar en términos de una región dada del espacio a través de la cual fluye masa. Con este enfoque, el objeto de estudio es una *región* dentro de unos límites definidos. La región se llama **volumen de control**. La masa puede cruzar la frontera de un volumen de control.

En la Fig. 1.2 se recoge el diagrama esquemático de un motor. La línea de puntos alrededor del motor define un volumen de control. Observemos que el combustible, el aire y los gases de escape cruzan la frontera. El esquema 1.2(a) se suele reducir en el análisis ingenieril al esquema 1.2(b).

Como ya se ha señalado, a veces se utiliza el término *masa de control* en lugar del de sistema cerrado y también se usa el término *sistema abierto* como equivalente al de volumen de control. Cuando se emplean los términos masa de control y volumen de control, la frontera del sistema recibe, a menudo, el nombre de *superficie de control*.

En general, la elección de los límites de un sistema se basa en las dos consideraciones siguientes: (1) lo que conocemos del posible sistema, en particular en sus límites y (2) el objetivo del análisis. *Por ejemplo...* la Figura 1.3 muestra un esquema de un compresor de aire conectado a un depósito. La frontera del sistema mostrada en la figura encierra el compresor, el depósito y las tuberías. Este límite podría seleccionarse si se conociera el

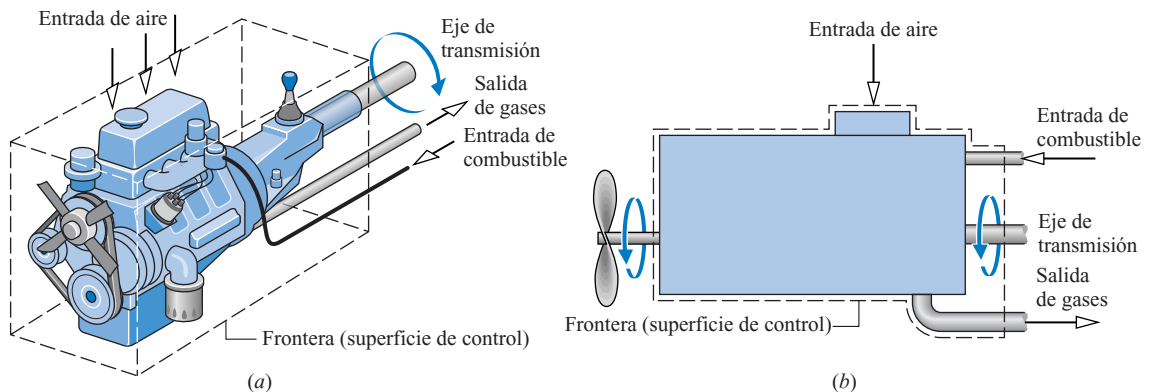


Figura 1.2 Ejemplo de volumen de control (sistema abierto). Motor de un automóvil.

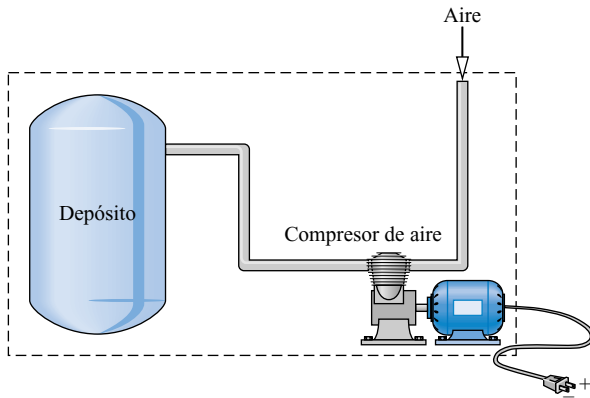


Figura 1.3 Compresor de aire y depósito de almacenamiento.

valor de la energía eléctrica suministrada y los objetivos del análisis fueran determinar cuánto tiempo debe trabajar el compresor para elevar la presión del depósito a un determinado valor. Puesto que la masa atraviesa los límites, el sistema será un volumen de control. Se podría seleccionar un volumen de control que encerrase sólo al compresor si el objetivo fuera determinar la energía eléctrica necesaria. ▲

1.3 DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS Y DE SU COMPORTAMIENTO

Los ingenieros están interesados en estudiar los sistemas y cómo interaccionan con el entorno. En esta sección introducimos diversos términos y conceptos que se utilizan para describir los sistemas y cómo se comportan.

