

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 interactúan 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.

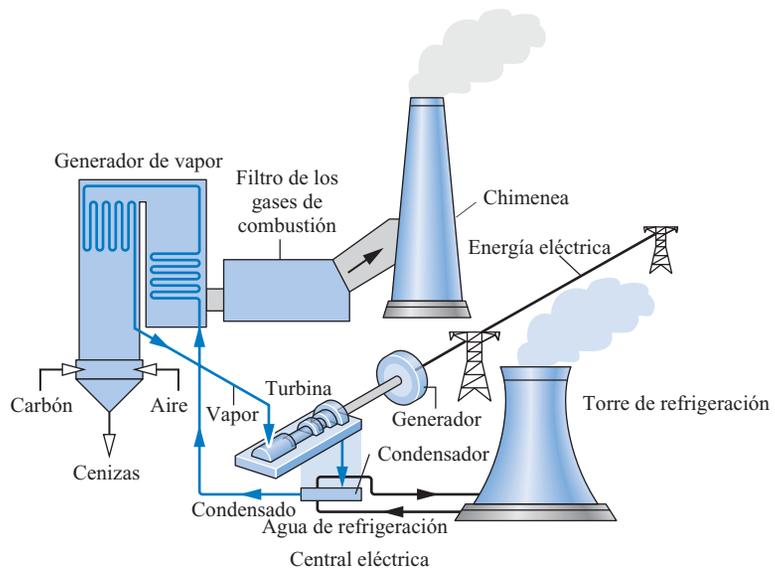
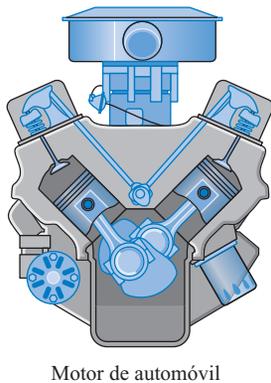
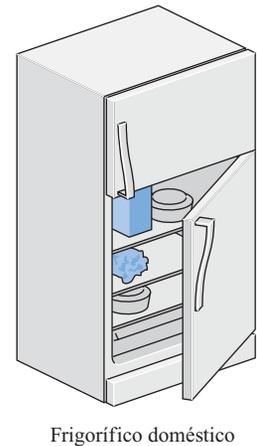
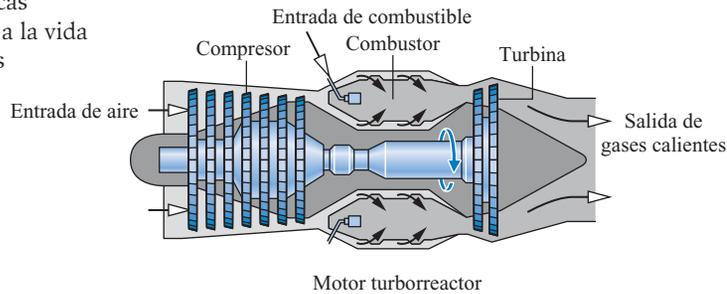
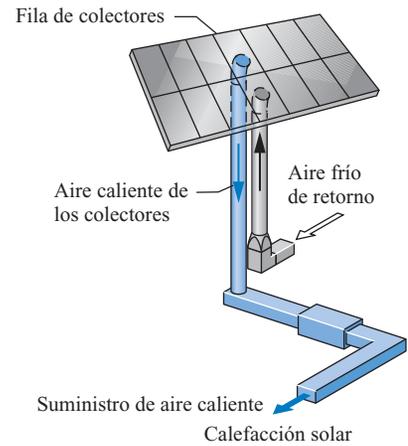
objetivo del capítulo

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 termoelectrónicos 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

sistema

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.

entorno
frontera

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.

sistema cerrado

sistema aislado

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

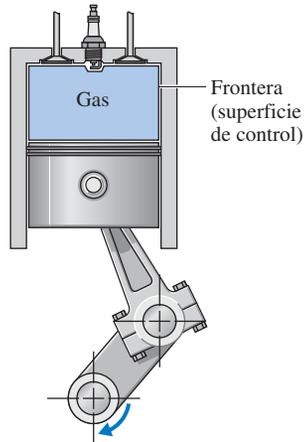


Figura 1.1 Ejemplo de sistema cerrado (masa de control). Gas contenido en un dispositivo cilindro-pistón.

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

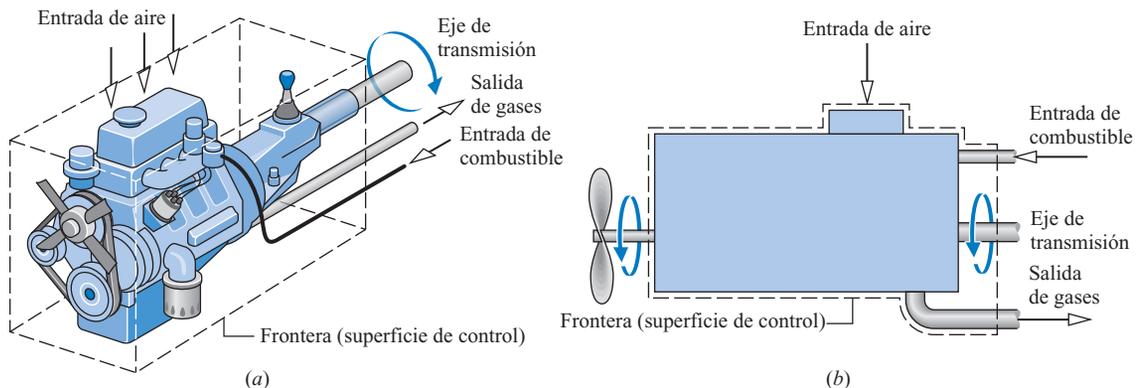


Figura 1.2 Ejemplo de volumen de control (sistema abierto). Motor de un automóvil.

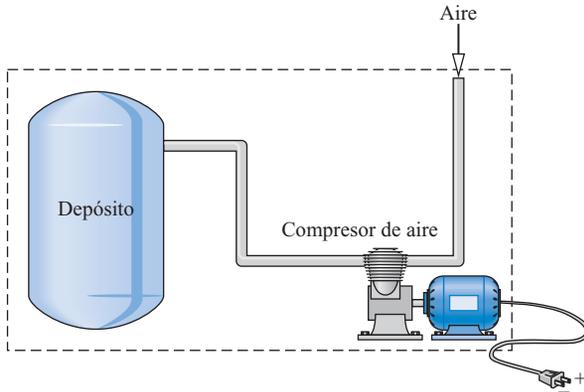


Figura 1.3 Compresor de aire y depósito de almacenamiento.

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 interactúan 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, señalamos 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-

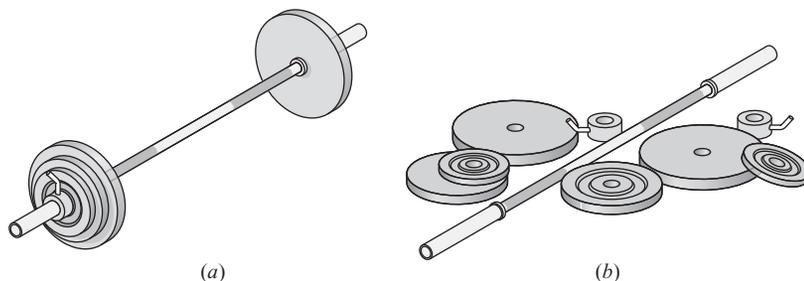


Figura 1.4 Figura utilizada para analizar el concepto de propiedad extensiva.

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 *cualitativa* 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 m/s². 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

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

CCRITERIO
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 (= 1kg m/s ²)	N	libra fuerza (= 32,1740 lb · 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.

CCRITERIO
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

$$m = \int_V \rho dV \quad (1.9)$$

y *no* simplemente como el producto de la densidad por el volumen.

volumen específico

El **volumen específico**, v , se define como el recíproco de la densidad, $v = 1/\rho$. Es decir, volumen por unidad de masa. Como la densidad, el volumen específico es una propiedad intensiva que puede variar de un punto a otro. Las unidades SI para la densidad y el volumen específico son kg/m^3 y m^3/kg , respectivamente. Sin embargo, a menudo también se expresan, respectivamente, como g/cm^3 y cm^3/g . Las unidades inglesas usadas para la densidad y el volumen específico en este texto son lb/ft^3 y ft^3/lb , respectivamente.

base molar

En ciertos casos es conveniente expresar las propiedades sobre base molar en lugar de referirlas a la unidad de masa. La cantidad de sustancia puede darse en **base molar**, en términos de kilomol (kmol) o de libra-mol (lbmol), según convenga. El número de kilomoles de una sustancia, n , se obtiene dividiendo la masa, m , en kilogramos (o libras) por la masa molecular, M , en kg/kmol (o lb/lbmol)

$$n = \frac{m}{M} \quad (1.10)$$

La Tabla A-1 proporciona la masa molecular para diversas sustancias.

Para indicar que una propiedad está en base molar colocamos una barra sobre el símbolo. Así, \bar{v} significa el volumen por kmol o lbmol. En este texto las unidades utilizadas para \bar{v} son m^3/kmol y ft^3/lbmol . De la Ec. 1.10 se deduce que la relación entre \bar{v} y v es

$$\bar{v} = Mv \quad (1.11)$$

donde M es la masa molecular en kg/kmol o lb/lbmol , según convenga.