PERSPECTIVA MACROSCÓPICA Y MICROSCÓPICA DE LA TERMODINÁMICA

Los sistemas pueden estudiarse desde un punto de vista macroscópico o microscópico. El enfoque macroscópico de la Termodinámica tiene que ver con un comportamiento global, de conjunto. Esta es la llamada a veces *Termodinámica clásica*. En ella no se usa directamente ningún modelo de la estructura de la materia en sus niveles molecular, atómico o subatómico. Aunque el comportamiento del sistema se ve afectado por la estructura molecular, la Termodinámica clásica permite analizar aspectos importantes de su comportamiento a partir de observaciones del sistema en su conjunto.

La aproximación microscópica a la Termodinámica, conocida como *Termodinámica estadística*, tiene que ver directamente con la estructura de la materia. El objetivo de la Termodinámica estadística es caracterizar mediante valores estadísticos el comportamiento promedio de las partículas que constituyen el sistema de interés y relacionar esta información con el comportamiento macroscópico observado para el sistema.

Para aplicaciones relacionadas con láseres, plasmas, flujos de gas a alta velocidad, cinética química, temperaturas muy bajas (criogénicas), y otras, los métodos de la Termodinámica estadística resultan esenciales. Asimismo, la aproximación microscópica es fundamental para obtener datos sobre ciertas propiedades, como por ejemplo los calores específicos de gases ideales (Sec. 3.6). Sin embargo, para la gran mayoría de las aplicaciones en ingeniería la Termodinámica clásica no sólo proporciona una aproximación considerablemente más directa para el análisis y el diseño, sino que también requiere muchas menos complicaciones matemáticas. Por esta razón el punto de vista macroscópico es el

adoptado en este libro. Sin embargo, cuando ello sirva para ayudar a la comprensión, los conceptos se interpretarán desde el punto de vista microscópico. Finalmente, señalemos que los efectos relativistas no son significativos para los sistemas que se estudian en este libro.

PROPIEDAD, ESTADO Y PROCESO

propiedad

Para describir un sistema y predecir su comportamiento necesitamos conocer un conjunto de propiedades y cómo se relacionan entre sí. Las *propiedades* son características macroscópicas de un sistema tales como masa, volumen, energía (Sec. 2.3), presión (Sec. 1.5) y temperatura (Sec. 1.6) a las que pueden asignarse valores numéricos en un instante dado, sin un conocimiento previo de la *historia* del sistema. Consideraremos muchas otras propiedades a lo largo de nuestro estudio de la Termodinámica técnica. La Termodinámica también trata con magnitudes que no son propiedades, tales como el flujo de masa y la transferencia de energía por trabajo y calor. En los capítulos siguientes se dan más ejemplos de este tipo de magnitudes. En breve se explicará un procedimiento para distinguir las magnitudes que son propiedades de las que no lo son.

estado

La palabra *estado* expresa la condición de un sistema definida por el conjunto de sus propiedades. Puesto que normalmente existen relaciones entre dichas propiedades, el estado puede especificarse, a menudo, suministrando los valores de un subconjunto de las mismas. Todas las demás propiedades pueden determinarse a partir de ese subconjunto.

proceso

Cuando cualquiera de las propiedades de un sistema cambia, su estado cambia y se dice que el sistema ha sufrido un *proceso*. Un proceso es una transformación de un estado a otro. Sin embargo, si un sistema muestra los mismos valores de sus propiedades en dos instantes diferentes, estará en el mismo estado en dichos instantes. Diremos que un sistema está en un *estado estacionario* si ninguna de sus propiedades cambia con el tiempo.

estado estacionario ciclo termodinámico

Un *ciclo termodinámico* es una secuencia de procesos que empieza y termina en el mismo estado. Al final de un ciclo todas las propiedades tienen los mismos valores que tenían al principio. En consecuencia, el sistema no experimenta cambio de estado alguno al finalizar el ciclo. Los ciclos que se repiten periódicamente juegan un papel prominente en muchas áreas de interés. Por ejemplo, el vapor que circula a través de una planta de generación de electricidad recorre un ciclo.

Cada propiedad tiene, en un estado concreto, un valor definido que puede asignarse sin conocer cómo ha llegado el sistema a tal estado. Por tanto, el cambio en el valor de una propiedad, cuando el sistema pasa de un estado a otro, queda determinado exclusivamente por los estados inicial y final y es independiente de la forma concreta en la que ha ocurrido el cambio de estado. Es decir, el cambio es independiente de los detalles, o *historia*, del proceso. A la inversa, si el valor de una magnitud es independiente del proceso entre dos estados reflejará, entonces, el cambio en una propiedad. Esto proporciona un test que es condición necesaria y suficiente para determinar si una magnitud es una propiedad: *Una magnitud es una propiedad si, y sólo si, su cambio de valor entre dos estados es independiente del proceso.* Se deduce de esto que si el valor de una magnitud particular depende de los detalles del proceso y no solamente de los estados inicial y final, tal magnitud no puede ser una propiedad.

PROPIEDADES EXTENSIVAS E INTENSIVAS

propiedad extensiva

Las propiedades termodinámicas pueden clasificarse en dos categorías generales: extensivas e intensivas. Una propiedad se llama *propiedad extensiva* si su valor para un sistema es la suma de los valores correspondientes a las partes en que se subdivide. La masa, el volu-

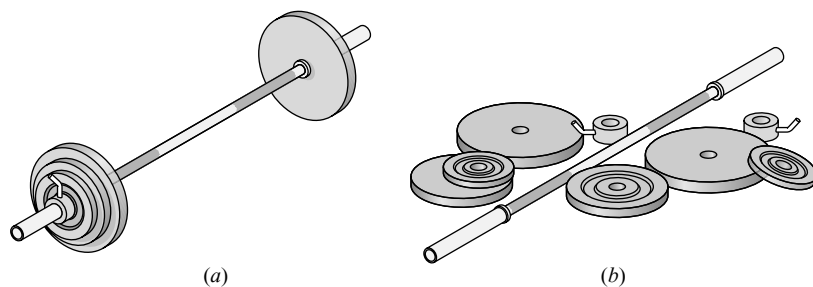


Figura 1.4 Figura utilizada para analizar el concepto de propiedad extensiva.

men, la energía y otras propiedades que se introducirán más tarde son propiedades extensivas y dependen, por tanto, del tamaño o extensión de un sistema. Las propiedades extensivas pueden cambiar con el tiempo y muchos análisis termodinámicos consisten fundamentalmente en un balance cuidadoso de los cambios en propiedades extensivas tales como la masa y la energía cuando el sistema interacciona con su entorno.

Las **propiedades intensivas** no son aditivas en el sentido señalado previamente. Sus valores son independientes del tamaño o extensión de un sistema y pueden variar de un sitio a otro dentro del sistema en un instante dado. Así, las propiedades intensivas pueden ser función de la posición y del tiempo, mientras que las propiedades extensivas varían fundamentalmente con el tiempo. El volumen específico (Sec. 1.5), la presión y la temperatura son propiedades intensivas importantes; otras variables intensivas irán apareciendo en sucesivos capítulos.

propiedad intensiva

Por ejemplo... para ilustrar la diferencia entre propiedades extensivas e intensivas consideraremos una cantidad de materia que sea uniforme en temperatura, e imaginaremos que se compone de varias partes, como muestra la Fig.1.4. La masa del conjunto es la suma de las masas de cada parte y lo mismo sucede con el volumen. Por el contrario, la temperatura del conjunto no es la suma de las temperaturas de las partes, sino que es la misma que la de cada parte. La masa y el volumen son propiedades extensivas, mientras que la temperatura es una propiedad intensiva. ▲