1.5.2 PRESIÓN

A continuación introduciremos el concepto de presión desde el punto de vista continuo. Comencemos considerando una área pequeña A que contiene un punto de un fluido en reposo. En un lado del área el fluido ejerce una fuerza compresiva sobre ella que es normal a dicha área, F_{normal} . Una fuerza igual pero de sentido opuesto se ejerce por el fluido sobre la otra cara del área. Para un fluido en reposo no hay otras fuerzas que las mencionadas actuando sobre el área. La **presión** p en el punto especificado queda definida como el límite

presión

$$p = \lim_{A \rightarrow A'} \left(\frac{F_{\text{normal}}}{A} \right) \quad (1.12)$$

donde A' es el área en el "punto" definida con el mismo significado que el utilizado en la definición de densidad.

Si el área A' recibe nuevas orientaciones por giro en torno al punto dado, y se calcula la presión para cada nueva orientación, resultará que la presión en el punto es la misma en todas las direcciones *mientras el fluido permanezca en reposo*. Esto es una consecuencia del equilibrio de las fuerzas que actúan sobre un elemento de volumen en torno al punto. Sin embargo, la presión puede variar de un punto a otro dentro de un fluido en reposo; ejem-

plos de ello son la variación de la presión atmosférica con la elevación y la variación de la presión con la profundidad en océanos, lagos y otros volúmenes de agua.

Consideremos ahora un fluido en movimiento. En este caso la fuerza ejercida sobre un área que contiene un punto del fluido puede descomponerse en tres componentes perpendiculares entre sí: una normal al área y dos en el plano del área. Cuando hablamos de un área unidad, la componente normal al área se llama *esfuerzo normal* y las dos componentes en el plano del área se denominan *esfuerzos cortantes*. Las magnitudes de los esfuerzos varían generalmente con la orientación del área. El estado del esfuerzo en un fluido en movimiento es un aspecto tratado usualmente, de manera extensa, en la *Mecánica de fluidos*. La desviación del esfuerzo normal respecto de la presión, esfuerzo normal que existiría si el fluido estuviera en reposo, es en general muy pequeña. En este libro consideramos que el esfuerzo normal en un punto es igual a la presión en dicho punto. Esta consideración lleva a resultados de precisión aceptable para las aplicaciones estudiadas.

UNIDADES DE PRESIÓN

La unidad SI para la presión y el esfuerzo es el pascal.

$$1 \text{ pascal} = 1 \text{ N/m}^2$$

Sin embargo, en este texto es conveniente trabajar con múltiplos del pascal: el kilopascal, el bar y el megapascal.

$$1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ N/m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ N/m}^2$$

Las unidades comúnmente usadas en el Sistema Inglés para la presión y el esfuerzo son la libra fuerza por pie cuadrado, lbf/ft^2 , y la libra fuerza por pulgada cuadrada, lbf/in^2 . Aunque la presión atmosférica varía con el lugar sobre la superficie terrestre, se puede definir un valor estándar de referencia y usarlo para expresar otras presiones.

$$1 \text{ atmósfera estándar (atm)} = \begin{cases} 1,01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2 \\ 14,696 \text{ lbf/in.}^2 \end{cases}$$

La presión presentada arriba se llama *presión absoluta*. A lo largo de este libro el término presión se refiere a la presión absoluta salvo que específicamente se señale otra cosa. Aunque la presión absoluta es la que debe ser utilizada en las relaciones termodinámicas, los dispositivos medidores de presión indican, a menudo, la *diferencia* entre la presión absoluta en un sistema y la presión absoluta de la atmósfera que actúa en el exterior del equipo de medida. La magnitud de la diferencia se llama *presión manométrica* o *presión de vacío*. El término presión manométrica se aplica cuando la presión del sistema es mayor que la presión local atmosférica, p_{atm} .

presión absoluta

presión manométrica
presión de vacío

$$p \text{ (manométrica)} = p \text{ (absoluta)} - p_{\text{atm}} \text{ (absoluta)} \quad (1.13)$$

Cuando la presión atmosférica local es mayor que la presión en el sistema, se utiliza el término presión de vacío.

$$p \text{ (de vacío)} = p_{\text{atm}} \text{ (absoluta)} - p \text{ (absoluta)} \quad (1.14)$$

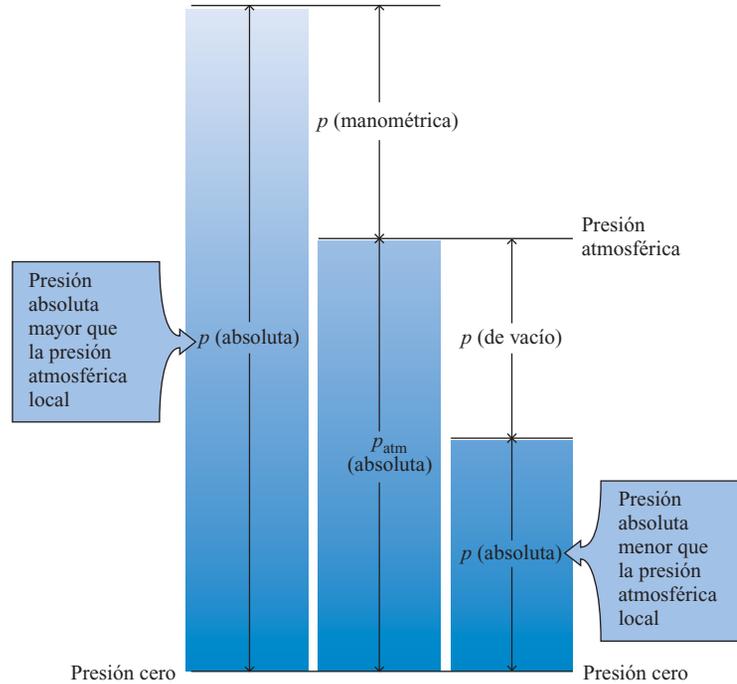


Figura 1.5 Relaciones entre las presiones absoluta, atmosférica, manométrica y de vacío.

En la Fig. 1.5 se recogen las relaciones entre las diferentes formas de expresar las medidas de presión. Trabajando con el Sistema Técnico Inglés se usan a menudo las letras a y g para distinguir entre las presiones absoluta y manométrica. Por ejemplo, las presiones absoluta y manométrica en libras fuerza por pulgada cuadrada se designan como $psia$ y $psig$, respectivamente.

MEDIDA DE LA PRESIÓN

El manómetro y el tubo de Bourdon son dos de los dispositivos usados frecuentemente para medir presiones. Los manómetros miden diferencias de presión en términos de la longitud de una columna de un líquido como agua, mercurio o aceite. El manómetro mostrado en la

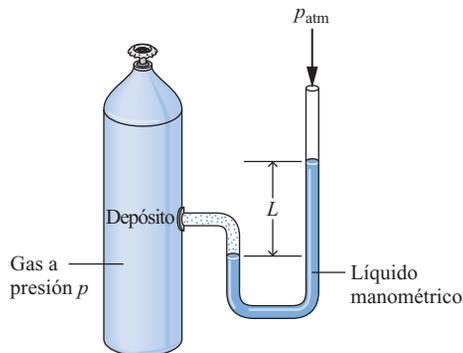


Figura 1.6 Medida de la presión mediante un manómetro.

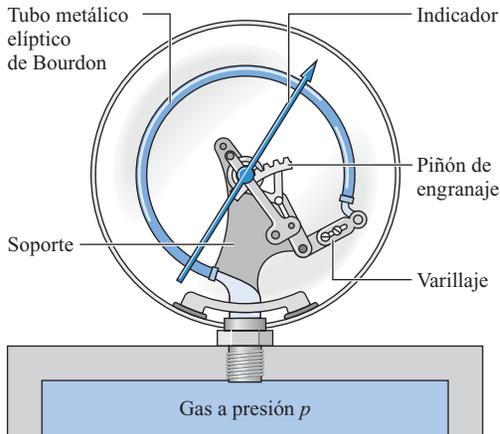


Figura 1.7 Medida de la presión mediante un tubo de Bourdon.

Fig. 1.6 tiene un extremo abierto a la atmósfera y el otro unido al recipiente cerrado que contiene un gas a presión uniforme. La diferencia entre la presión del gas y la de la atmósfera es

$$p - p_{\text{atm}} = \rho gL \quad (1.15)$$

donde ρ es la densidad del líquido manométrico, g es la aceleración de la gravedad y L es la diferencia entre los niveles del líquido. Para columnas pequeñas de líquido, ρ y g pueden tomarse constantes. Como consecuencia de esta proporcionalidad, entre la diferencia de presión y la longitud del fluido en el manómetro, las presiones se expresan a menudo en términos de milímetros de mercurio, pulgadas de agua, u otras similares. Se deja como ejercicio obtener la Ec. 1.15 usando para ello un balance elemental de fuerzas.

La Fig. 1.7 muestra un tubo de Bourdon. Este manómetro es un tubo curvado que tiene una sección elíptica y con un extremo conectado a la zona donde quiere medirse la presión mientras que el otro extremo se conecta a una aguja indicadora mediante un mecanismo. Cuando el fluido bajo presión llena el tubo, la sección elíptica tiende a hacerse circular tensando el tubo. Este movimiento es transmitido por el mecanismo a la aguja. Puede determinarse una escala graduada si se calibra la deflexión de la aguja para presiones conocidas. Con esto cualquier presión a medir puede leerse en las unidades deseadas. Debido a esta construcción, el tubo de Bourdon mide la presión relativa a la presión del entorno que rodea al instrumento. Por tanto, la lectura cero de la escala corresponde a la situación en la que el interior y el exterior del tubo están a la misma presión.

La presión puede medirse también por otros medios. Un tipo importante de sensores utiliza el efecto *piezoeléctrico*: Cuando ciertos materiales sólidos se deforman se genera una carga en su interior. La relación estímulo mecánico/respuesta eléctrica suministra la base para la

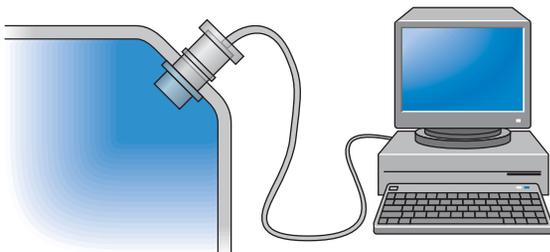


Figura 1.8 Sensor de presión con adquisición de datos automatizada.

medida de la presión y también para las medidas de fuerza y desplazamiento. Otro tipo importante de sensor emplea un diafragma que se deflecta cuando se le aplica una fuerza, alterando así una inductancia, una resistencia o una capacitancia. La figura 1.8 muestra un sensor de presión piezoeléctrico conectado a un sistema automático de adquisición de datos.

1.6 MEDIDA DE LA TEMPERATURA

En esta sección se estudia la propiedad intensiva temperatura junto con los medios para medirla. Como la fuerza, el concepto de temperatura se origina con la percepción de nuestros sentidos. Dicho concepto se basa en la noción de “calor” o “frío” que transmite un cuerpo. Utilizamos nuestro sentido del tacto para distinguir los cuerpos calientes de los fríos ordenándolos y decidiendo que 1 es más caliente que 2, 2 más caliente que 3, y así sucesivamente. Sin embargo, por sensible que el cuerpo humano pueda ser, somos incapaces de medir con precisión esta cualidad. Es decir, deben diseñarse termómetros y escalas de temperatura para poder medirla.

1.6.1 EQUILIBRIO TÉRMICO

Del mismo modo que sucede con la masa, la longitud y el tiempo, resulta difícil dar una definición para la temperatura usando conceptos que estén definidos independientemente o aceptados como fundamento de la definición. Sin embargo, es posible llegar a entender la idea de *igualdad* de temperaturas usando el hecho de que cuando la temperatura de un cuerpo cambia, otras propiedades lo hacen también.

Para ilustrar esto consideremos dos bloques de cobre y supongamos que nuestros sentidos nos dicen que uno está más caliente que otro. Si los bloques se ponen en contacto y se aíslan de su entorno, interactúan de una forma que puede describirse como una *interacción térmica (calor)*. Durante esta interacción se observará que el volumen del bloque más cálido disminuye algo con el tiempo mientras que el volumen del bloque más frío aumenta. Después no se observarán cambios adicionales de volumen y los bloques producirán una sensación igualmente cálida (o fría). De modo similar, observaremos que la resistencia eléctrica del bloque más caliente disminuye con el tiempo y que la del bloque más frío aumenta; al final las resistencias eléctricas también resultarán constantes. Cuando todos los cambios de estas propiedades observables cesen, la interacción habrá concluido. Diremos entonces que los dos bloques están en *equilibrio térmico*. Consideraciones como las anteriores nos llevan a inferir que los bloques tienen una propiedad física que determina cuándo están en equilibrio térmico. Esta propiedad se llama *temperatura*, y puede postularse que cuando dos bloques están en equilibrio térmico sus temperaturas son iguales.

La *velocidad* a la que los bloques se aproximan al equilibrio térmico conjuntamente puede reducirse separándolos con una capa delgada de poliestireno, lana de roca, corcho u otro material aislante. Aunque la velocidad de aproximación al equilibrio puede reducirse, ningún material real puede evitar que los bloques interactúen hasta alcanzar la misma temperatura. Sin embargo, por extrapolación de la experiencia, puede imaginarse un aislante *ideal* tal que evitase la interacción térmica entre ellos. Tal aislante ideal recibe el nombre de *pared adiabática*. Cuando un sistema encerrado por una pared adiabática sigue un proceso, tal proceso es un *proceso adiabático*. Un proceso a temperatura constante es un *proceso isoterma*. Un proceso adiabático no es necesariamente un proceso isoterma, ni un proceso isoterma es necesariamente adiabático.

*interacción térmica
(calor)*

*equilibrio térmico
temperatura*

*proceso adiabático
proceso isoterma*

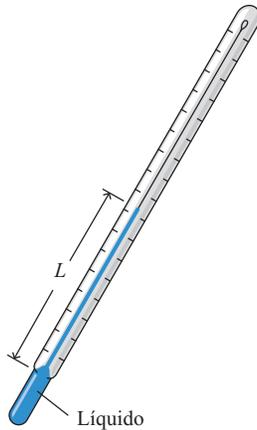


Figura 1.9 Termómetro de bulbo, de líquido.

1.6.2 TERMÓMETROS

La experiencia muestra que cuando dos cuerpos están en equilibrio térmico con un tercero, están en equilibrio térmico entre sí. Esta afirmación, llamada a menudo **principio cero de la Termodinámica**, se acepta tácitamente en cada una de las medidas de la temperatura. Así, si queremos conocer si dos cuerpos están a igual temperatura, no es necesario ponerlos en contacto y ver si alguna propiedad observable cambia con el tiempo como hemos descrito previamente. Basta únicamente ver si están individualmente en equilibrio térmico con un tercer cuerpo. El tercer cuerpo será, en general, un *termómetro*.

Cualquier cuerpo puede utilizarse como termómetro si tiene al menos una propiedad medible que cambia cuando su temperatura cambia. Tal propiedad se denomina **propiedad termométrica**. En particular, cualquier sustancia que muestre cambios en propiedades termométricas se denomina sustancia *termométrica*.

Un dispositivo familiar para la medida de temperaturas es el termómetro de bulbo representado en la Fig. 1.9, que consiste en un tubo capilar de vidrio conectado a un bulbo que contiene un líquido como mercurio o alcohol, y está sellado en el otro extremo. El espacio por encima del líquido está ocupado por el vapor del líquido o un gas inerte. Cuando la temperatura aumenta, el líquido expande su volumen y asciende por el capilar. La longitud L del líquido en el capilar depende de la temperatura. De acuerdo con lo anterior el líquido es la sustancia termométrica y L es la propiedad termométrica. Aunque este tipo de termómetro se utiliza comúnmente para medidas ordinarias de temperatura, no está indicado para los casos en que se requiera una gran exactitud.

El termómetro de gas mostrado en la Fig. 1.10 es tan excepcional en términos de precisión y exactitud que ha sido adoptado internacionalmente como el instrumento estándar para calibrar otros termómetros. La sustancia termométrica es el gas (habitualmente hidrógeno o helio) y la propiedad termométrica es la presión ejercida por el gas. Como se muestra en la figura, el gas está contenido en un bulbo y la presión que ejerce se mide mediante un manómetro de mercurio de tubo abierto. Cuando la temperatura sube, el gas se expande, empujando al mercurio hacia arriba por el tubo abierto. El gas se mantiene a volumen constante modificando la posición del reservorio. El termómetro de gas es utilizado como un estándar generalizado por las oficinas de estándares y los laboratorios de investigación. Sin embargo, como los termómetros de gas requieren aparatos complejos y son dispositivos grandes y con respuesta lenta que exigen procedimientos experimentales

principio cero de la Termodinámica

propiedad termométrica

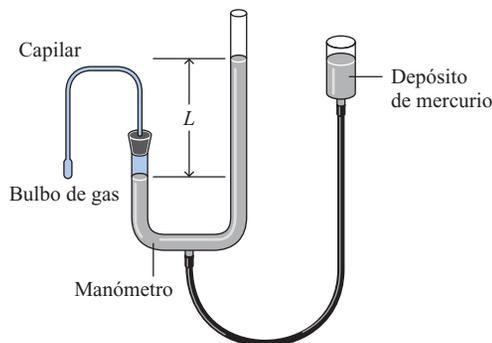


Figura 1.10 Termómetro de gas a volumen constante.

complicados, para la mayor parte de las medidas de temperatura se utilizan termómetros de mayor rapidez de respuesta y menor tamaño que son calibrados (directa o indirectamente) con los termómetros de gas.