FASE Y SUSTANCIA PURA

El término **fase** se refiere a la cantidad de materia que es homogénea en toda su extensión tanto en la composición química como en la estructura física. Homogeneidad en la estructura física significa que la materia es toda ella *sólida*, o toda *líquida*, o toda *vapor* (o, equivalentemente, toda *gas*). Un sistema puede contener una o más fases. Por ejemplo, un sistema formado por agua líquida y vapor de agua contiene *dos* fases. Cuando hay más de una fase, éstas están separadas por los *límites de las fases*. Nótese que los gases oxígeno y nitrógeno, por ejemplo, pueden mezclarse en cualquier proporción para formar una *única* fase gaseosa. Ciertos líquidos, tales como alcohol y agua, pueden mezclarse para formar una *única* fase. Pero líquidos como el aceite y el agua, que no son miscibles, forman *dos* fases líquidas.

fase

Sustancia pura es aquella que es uniforme e invariable en su composición química. Una sustancia pura puede existir en más de una fase, pero su composición química debe ser la misma en cada fase. Por ejemplo, si el agua líquida y el vapor de agua forman un sistema con dos fases, el sistema puede considerarse una sustancia pura porque cada fase tiene la

sustancia pura

misma composición. Una mezcla uniforme de gases puede considerarse una sustancia pura suponiendo que se mantiene como gas y no reacciona químicamente. En el Cap. 13 se considerarán los cambios en la composición debidos a reacciones químicas. Un sistema formado por aire puede considerarse una sustancia pura mientras sea una mezcla de gases, pero si se produce una fase líquida enfriándolo, el líquido tendrá una composición diferente de la de la fase gaseosa y el sistema no podrá ya considerarse una sustancia pura.

EQUILIBRIO

equilibrio

La Termodinámica clásica pone su mayor énfasis en los estados de equilibrio y en los cambios de un estado de equilibrio a otro. Así, el concepto de *equilibrio* es fundamental. En Mecánica, equilibrio implica una condición de balance mantenido por una igualdad de fuerzas opuestas. En Termodinámica, el concepto es más amplio e incluye no sólo un balance de fuerzas, sino también un balance de otras influencias. Cada tipo de influencia se refiere a un aspecto particular o total del equilibrio termodinámico. De acuerdo con esto, deben existir varios tipos de equilibrio parcial para satisfacer la condición de equilibrio completo; dichos equilibrios son el mecánico, el térmico, el de fases y el químico. Los criterios para estos cuatro tipos de equilibrio se considerarán en apartados posteriores. Por ahora podemos establecer un modo de comprobar si un sistema está en equilibrio termodinámico mediante el siguiente procedimiento: aislamos el sistema de su entorno y esperamos para comprobar cambios en sus propiedades observables. Si no hay cambios puede concluirse que el sistema estaba en equilibrio en el instante en que lo hemos aislado. Puede decirse así que el sistema está en un *estado de equilibrio*.

estado de equilibrio

Cuando un sistema está aislado, no puede interactuar con su entorno; sin embargo, su estado puede cambiar como consecuencia de fenómenos espontáneos que suceden internamente cuando sus propiedades intensivas, tales como la temperatura y la presión, evolucionan hacia valores uniformes. Cuando tales cambios cesan el sistema está en equilibrio. Por tanto, para que un sistema esté en equilibrio debe estar en una fase simple o consistir en un número de fases que no tengan tendencia a cambiar sus condiciones cuando el sistema completo quede aislado de su entorno. En el equilibrio, la temperatura es uniforme en todo el sistema. También, la presión puede considerarse uniforme en todo él en tanto en cuanto los efectos gravitatorios no sean significativos; en caso contrario puede existir una variación en la presión, como es el caso de una columna vertical de líquido.

PROCESOS REALES Y PROCESOS CUASIESTÁTICOS

No es preciso que un sistema que desarrolla un proceso real esté en equilibrio *durante* el proceso. Alguno o todos los estados que aparecen en el proceso pueden ser estados de no equilibrio. Para muchos de estos procesos estamos limitados a conocer el estado inicial y el estado final una vez ha terminado el proceso. Sin embargo, aunque no conozcamos los estados intermedios, resulta factible evaluar ciertos efectos *globales* que ocurren durante el proceso. En el siguiente capítulo se verán algunos ejemplos al presentar los conceptos de *trabajo* y *calor*. Los estados de no equilibrio muestran, normalmente, variaciones espaciales en las propiedades intensivas en un momento dado. Estas propiedades pueden también variar con el tiempo para una posición determinada, a veces de modo caótico. En algunos casos las variaciones espaciales y temporales en propiedades tales como temperatura, presión y velocidad pueden medirse con precisión. También puede obtenerse esa información resolviendo ecuaciones apropiadas expresadas en forma de ecuaciones diferenciales, bien analíticamente o por medio de un ordenador.