OTROS SENSORES DE TEMPERATURA

Los sensores conocidos como *termopares* se basan en el principio por el que cuando dos metales distintos se ponen en contacto aparece una fuerza electromotriz (fem) que es, básicamente, una función de la temperatura existente en la conexión. En ciertos termopares, un alambre del termopar es platino de una pureza especificada y el otro es una aleación de platino y rodio. Los termopares utilizan también cobre y constantan (una aleación de cobre y níquel), hierro y constantan, así como otros diferentes pares de materiales. Los sensores con resistencia eléctrica forman otro conjunto importante de dispositivos para medir la temperatura. Estos sensores se basan en el hecho de que la resistencia eléctrica de varios materiales cambia con la temperatura en una forma predecible. Los materiales utilizados con este objetivo son normalmente conductores (tales como el platino, el níquel o el cobre) o semiconductores. Los dispositivos que utilizan conductores se denominan *detectores de termoresistencia* y los de tipo semiconductor se llaman *termistores*. Otro conjunto de instrumentos para medir la temperatura es sensible a la radiación. Estos instrumentos se conocen como *pirómetros de radiación* y *pirómetros ópticos*. Este tipo de termómetro difiere de los considerados previamente en que no entra en contacto con el cuerpo cuya temperatura quiere determinarse, lo que representa una ventaja cuando hay que trabajar con objetos móviles o cuerpos a temperaturas muy elevadas. Todos los sensores de temperatura mencionados pueden emplearse en combinación con un sistema automatizado de adquisición de datos.

1.6.3 LA ESCALA DE TEMPERATURA DE GAS Y LA ESCALA KELVIN

Las escalas de temperatura se definen mediante valores numéricos asignados a los *puntos fijos estándar*. Por acuerdo internacional un punto fijo estándar, fácilmente reproducible, es el **punto triple del agua** que corresponde al estado de equilibrio entre vapor, hielo y agua líquida (Sec. 3.2). Resulta conveniente asignar a la temperatura de este punto fijo el valor 273,16 kelvin, en forma abreviada 273,16 K. Con esta elección el intervalo de temperatura entre el *punto de hielo*¹ (273,15 K) y el *punto de vapor*² es igual a 100 K y de este modo coin-

punto triple

¹ Estado de equilibrio entre el hielo y el aire saturado de vapor de agua a la presión de 1 atm.

² Estado de equilibrio entre vapor de agua y agua líquida a la presión de 1 atm.

cide con el intervalo de la escala Celsius que se comenta en la Sec. 1.6.4, y al que se le asignan 100 grados Celsius. El kelvin es la unidad base SI para la temperatura.

ESCALA DE GAS

Resulta instructivo considerar cómo asociamos valores numéricos a los niveles de temperatura mediante el termómetro de gas introducido en la Sec. 1.6.2. Sea p la presión en un termómetro de gas de volumen constante en equilibrio térmico con un baño. Puede asignarse un valor a la temperatura del baño en forma muy simple mediante una relación lineal

$$T = \alpha p \quad (1.16)$$

donde α es una constante arbitraria. La relación lineal es una elección arbitraria, pudiendo establecerse otras relaciones para la correspondencia entre la presión y la temperatura.

El valor α puede determinarse introduciendo el termómetro en otro baño mantenido en el punto triple del agua y midiendo la presión, p_{pt} , del gas confinado a la temperatura del punto triple. Sustituyendo los valores en la Ec. 1.16 y despejando α

$$\alpha = \frac{273,16}{p_{pt}}$$

La temperatura del baño original, a la que la presión del gas confinado es p , es entonces

$$T = 273,16 \left(\frac{p}{p_{pt}} \right) \quad (1.17)$$

Sin embargo, puesto que los valores de ambas presiones, p y p_{pt} , dependen *parcialmente* de la cantidad de gas en el bulbo, el valor asignado por la Ec. 1.17 para la temperatura del baño varía con la cantidad de gas en el termómetro. Esta dificultad se supera en un termómetro de precisión repitiendo las medidas (en el baño original y en el baño de referencia) varias veces con menos gas en el bulbo para cada una de las medidas sucesivas. Para cada operación se calcula la relación p/p_{pt} a partir de la Ec. 1.17 y se representa frente a la correspondiente presión de referencia p_{pt} del gas a la temperatura del punto triple. Cuando se han dibujado varios de estos puntos, la curva resultante se extrapola a la ordenada en la que $p_{pt} = 0$. Esto aparece ilustrado en la Fig. 1.11 para termómetros de volumen constante

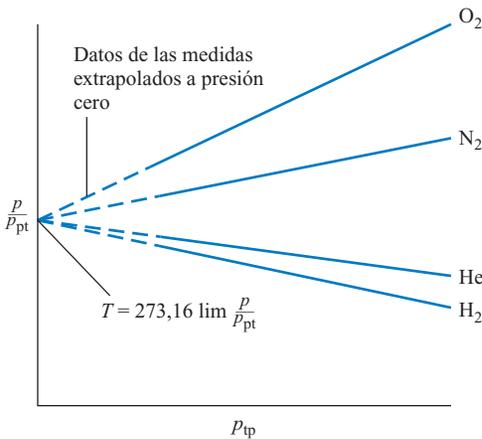


Figura 1.11 Lecturas de termómetros de gas de volumen constante para un valor fijo de la temperatura, frente a p_{pt} , utilizando distintos gases.

con un conjunto de gases distintos. El análisis de la figura muestra un resultado importante. Para cada valor de la presión de referencia distinto de cero, el valor p/p_{pt} depende del gas empleado en el termómetro. Sin embargo, así como disminuye la presión, los valores p/p_{pt} del termómetro con diferentes gases se van aproximando, y en el límite, cuando la presión tiende a cero, *se obtiene el mismo valor de p/p_{pt} para todos los gases*. Apoyándonos en este resultado general, la escala de temperatura de gas se define mediante la relación

$$T = 273,16 \lim_{p \rightarrow 0} \frac{p}{p_{\text{pt}}} \quad (1.18)$$

donde “lim” quiere decir que tanto p como p_{pt} tienden a cero. Resulta claro que la determinación de temperaturas por este método requiere cuidado extraordinario y procedimientos experimentales muy elaborados.

Aunque la escala de temperaturas de la Ec. 1.18 es independiente de las propiedades del gas utilizado, todavía depende de las propiedades de los gases en general. En función de esto, la medida de bajas temperaturas requiere un gas que no condense a dichas temperaturas, y esto impone un límite en el rango de temperaturas que pueden medirse con un termómetro de gas. La temperatura más baja que puede ser medida con un instrumento así es del orden de 1 K, obtenida con helio. A altas temperaturas los gases se disocian, y por tanto estas temperaturas no pueden ser determinadas mediante un termómetro de gas. Deberán emplearse otros métodos empíricos que utilizan ciertas propiedades de otras sustancias que pueden ser empleadas para medir temperaturas en rangos donde el termómetro de gas resulta inadecuado. Una discusión más amplia puede verse en la Sec. 5.5.

ESCALA KELVIN

escala Kelvin

A la vista de estas limitaciones es deseable tener un medio para asignar valores de temperaturas que no dependan en ninguna medida de las propiedades de una sustancia particular o de un tipo de sustancias. Una escala así se denomina escala *termodinámica* de temperaturas. La *escala Kelvin* es una escala termodinámica absoluta de temperaturas que proporciona una definición continua de la temperatura, válida sobre todos los rangos de ésta. Las medidas empíricas de temperatura, con diferentes termómetros, pueden relacionarse con la escala Kelvin. Para desarrollar dicha escala es necesario usar el principio de conservación de la energía y el segundo principio de la Termodinámica. Por tanto, la explicación detallada se pospone a la Sec. 5.5 después de que se hayan introducido dichos principios. Sin embargo, señalaremos aquí que la escala Kelvin tiene un cero en 0 K y las temperaturas inferiores a ésta no están definidas.

Puede demostrarse que la escala de gas y la escala Kelvin son *idénticas* en el rango de temperaturas en el que puede utilizarse el termómetro de gas. Por esta razón podemos escribir K después de una temperatura determinada por medio de la Ec. 1.18. En función de esto y hasta que el concepto de temperatura sea revisado con más detalle en el Cap. 5, consideraremos que todas las temperaturas empleadas hasta ese momento están de acuerdo con los valores dados por el termómetro de gas de volumen constante.

1.6.4 LAS ESCALAS CELSIUS, RANKINE Y FAHRENHEIT

escala Celsius

La *escala Celsius de temperaturas* (también llamada escala centígrada) utiliza la unidad grado Celsius ($^{\circ}\text{C}$), que tiene la misma magnitud que el kelvin. Así, las *diferencias* de temperaturas son

idénticas en ambas escalas. Sin embargo, el punto cero de la escala Celsius coincide con 273,15 K, como se ve en la siguiente relación entre la temperatura Celsius y la temperatura Kelvin:

$$T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273,15 \quad (1.19)$$

De aquí se deduce que el punto triple del agua en la escala Celsius es 0,01°C y que 0 K corresponde a -273,15°C.

La escala Celsius se define de modo que la temperatura del *punto de hielo*, 273,15 K, sea 0,00°C, y que la temperatura del *punto de vapor*, 373,15 K, sea 100,00°C. Según esto, hay 100 grados Celsius en el intervalo de 100 Kelvin, una correspondencia que es consecuencia de la selección del valor 273,16 K para la temperatura del punto triple. Obsérvese que, puesto que las temperaturas de los puntos de hielo y de vapor son valores experimentales sometidos a revisión en función de determinaciones más precisas, la única temperatura Celsius que es fija *por definición* es la del punto triple del agua.