En sucesivas secciones de este libro se considera un tipo idealizado de proceso llamado *proceso de cuasiequilibrio (o cuasiestático)*. Un proceso de cuasiequilibrio es aquel que se desvía del equilibrio termodinámico en un modo infinitesimal. Todos los estados por los que el sistema pasa en un proceso de cuasiequilibrio pueden considerarse estados de equilibrio. Puesto que en los procesos reales son inevitables situaciones de no equilibrio, los sistemas de interés en ingeniería pueden sólo aproximarse a este tipo idealizado de procesos. Nuestro interés por el concepto de proceso de cuasiequilibrio se debe a las dos consideraciones siguientes. Primero, usando el concepto de procesos de cuasiequilibrio pueden formularse modelos termodinámicos simples que dan al menos información *cuantitativa* sobre el comportamiento de los sistemas reales de interés. Esto es equivalente al uso de idealizaciones tales como la masa puntual o la polea sin rozamiento utilizados en mecánica con el objeto de simplificar el análisis. Segundo, el concepto de proceso de cuasiequilibrio es operativo para deducir las relaciones que existen entre las propiedades de los sistemas en equilibrio (Caps. 3, 6 y 11).

proceso de cuasiequilibrio

1.4 MEDIDA DE MASA, LONGITUD, TIEMPO Y FUERZA

Cuando se ejecutan cálculos en ingeniería es necesario ser cuidadosos con las *unidades* de las magnitudes físicas que aparecen. Una unidad es cualquier cantidad específica de una magnitud con la que cualquier otra cantidad del mismo tipo se mide por comparación. Por ejemplo, metros, centímetros, kilómetros, pies, pulgadas y millas son todas *unidades de longitud*. Segundos, minutos y horas son en cambio *unidades de tiempo*.

Como las magnitudes físicas están relacionadas por definiciones y leyes, un número relativamente pequeño de ellas basta para explicar y medir todas las demás. Estas pueden llamarse *magnitudes fundamentales*. Las otras pueden medirse en términos de las magnitudes fundamentales y se llaman *derivadas*. Por ejemplo, si la longitud y el tiempo se consideran fundamentales, la velocidad y el área serán derivadas. Dos conjuntos de magnitudes fundamentales suficientes para las aplicaciones en *mecánica* son (1) masa, longitud y tiempo y (2) fuerza, masa, longitud y tiempo. Cuando se consideran otros fenómenos físicos son necesarias nuevas magnitudes fundamentales. En el caso de la Termodinámica se incluye la temperatura. La intensidad eléctrica se incluye en el caso de aplicaciones relacionadas con la electricidad.

Al adoptar un conjunto de magnitudes fundamentales debe definirse una *unidad básica* para cada magnitud fundamental. Las unidades del resto de magnitudes se deducen entonces a partir de las unidades básicas. Ilustraremos estas ideas considerando brevemente dos sistemas de unidades, el Sistema Internacional (SI) y el Sistema Técnico Inglés.

unidad básica

1.4.1 UNIDADES SI

Consideraremos ahora el sistema de unidades llamado SI, que toma la masa, la longitud y el tiempo como magnitudes fundamentales y considera la fuerza como derivada. SI es la abreviatura de Sistema Internacional de unidades. Este es el aceptado legalmente en muchos países y gradualmente se va incorporando en otros países (por ej. E.U.A). Las convenciones del SI se publican y controlan de acuerdo con una organización internacional. Las *unidades básicas SI* para masa, longitud y tiempo se recogen en la Tabla 1.2 y se discuten en los párrafos siguientes.

unidades básicas SI

La unidad básica SI de longitud es el metro, m, definido como el recorrido que hace la luz en el vacío durante un intervalo de tiempo determinado. La unidad básica de tiempo

es el segundo, s. El segundo se define como la duración de 9.192.631.770 ciclos de la radiación asociada con una transición específica en el átomo de cesio.