Otras dos escalas de temperaturas son de uso común en ingeniería en los E.U.A. Por definición, la *escala Rankine*, cuya unidad es el grado rankine (°R), es proporcional a la temperatura Kelvin según

$$T(^{\circ}\text{R}) = 1,8 T(\text{K}) \quad (1.20)$$

Como evidencia la Ec. 1.20, la escala Rankine es también una escala termodinámica absoluta con un cero absoluto que coincide con el cero absoluto de la escala Kelvin. En las relaciones termodinámicas la temperatura está siempre en términos de la escala Kelvin o Rankine salvo que se establezca otro criterio específicamente.

En la *escala Fahrenheit* se utiliza un grado del mismo tamaño que el de la escala Rankine, pero el punto cero está desplazado de acuerdo con la expresión

$$T(^{\circ}\text{F}) = T(^{\circ}\text{R}) - 459,67 \quad (1.21)$$

escala Rankine

escala Fahrenheit

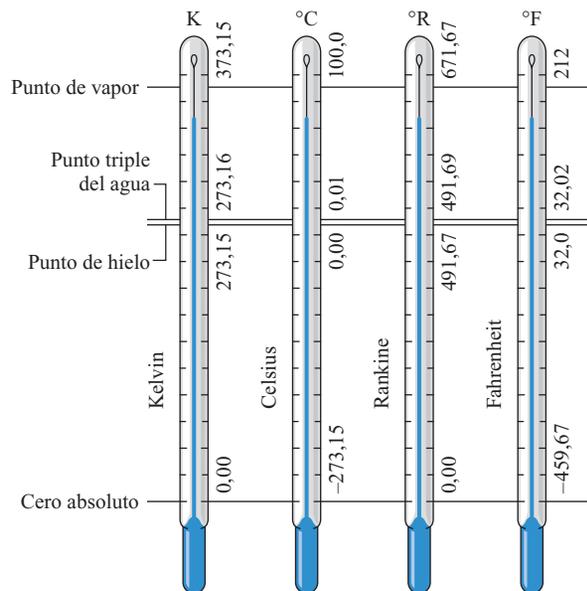


Figura 1.12 Comparación de las escalas de temperatura.

Sustituyendo las Ecs. 1.19 y 1.20 en la Ec. 1.21 se deduce que

$$T(^{\circ}\text{F}) = 1,8 T(^{\circ}\text{C}) + 32 \quad (1.22)$$

Esta ecuación muestra que la temperatura Fahrenheit del punto de hielo (0°C) es 32°F y la del punto de vapor (100°C) es 212°F . Los 100 grados Celsius o Kelvin entre el punto de hielo y el punto de vapor corresponden a 180 grados Fahrenheit o Rankine, como se ve en la Fig. 1.12, donde se comparan las escalas Kelvin, Celsius, Rankine y Fahrenheit.

Finalmente, al hacer cálculos en ingeniería es frecuente redondear los últimos números en las Ecs. 1.19 y 1.21 a 273 y 460, respectivamente. Esto se hará frecuentemente a lo largo del texto.

CCRITERIO
METODOLÓGICO

1.7 DISEÑO Y ANÁLISIS EN INGENIERÍA

Una importante función en ingeniería es diseñar y analizar aquello que pretende atender necesidades del ser humano. En esta sección consideraremos el diseño y el análisis junto con los recursos sistemáticos para desarrollarlos.

1.7.1 DISEÑO

El diseño en ingeniería es un proceso de toma de decisiones en el que se aplican, habitualmente de forma iterativa, principios tomados de la ingeniería y de otros campos como la economía y la matemática, para definir un sistema, un componente del mismo o un proceso. Entre los elementos fundamentales del diseño tenemos la definición de objetivos, la síntesis, el análisis, la construcción, la verificación y la evaluación. Cada proceso de diseño está, con frecuencia, sometido a *restricciones* relacionadas con la economía, la seguridad, el impacto ambiental y otras.

restricciones del diseño

Un proyecto de diseño surge habitualmente de la constatación de una necesidad o una oportunidad que está asumida sólo en parte. Así, antes de buscar soluciones es importante definir los objetivos del diseño. Las primeras etapas en el diseño en ingeniería incluyen la concreción de especificaciones cuantitativas sobre el funcionamiento y la identificación de alternativas *realizables* en el diseño capaces de atender dichas especificaciones. Entre las alternativas realizables hay, a menudo, una o más que son las “mejores” de acuerdo con determinados criterios: el menor coste, la mayor eficiencia, el tamaño más pequeño, el peso más ligero, etc. Otros factores importantes para la elección de un diseño final son la fiabilidad, la posibilidad de manufactura y mantenimiento y las consideraciones sobre comercialización. En función de todo ello debe establecerse una solución de compromiso entre los criterios que compiten, pudiendo aparecer soluciones alternativas del diseño que sean muy similares.³

1.7.2 ANÁLISIS

El diseño requiere síntesis: selección y conexión de los componentes para organizar un todo coordinado. Sin embargo, como cada componente individual puede variar en tamaño, funcionamiento, coste, etc., es necesario en general someter cada uno de ellos a un estudio o análisis antes de poder hacer una selección definitiva. *Por ejemplo...* un diseño para protección contra incendios puede incluir una red de tuberías por el techo

³ Para un análisis más completo, véase A. Bejan, G. Tsatsaronis y M. J. Moran, *Thermal Design and Optimization*, John Wiley & Sons, New York, 1996, Chap. 1.

combinadas con un conjunto de aspersores. Una vez determinada la configuración del conjunto, será necesario un análisis técnico detallado para especificar el número y tamaño de los aspersores y el conexionado de tubos y su diámetro en las diversas ramas de la red. El análisis debe también orientarse de modo que asegure que todos los componentes forman un conjunto que funcione sin dificultad, a la par que se cubren las condiciones de coste y los estándares y normativas vigentes. ▲

Los ingenieros realizan distintos tipos de análisis frecuentemente, ya sea de forma explícita, como parte de un proceso de diseño, o por otra razón. Los análisis sobre sistemas como los estudiados en este libro utilizan, directa o indirectamente, una o más de tres leyes básicas. Estas leyes, que son independientes del tipo de sustancia o sustancias consideradas, son

- el principio de conservación de la masa
- el principio de conservación de la energía
- el segundo principio de la Termodinámica

Además, resultan necesarias con frecuencia las relaciones entre las propiedades de la sustancia o sustancias consideradas (Caps. 3, 6, 11-14). También pueden tener importancia la segunda ley de Newton para el movimiento (Caps. 1, 2 y 9) y relaciones como el modelo de conducción de Fourier (Cap. 2) o principios de ingeniería económica (Cap. 7).

La primera etapa en un análisis termodinámico es la definición del sistema y la identificación de las interacciones significativas con el entorno. La atención se dirige, a continuación, a las leyes y relaciones físicas aplicables que permiten describir el comportamiento del sistema en términos de un *modelo ingenieril*. El objetivo de este modelo es obtener una representación del comportamiento del sistema que sea suficientemente fiel en función de los objetivos del análisis, aunque sean ignorados muchos aspectos de los que presenta el sistema en la realidad. Por ejemplo, en Mecánica se usan a menudo idealizaciones tales como masas puntuales, poleas sin rozamiento o esferas rígidas para simplificar el análisis y llegar a un modelo que se pueda trabajar. Seleccionar un determinado modelo precisa experiencia y es una parte del *arte* de la ingeniería.

modelo ingenieril

El análisis ingenieril es más efectivo cuando se hace de manera sistemática. Este aspecto se considera a continuación.

1.7.3 METODOLOGÍA PARA RESOLVER PROBLEMAS DE TERMODINÁMICA

Un objetivo fundamental de este texto es ayudar a comprender cómo se resuelven los problemas de ingeniería que incluyan principios termodinámicos. Con este objeto se suministran numerosos ejemplos resueltos además de los problemas propuestos al final de cada capítulo. Es muy importante que el estudiante analice los ejemplos y resuelva problemas, ya que el dominio de los conceptos fundamentales sólo se alcanza a través de la práctica.

Es importante desarrollar un procedimiento sistemático que permita mejorar los resultados y gratifique los esfuerzos realizados. El estudiante debe pensar cuidadosamente sus soluciones, evitando la tentación de atacar los problemas *por un atajo* seleccionando alguna ecuación aparentemente apropiada, sustituyendo en ella los valores y obteniendo rápidamente un resultado con la calculadora. Un planteamiento “fortuito” de solución de los problemas como el descrito puede llevar a dificultades cuando los problemas se vayan complicando. Por tanto recomendamos muy insistentemente que las soluciones de los problemas se organicen utilizando los siguientes cinco pasos, que se emplean en los ejemplos resueltos en este texto.

Conocido: Establece brevemente con tus propias palabras lo que es conocido. Esto exige que leas el problema cuidadosamente y reflexiones sobre ello.

Se debe hallar: Establece de modo conciso con tus propias palabras lo que debe calcularse.

Datos conocidos y diagramas: Dibuja un esquema del sistema considerado. Decide si conviene un análisis de sistema cerrado o de volumen de control y entonces identifica cuidadosamente la frontera. Rotula el diagrama con la información significativa para la definición del problema.

Escribe todos los valores de las propiedades que se te dan o que crees que puedes necesitar para cálculos sucesivos. Dibuja los diagramas adecuados de propiedades (véase la Sec. 3.2), identificando los estados clave e indicando, si es posible, los procesos seguidos por el sistema.

No debe subestimarse la importancia de esquemas cuidadosos del sistema y de los diagramas de propiedades. A menudo son un instrumento válido para ayudar a entender claramente el problema.

Consideraciones e hipótesis: Para establecer un *modelo* del problema, lista todas las consideraciones e idealizaciones simplificadoras hechas para hacerlo resoluble. A veces esta información puede también anotarse sobre los dibujos del paso anterior.

Análisis: Utilizando tus simplificaciones e idealizaciones, expresa las ecuaciones y relaciones adecuadas en formas que produzcan resultados válidos.

Es recomendable trabajar con ecuaciones mientras sea posible antes de sustituirse en ellas los datos numéricos. Una vez reducidas las ecuaciones a formas definitivas, analízalas para determinar qué datos adicionales pueden necesitarse. Debes identificar las tablas, gráficas, o ecuaciones de propiedades que suministren los valores requeridos. En este momento una serie de diagramas adicionales de propiedades pueden ayudar a interpretar estados y procesos.

Una vez que todos los datos y ecuaciones estén organizados, sustituye en las ecuaciones los valores numéricos. Comprueba cuidadosamente que estás empleando un conjunto de unidades consistente y apropiado. Entonces realiza los cálculos necesarios.

Finalmente, considera si las magnitudes de los valores numéricos parecen razonables y si los signos algebraicos asociados con los valores numéricos son correctos.

El formato usado en este texto para los problemas resueltos pretende *guiar* tu forma de pensar, nunca sustituirla. En consecuencia, debes ser cuidadoso a la hora de aplicar estos cinco pasos: hay que evitar aplicarlos de forma automática, pues en este caso los beneficios obtenidos serían escasos. Por supuesto, al ir avanzando en una solución en particular, puedes retroceder a un paso previo y revisarlo cara a una mejor comprensión del problema. Por ejemplo, puede ser adecuado añadir o quitar una determinada consideración, revisar un esquema, calcular más datos de propiedades, etc.

Los problemas resueltos que aparecen en el texto incluyen, con frecuencia, comentarios sobre aspectos clave de la solución y analizan como podrían obtenerse mejores resultados si se flexibilizaran ciertas condiciones. Tales comentarios son una opción en tus propias soluciones.

En algunos de los ejemplos iniciales y en problemas de fin de capítulo el formato de la solución puede parecer innecesario o farragoso. Sin embargo, a medida que los problemas se van complicando podrás comprobar que reduce errores, ahorra tiempo y proporciona una mayor comprensión del problema en curso.

El ejemplo que sigue muestra el uso de este modelo de solución y de paso revisa algunos conceptos importantes introducidos previamente.

Ejemplo 1.1

PROBLEMA IDENTIFICACIÓN DE LAS INTERACCIONES DE UN SISTEMA

Un aerogenerador eléctrico se monta sobre una torre. Cuando el viento actúa de forma constante sobre las aspas se genera electricidad de forma que se almacena en un sistema de baterías.

- (a) Considerando el aerogenerador como un sistema, identifica la localización de la frontera por la que el sistema interactúa con el entorno. Describe los cambios que ocurren en función del tiempo transcurrido.
- (b) Repite lo anterior tomando como sistema sólo las baterías de almacenamiento.

SOLUCIÓN

Conocido: Un aerogenerador proporciona electricidad a un sistema de baterías de almacenamiento.

Se debe hallar: Para un sistema que consiste en (a) el aerogenerador, (b) las baterías de almacenamiento, hay que identificar la localización de las interacciones del sistema con el entorno y describir los cambios que ocurren en el sistema en función del tiempo.

Datos conocidos y diagramas:

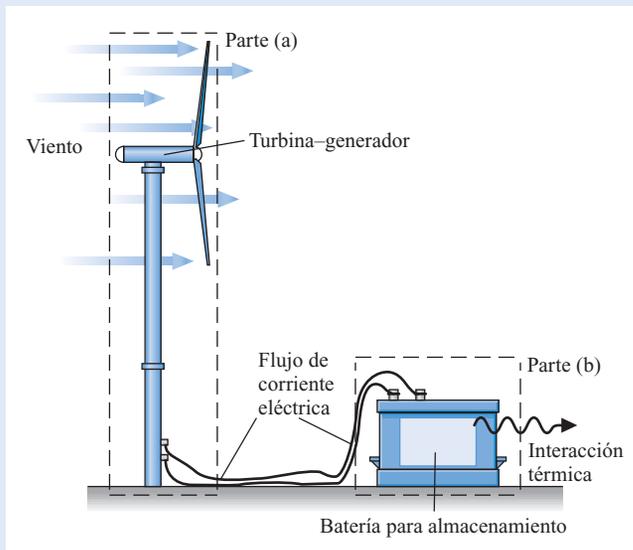


Figura E.1.1

Consideraciones e hipótesis:

1. En la parte (a) el sistema es el volumen de control mostrado por la línea de puntos de la figura.
2. En la parte (b) el sistema es el sistema cerrado mostrado por la línea de puntos de la figura.
3. El viento tiene régimen permanente.

Análisis:

- (a) En este caso un flujo de aire cruza el límite del volumen de control. Otra interacción importante entre el sistema y el entorno es el paso de corriente eléctrica a través de los cables. Sin embargo, desde la perspectiva macroscópica una interacción así no se considera una transferencia de masa. Con viento estable, el aerogenerador alcanzará muy probablemente una operación estacionaria, en la que la velocidad de rotación de las aspas es constante y se genera una corriente eléctrica constante.

- 1 (b) La principal interacción entre el sistema y su entorno es la corriente eléctrica que pasa a las baterías a través de los cables. Como se recoge en la parte (a), esta interacción no se considera una transferencia de masa. El sistema es un sistema cerrado. Cuando las baterías se cargan y las reacciones químicas se producen en su interior, la temperatura de la superficie de las baterías puede elevarse algo y puede producirse una interacción térmica entre ellas y el entorno. Esta interacción puede considerarse, muy probablemente, como de segundo orden.

1 Si empleamos términos familiares en un curso de Física previo, el sistema de la parte (a) incluye la *conversión* de energía cinética en electricidad mientras que el sistema (b) supone *almacenamiento* de energía en las baterías.

1.8 CÓMO UTILIZAR ESTE LIBRO CON EFICACIA

Este libro tiene diferentes elementos que facilitan el estudio y contribuyen a una mayor comprensión. Entre ellos se incluyen:

Ejemplos

- Se proporcionan numerosos ejemplos resueltos que aplican la *metodología de resolución* presentada en la Sec. 1.7.3 y que se muestra en el ejemplo 1.1. Animamos a estudiar estos ejemplos incluyendo los comentarios adjuntos.
- Ejemplos menos formales se incluyen intercalados en el texto. Estos se introducen con las palabras. *Por ejemplo...* y se concluyen con el símbolo ▲. También conviene estudiar estos ejemplos.

Ejercicios

- Cada capítulo tiene un conjunto de cuestiones para discusión bajo el epígrafe *Cuestiones para reflexionar* que pueden hacerse de modo individual o en pequeños grupos. Su objetivo es permitir una más profunda comprensión de la materia, estimular el pensamiento crítico y autoevaluarse.
- Se proporciona un elevado número de problemas al final de cada capítulo. Los problemas se organizan en coordinación con el desarrollo teórico y se ordenan en orden creciente de dificultad. Los problemas se clasifican también con encabezamientos que agilicen el proceso de selección de problemas a resolver. En las páginas del final del apéndice incluido en cada uno de los tomos se incorporan respuestas a una selección de los problemas propuestos.
- Aunque el propósito de este libro es ayudar a entender la Termodinámica técnica, se han incorporado consideraciones de diseño relacionadas con la Termodinámica. Cada capítulo tiene una serie de *problemas de diseño y final abierto* que suponen por sí mismos una serie de breves experiencias en diseño para ayudar a desarrollar creatividad y juicio técnico. También proporcionan la posibilidad de desarrollar habilidades en la comunicación.

Ayudas adicionales al estudio

- Cada capítulo concluye con un sumario del mismo y una guía para el estudio que proporciona un punto de partida para la preparación de exámenes.

- En el margen, coordinada su posición con el texto, se listan una serie de palabras clave.
- Las ecuaciones más importantes se señalan con una doble línea horizontal como, por ejemplo, la Ec. 1.10.
- *Criterio Metodológico*, cuando aparece escrito al margen, o bien señala una mejora incorporada a la metodología de resolución de problemas, caso de la pág. 10, o bien introduce convenciones como el redondeo de la temperatura 273,15 K a 273 K, caso de la pág. 24.
- El icono  señala qué problemas de fin de capítulo son apropiados para una resolución con ordenador.
- En la contraportada, al principio del libro, se han incluido una serie de factores de conversión y constantes importantes para facilitar una consulta rápida.
- Asimismo, en la contraportada del final aparece el listado de una serie de símbolos utilizados.