La unidad básica SI de masa es el kilogramo, kg. Es igual a la masa de un cilindro de una aleación de platino-iridio que se conserva en la Oficina Internacional de Pesas y Medidas cerca de París. Un duplicado que se conserva en la Oficina Nacional de Patrones de España, sirve como masa patrón para España. Centros similares existen en otros países. El kilogramo es la única unidad básica que se define todavía a partir de un objeto fabricado.

La unidad de fuerza SI, llamada newton, es una unidad derivada, definida en términos de las unidades básicas para la masa, la longitud y el tiempo. La segunda ley del movimiento de Newton establece que la fuerza neta que actúa sobre un cuerpo es proporcional al producto de la masa y de la aceleración, escrito $F \propto ma$. El newton se define de modo que la constante de proporcionalidad en la expresión sea igual a la unidad, es decir, la segunda ley de Newton se expresa como la igualdad

$$F = ma \quad (1.1)$$

El newton, N, es la fuerza necesaria para comunicar a la masa de un kilogramo la aceleración de un metro por segundo en cada segundo. Con la Ec. 1.1

$$1 \text{ N} = (1 \text{ kg})(1 \text{ m/s}^2) = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 \quad (1.2)$$

Por ejemplo... para ilustrar el uso de las unidades SI introducidas hasta aquí vamos a determinar el peso en newtons de un objeto cuya masa es 1000 kg, en un lugar de la superficie de la Tierra donde la aceleración debida a la gravedad es igual al valor *estándar* definido como $9,80665 \text{ m/s}^2$. Poniendo los valores en la Ec. 1.1

$$\begin{aligned} F &= ma \\ &= (1000 \text{ kg})(9,80665 \text{ m/s}^2) = 9806,65 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 \end{aligned}$$

Esta fuerza puede expresarse en newtons usando la Ec. 1.2 como un factor de conversión de unidades. Así

$$F = \left(9806,65 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \right) \left| \frac{1 \text{ N}}{1(\text{kg} \cdot \text{m/s}^2)} \right| = 9806,65 \text{ N} \quad \blacktriangle$$

CRITERIO METODOLÓGICO

Obsérvese que en el cálculo anterior de la fuerza el factor de conversión de unidades se identifica por un par de líneas verticales. Usaremos este criterio a lo largo del texto para identificar conversiones de unidades.

Tabla 1.2 Unidades para masa, longitud, tiempo y fuerza

Magnitud	SI		Unidades inglesas	
	Unidad	Símbolo	Unidad	Símbolo
masa	kilogramo	kg	libra masa	lb
longitud	metro	m	pie	ft
tiempo	segundo	s	segundo	s
fuerza	newton (= 1 kg m/s^2)	N	libra fuerza (= $32,1740 \text{ lb} \cdot \text{ft/s}^2$)	lbf

Tabla 1.3 Prefijos de unidades SI

Factor	Prefijo	Símbolo	Factor	Prefijo	Símbolo
10^{12}	tera	T	10^{-2}	centi	c
10^9	giga	G	10^{-3}	mili	m
10^6	mega	M	10^{-6}	micro	μ
10^3	kilo	k	10^{-9}	nano	n
10^2	hecto	h	10^{-12}	pico	p

Recordemos que el *peso* de un cuerpo se refiere siempre a la fuerza de la gravedad. Cuando decimos que un cuerpo pesa una cierta cantidad, queremos decir que ésta es la fuerza con que el cuerpo es atraído por la Tierra o por otro cuerpo. El peso se calcula multiplicando la masa y la aceleración local debida a la gravedad. Así, el peso de un objeto puede variar porque la aceleración de la gravedad varía con el lugar, pero su masa permanece constante. *Por ejemplo...* si el objeto considerado previamente está en un punto de la superficie de un planeta donde la aceleración de la gravedad es, por ejemplo, un décimo del valor usado en el cálculo anterior, la masa permanecerá igual pero el peso será un décimo del calculado antes. ▲