1.9 RESUMEN DEL CAPÍTULO Y GUÍA PARA EL ESTUDIO

En este capítulo hemos introducido algunos de los conceptos fundamentales y definiciones usadas en el estudio de la Termodinámica. Los principios de la Termodinámica son aplicados por los ingenieros para analizar y diseñar una amplia variedad de dispositivos destinados a satisfacer las necesidades del ser humano.

Un importante aspecto del análisis termodinámico es la identificación de sistemas y la descripción de su comportamiento en términos de propiedades y procesos. En este capítulo se discuten tres propiedades importantes: el volumen específico, la presión y la temperatura.

En Termodinámica consideramos sistemas en estado de equilibrio y sistemas experimentando cambios de estado. Estudiamos procesos en los que los estados que intervienen no son estados de equilibrio así como procesos de cuasiequilibrio en los que la desviación del equilibrio es casi despreciable.

En este capítulo hemos introducido las unidades para masa, tiempo, longitud, fuerza y temperatura para el SI y el Sistema Técnico Inglés. Es conveniente familiarizarse con ambos conjuntos de unidades.

El Capítulo 1 concluye con la discusión sobre cómo interviene la termodinámica en el diseño ingenieril, cómo resolver problemas en Termodinámica de manera sistematizada y cómo usar este libro para mejorar la comprensión de la materia.

La siguiente lista proporciona una guía para el estudio de este capítulo. Cuando se haya terminado su estudio y completado los ejercicios de final de capítulo, el estudiante debe ser capaz de:

- escribir el significado de los términos listados al margen del texto y entender cada uno de los conceptos relacionados. El subconjunto de los términos clave recogido aquí, al margen, es de particular importancia en los capítulos siguientes.
- usar unidades SI e inglesas para la masa, la longitud, el tiempo, la fuerza y la temperatura y aplicar correctamente la segunda ley de Newton, las Ecs. 1.13-1.15 y las Ecs. 1.19-1.22.
- trabajar en base molar usando las Ecs. 1.10 y 1.11.
- identificar una frontera adecuada para el sistema y describir las interacciones entre el sistema y el entorno.
- aplicar la metodología para resolución de problemas presentada en la Sec. 1.7.3.

*sistema cerrado
volumen de control
frontera
entorno
propiedad
propiedad extensiva
propiedad intensiva
estado
proceso
ciclo termodinámico
fase
sustancia pura
equilibrio
presión
volumen específico
temperatura
proceso adiabático
proceso isoterma
escala Kelvin
escala Rankine*

Cuestiones para reflexionar

1. Considera una actividad cualquiera diaria tal como cocinar, calentar o enfriar una casa, conducir un automóvil o utilizar un ordenador, y realice un esquema de lo que observa. Defina los límites del sistema para analizar algunos aspectos de los sucesos que ocurren. Identifique las interacciones entre el sistema y el entorno.
2. ¿Cuáles son los posibles límites para estudiar cada uno de los sistemas siguientes?
 - (a) una rueda de bicicleta inflándose.
 - (b) una copa de agua calentándose en un horno de microondas.
 - (c) un frigorífico doméstico funcionando.
 - (d) un motor a reacción en vuelo.
 - (e) la refrigeración de un ordenador personal.
 - (f) un horno de gas doméstico en operación.
 - (g) el lanzamiento de un cohete.
3. ¿Un sistema que consiste en una segadora con motor de gasolina de un cilindro puede analizarse mejor como sistema cerrado o como volumen de control? Señala alguno de los impactos ambientales asociados con este sistema. Repítelo para el caso de una segadora eléctrica.
4. En un recipiente cerrado hay aire en reposo a 1 atm y 22°C. Desde un punto de vista macroscópico el sistema está en equilibrio. Sin embargo, los átomos y moléculas que constituyen el aire están en continuo movimiento. Explica esta aparente contradicción.
5. La hipótesis del continuo es aplicable en el caso de un depósito cerrado que contiene aire en condiciones normales de presión y temperatura. Si vamos extrayendo aire del depósito llega un momento en que dicha hipótesis ya no es aplicable al aire que aun queda. ¿Por qué?
6. ¿Puede ser uniforme el valor de una propiedad intensiva para cualquier posición a lo largo de un sistema? ¿Puede ser constante a lo largo del tiempo? ¿Y ambas?
7. Puede que hayas utilizado la unidad técnica de masa en alguna clase previa de Física. Por definición una unidad técnica de masa es la que tiene una aceleración de 1 m/s^2 cuando sobre ella actúa una fuerza de 1 kilopondio. ¿Por qué es útil una masa definida así?
8. Un registro señala que la presión a la entrada de una bomba es -10 kPa . ¿Qué puede significar una presión negativa?
9. Normalmente no consideramos variaciones de presión con la altura para un gas dentro de un depósito. ¿Por qué?
10. Cuando en un edificio han funcionando extractores de aire de gran dimensión puede ser difícil abrir las puertas exteriores debido a la diferencia de presiones interior y exterior. ¿Crees que podrías abrir una puerta de $0,90$ por $2,10 \text{ m}$ si la presión interior fuera de $2,54 \text{ cm}$ de agua (vacío)?

11. ¿Un °R representa un mayor o menor intervalo de temperatura que 1 K? ¿Cómo se transforma una temperatura expresada en la escala Kelvin a su valor equivalente en la escala Rankine?
12. ¿Qué dificultades podemos esperar si empleamos agua como sustancia termométrica en el termómetro de bulbo de la Fig. 1.9?
13. Observa cuidadosamente el entorno de un coche, una casa o un lugar de trabajo y haz una lista con todos los dispositivos de medida que encuentre. Explica el principio de operación de cada uno de ellos.

Problemas

Conceptos relativos al sistema

- 1.1 Explique el significado de los siguientes términos: sistema, volumen de control, propiedad, propiedad intensiva, estado de equilibrio, proceso, ciclo termodinámico, fase, proceso adiabático.
- 1.2 Explique el significado de los siguientes términos: sistema cerrado, sistema aislado, estado estacionario, propiedad extensiva, enfoque macroscópico, sustancia pura, proceso de cuasiequilibrio, magnitudes fundamentales, principio cero de la Termodinámica.
- 1.3 La corriente eléctrica de una batería se utiliza, según muestra la Fig. P1.3, para hacer funcionar un motor cuyo eje está conectado a un dispositivo masa–polea de modo que eleve la masa. Considerando el motor como un sistema, identifíquese sobre su frontera la parte por la que el sistema interactúa con su entorno y descríbanse los cambios que ocurren dentro del sistema, con el tiempo. Repítase para un sistema ampliado que incluya también la batería y el dispositivo masa–polea.

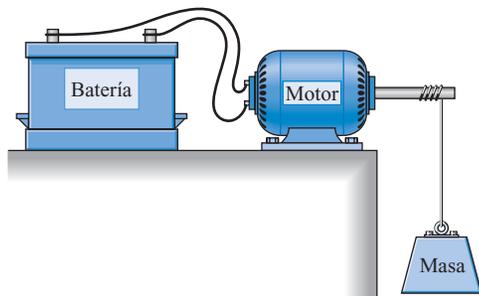


Figura P1.3

- 1.4 En relación con la Fig. 1.2, identifíquense las partes de la frontera del volumen de control por las que el sistema interactúa con su entorno.
- 1.5 Un sistema consiste en oxígeno líquido en equilibrio con oxígeno vapor. ¿Cuántas fases hay? El sistema experimenta un proceso durante el cual se vaporiza parte del líquido. ¿Puede tratarse el sistema durante dicho proceso como una sustancia pura? Explíquese. ¿Y si el sistema consiste en agua líquida en equilibrio con una mezcla de aire y vapor de agua?
- 1.6 Considérese un sistema que consiste en agua líquida y hielo. Dicho sistema experimenta un proceso en cuyo estado final el hielo se ha fundido y sólo queda líquido. ¿Puede considerarse el sistema una sustancia pura a lo largo del proceso? Explíquese.

Fuerza y masa

- 1.7 Las masas atómicas y moleculares de algunas sustancias comunes se recogen en la Tabla A–1 del Apéndice. Utilizando dicha tabla determínese el número de kmol en 50 kg de cada una de las siguientes sustancias: H_2 , N_2 , NH_3 , C_3H_8 .
- 1.8 Un objeto cuya masa es 3 kg está sometido a una fuerza vertical hacia arriba de 50 N. Sobre el objeto actúa, además, la fuerza de la gravedad. Determínese la aceleración del objeto, en m/s^2 , suponiendo que la aceleración de la gravedad es constante, $g = 9,81 m/s^2$.
- 1.9 Un objeto pesa 1000 N en un lugar en el que la aceleración de la gravedad es $g = 9,4 m/s^2$. Determínese la fuerza neta, en N, requerida para comunicarle una aceleración de $5,0 m/s^2$.

Volumen específico, presión

- 1.10 Un depósito contiene 0,3 kmol de gas dióxido de carbono (CO_2). El volumen ocupado por el gas es $2,5 m^3$. Determínese la masa de CO_2 , en kg, y el volumen específico sobre base molar, en $m^3/kmol$.