Las unidades SI para otras magnitudes físicas se expresan también en términos de las unidades fundamentales SI. Algunas de las unidades derivadas aparecen tan frecuentemente que tienen nombres y símbolos especiales, tales como el newton. Las unidades SI para las magnitudes pertinentes en Termodinámica se presentan al introducirlas en el texto. Ya que es necesario trabajar frecuentemente con valores extremadamente grandes o pequeños cuando se usa el sistema de unidades SI, se define un conjunto de prefijos que se presentan en la Tabla 1.3 para simplificar las cosas. Por ejemplo, km significa kilómetro, es decir 10^3 m.

1.4.2 UNIDADES TÉCNICAS INGLESAS

Aunque las unidades SI pretenden ser un patrón general a nivel mundial, por ahora hay sitios (por ejemplo muchos sectores del ámbito tecnológico en E.U.A.) que usan habitualmente otras unidades. Así, una gran parte del mercado de herramientas y máquinas industriales de dicho país y un gran conjunto de datos técnicos valiosos utilizan unidades distintas a las del sistema SI. Por ello, y todavía durante muchos años, los ingenieros de algunos países tendrán que trabajar con una diversidad de unidades.

En esta sección consideramos un sistema de unidades, llamado Sistema Técnico Inglés, que se usa comúnmente en países del ámbito anglosajón. Este sistema toma la masa, la longitud, el tiempo y la *fuerza* como magnitudes fundamentales. Las **unidades básicas inglesas** empleadas para éstas aparecen listadas en la Tabla 1.2 y se discuten en los siguientes párrafos. Las unidades inglesas para otras magnitudes utilizadas en Termodinámica se darán cuando se introduzcan en el texto.

La unidad básica de longitud es el pie (foot), ft, definido en función del metro como

$$1 \text{ ft} = 0,3048 \text{ m} \quad (1.3)$$

*unidades básicas
inglesas*

La pulgada (inch), in., se define en términos del pie

$$12 \text{ in.} = 1 \text{ ft}$$

Una pulgada es igual a 2,54 cm. Aunque unidades tales como el minuto y la hora se usan a menudo en ingeniería es conveniente usar el segundo como unidad básica del Sistema Técnico Inglés para el tiempo.

La unidad básica del Sistema Técnico Inglés para la masa es la libra masa, lb, definida en términos del kilogramo como

$$1 \text{ lb} = 0,45359237 \text{ kg} \quad (1.4)$$

El símbolo lbm también puede usarse para representar la libra masa.

Una vez especificadas las unidades básicas para la masa, la longitud y el tiempo en el Sistema Técnico Inglés, la fuerza se considera como una magnitud secundaria y la unidad de la fuerza se define con la segunda ley de Newton dada por la Ec. 1.1. Desde este punto de vista la unidad inglesa para la fuerza, la libra fuerza, lbf, es la fuerza necesaria para acelerar una libra masa a $32,1740 \text{ ft/s}^2$, que es la aceleración estándar de la gravedad. Sustituyendo valores en la Ec. 1.1

$$1 \text{ lbf} = (1 \text{ lb})(32,1740 \text{ ft/s}^2) = 32,1740 \text{ lb}\cdot\text{ft/s}^2 \quad (1.5)$$

La libra fuerza, lbf, no es igual a la libra masa, lb, introducida antes. Fuerza y masa son fundamentalmente diferentes y lo mismo sucede con sus unidades. El uso doble de la palabra “libra” puede ser confuso, por lo que hay que ser cuidadosos para evitar errores. **Por ejemplo...** para ver el uso de ambas unidades en un cálculo sencillo, determinemos el peso de un objeto cuya masa es 1000 lb en una localidad donde la aceleración local de la gravedad es $32,0 \text{ ft/s}^2$. Llevando valores a la Ec. 1.1 y con la Ec. 1.5 como factor de conversión de unidades

$$F = ma = (1000 \text{ lb}) \left(32,0 \frac{\text{ft}}{\text{s}^2} \right) \left| \frac{1 \text{ lbf}}{32,1740 \text{ lb} \cdot \text{ft/s}^2} \right| = 994,59 \text{ lbf}$$

Este cálculo muestra que la libra fuerza es una unidad de fuerza distinta de la libra masa como unidad de masa. ▲

La fuerza puede considerarse alternativamente como una magnitud fundamental con una unidad básica *independiente* de aquellas definidas para otras magnitudes fundamentales. Cuando masa, longitud, tiempo y fuerza se consideran *todas* como magnitudes fundamentales, es necesario introducir explícitamente la constante de proporcionalidad en la segunda ley de Newton, del modo siguiente:

$$F = \frac{1}{g_c} ma \quad (1.6)$$

donde g_c es una constante física fundamental que expresa la proporcionalidad entre la fuerza y el producto de la masa por la aceleración. Desde este punto de vista, la libra fuerza es la fuerza con la que 1 libra masa es atraída a la Tierra en una localidad donde la aceleración de la gravedad es el valor estándar, $32,1740 \text{ ft/s}^2$. La Ec. 1.6 será así

$$1 \text{ lbf} = \frac{(1 \text{ lb})(32,1740 \text{ ft/s}^2)}{g_c}$$

por tanto

$$g_c = 32,1740 \frac{\text{lb} \cdot \text{ft}}{\text{lbf} \cdot \text{s}^2} \quad (1.7)$$

En este sistema de unidades la constante de proporcionalidad en la segunda ley de Newton tiene un valor numérico diferente de la unidad además de dimensiones.

Que la fuerza se considere magnitud fundamental o derivada es estrictamente cuestión de enfoque. Quienes prefieran considerar la fuerza, la masa, la longitud y el tiempo como fundamentales deberán mostrar g_c explícitamente en la segunda ley de Newton, y en todas las expresiones que se derivan de ella, y usar el valor de g_c dado por la Ec. 1.7. Por el contrario, si se considera la fuerza como derivada, la segunda ley de Newton se escribirá como la Ec. 1.1. La ecuación 1.5 se empleará entonces como un factor de conversión de unidades que relaciona la libra fuerza con la libra masa, el pie y el segundo exactamente de la misma forma que la Ec. 1.2 se utiliza como factor de conversión que relaciona el newton con el kilogramo, el metro y el segundo. El enfoque que seguiremos en el libro es emplear la Ec. 1.5 como un factor de conversión de unidades. La constante g_c no se incluirá de manera explícita en las ecuaciones utilizadas.

CRITERIO
METODOLÓGICO

1.5 DOS PROPIEDADES MENSURABLES: VOLUMEN ESPECÍFICO Y PRESIÓN

Tres propiedades intensivas particularmente importantes en Termodinámica son el volumen específico, la presión y la temperatura. En esta sección consideraremos el volumen específico y la presión. La temperatura se estudia en la Sec. 1.6.

1.5.1 VOLUMEN ESPECÍFICO

Desde una perspectiva macroscópica, la descripción de la materia se simplifica considerándola distribuida de modo continuo a lo largo de una región. La validez de esta idealización, conocida como hipótesis *del continuo*, se deduce del hecho de que para un conjunto muy elevado de fenómenos de interés en ingeniería la descripción resultante del comportamiento de la materia está de acuerdo con los datos medidos.

Cuando las sustancias pueden ser tratadas como continuas es posible hablar de sus propiedades termodinámicas intensivas “en un punto”. Así, en cualquier instante la densidad ρ en un punto se define como

$$\rho = \lim_{V \rightarrow V'} \left(\frac{m}{V} \right) \quad (1.8)$$

donde V' es el menor volumen para el que existe un valor definido del cociente. El volumen V' contiene suficientes partículas para que los promedios estadísticos sean significativos. Este es el volumen más pequeño para el que la materia puede considerarse como un continuo y normalmente es suficientemente pequeño como para que pueda considerarse un “punto.” Con la densidad definida por la Ec. 1.8, ésta puede describirse matemáticamente como una función continua de la posición y del tiempo.

La densidad, o masa local por unidad de volumen, es una propiedad intensiva que puede variar de un punto a otro dentro de un sistema. Así, la masa asociada con un volumen particular V queda determinada, en principio, por la integración