- 1.11** La tabla adjunta proporciona una serie de temperaturas y volúmenes específicos de vapor de agua para dos presiones:

$p = 0,1 \text{ MPa}$		$p = 0,12 \text{ MPa}$	
$T(^{\circ}\text{C})$	$v \text{ (m}^3/\text{kg)}$	$T(^{\circ}\text{C})$	$v \text{ (m}^3/\text{kg)}$
200	2,172	200	1,808
240	2,359	240	1,965
280	2,546	280	2,120

Los datos que aparecen al resolver problemas no caen, a menudo, con exactitud sobre la malla de valores que proporcionan las tablas de propiedades, por lo que resulta necesaria la *interpolación lineal* entre entradas adyacentes de la tabla. Utilizando los datos suministrados aquí, estímesse:

- (a) el volumen específico para $T = 200^{\circ}\text{C}$, $p = 0,113 \text{ MPa}$, en m^3/kg .
- (b) la temperatura para $p = 0,12 \text{ MPa}$, $v = 1,85 \text{ m}^3/\text{kg}$, en $^{\circ}\text{C}$
- (c) la temperatura para $p = 0,11 \text{ MPa}$, $v = 2,20 \text{ m}^3/\text{kg}$, en K.
- 1.12** Un sistema que consiste en 1 kg de gas sufre un proceso durante el cual la relación entre la presión y el volumen es $pV^{1,3} = \text{constante}$. El proceso se inicia con $p_1 = 1 \text{ bar}$, $V_1 = 1 \text{ m}^3$ y finaliza con $V_2 = 3 \text{ m}^3$. Determinése la presión final, p_2 , en bar, y represéntese el proceso en una gráfica de la presión frente al volumen.
- 1.13** Un sistema consiste en un dispositivo cilindro–pistón que contiene aire, inicialmente a $p_1 = 20 \text{ lbf/in.}^2$ y que ocupa un volumen de $1,5 \text{ ft}^3$. El aire se comprime hasta un volumen final de $0,5 \text{ ft}^3$. Durante el proceso, la relación entre la presión y el volumen es $pV^{1,4} = \text{constante}$. Determinése la presión final en lbf/in.^2 y en MPa.
- 1.14** Un dispositivo cilindro–pistón contiene 1 kg de refrigerante que es comprimido desde el estado 1, con $p_1 = 2 \text{ bar}$, $v_1 = 83,54 \text{ cm}^3/\text{kg}$, hasta el estado 2, con $p_2 = 10 \text{ bar}$, $v_2 = 21,34 \text{ cm}^3/\text{kg}$. Durante el proceso, la relación entre la presión y el volumen específico toma la forma $pv^n = \text{constante}$. Determinése el valor de la constante n .
- 1.15** Un manómetro está conectado a un depósito de gas en el que la presión es mayor que la del entorno. El líquido del manómetro es mercurio, con una densidad de $13,59 \text{ g/cm}^3$. La diferencia entre los niveles de mercurio en el manómetro es 2 cm. La aceleración de la gravedad es $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. La presión atmosférica es $93,0 \text{ kPa}$. Calcúlese en kPa,
- (a) la presión manométrica del gas.
- (b) la presión absoluta del gas.
- 1.16** La presión absoluta en el interior de un depósito de gas es $0,05 \text{ MPa}$ y la presión de la atmósfera circundante es 101

kPa. ¿Qué lectura, en kPa, proporcionaría un manómetro Bourdon montado sobre la pared del depósito? Esta lectura, ¿es una presión *manométrica* o de *vacío*?

- 1.17** Determinése la presión manométrica, en bar, equivalente a una lectura manométrica de 1 cm de

- (a) agua (densidad = 1000 kg/m^3).
- (b) mercurio (la densidad del mercurio es 13,59 veces la del agua).

- 1.18** El aire en una cámara cerrada tiene una presión absoluta de 80 kPa . La presión de la atmósfera circundante es equivalente a 750 mm de columna de mercurio. La densidad del mercurio es $13,59 \text{ g/cm}^3$ y la aceleración de la gravedad es $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Determinése la presión manométrica (o de vacío) dentro de la cámara, en bar.

- 1.19** La presión absoluta de un gas que entra en un compresor es $0,5 \text{ bar}$. A la salida del compresor la presión manométrica es $0,8 \text{ MPa}$. La presión atmosférica es 99 kPa . Determinése el cambio en la presión absoluta entre la entrada y la salida, en kPa.

- 1.20** El manómetro inclinado que muestra la Fig. P1.20 se utiliza para medir la presión de un gas. El líquido dentro del manómetro tiene una densidad de $0,8 \text{ g/cm}^3$ y la lectura del manómetro se indica en la figura. Si la presión atmosférica es 101 kPa y la aceleración de la gravedad es $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, ¿cuál es la presión absoluta del gas, en kPa?

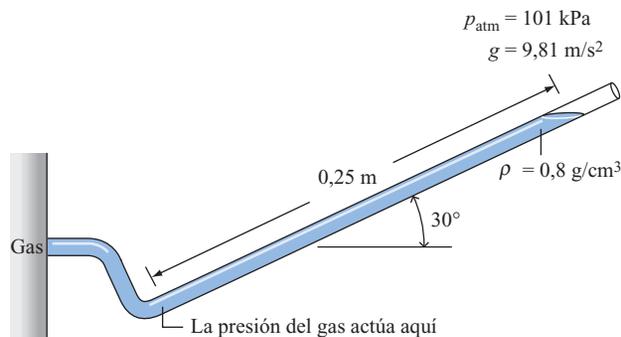


Figura P1.20

- 1.21** A través de una *sonda Venturi* fluye agua (fig. P1.21). La presión del agua en la tubería soporta el peso de columnas de agua que difieren 28 cm en altura. Determine la diferencia de presión entre los puntos a y b en Pa. ¿Crece la presión o se reduce en la dirección de la corriente? La presión atmosférica es 101 kPa . El volumen específico del agua es $0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$ y la aceleración de la gravedad es $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

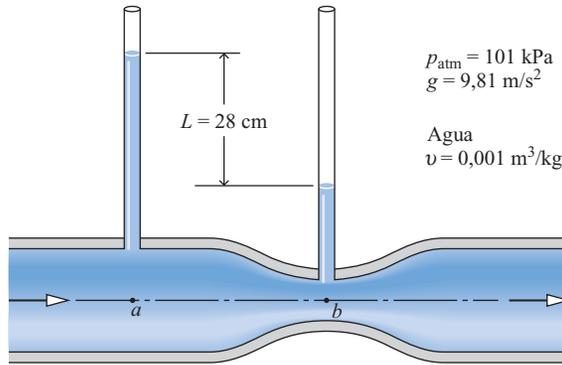


Figura P1. 21

1.22 La figura 1.22 muestra un depósito dentro de otro depósito, conteniendo aire ambos. El manómetro A está en el interior del depósito B y su lectura es 1,4 bar. El manómetro de tubo en U conectado al depósito B contiene mercurio. Con los datos del diagrama, determine la presión absoluta en el depósito A y en el depósito B, ambas en bar. La presión atmosférica en el exterior del depósito B es 101 kPa. La aceleración de la gravedad es 9,81 m/s².

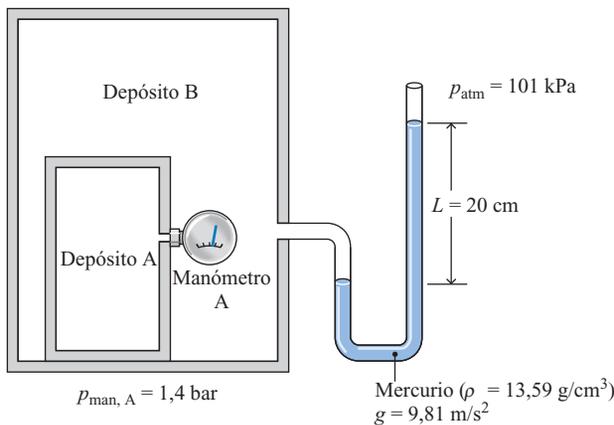


Figura P1. 22

Temperatura

1.23 Escriba un programa de ordenador que convierta valores expresados en unidades del Sistema Inglés a los correspondientes en unidades SI o viceversa, según prefiera. Incluya todas las conversiones que aparecen en la tabla de factores de conversión localizada en la contracubierta de portada de este libro.

1.24 Escriba un programa de ordenador que convierta temperaturas expresadas en °F, °R, °C o K a cualquier otro tipo de

unidades para la temperatura. Convierta las siguientes temperaturas desde °F a °C:

- (a) 70°F
- (b) 0°F
- (c) -30°F
- (d) 500°F
- (e) 212°F
- (f) -459,67°F

Convierta cada una a la escala Kelvin.

1.25 La relación entre la resistencia R y la temperatura T de un termistor es, aproximadamente

$$R = R_0 \exp \left[\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right]$$

donde R_0 es la resistencia, en ohmios (Ω), medida a la temperatura T_0 (K) y β es una constante del material con unidades de K. Para un termistor particular $R_0 = 2,2 \Omega$ para $T_0 = 310$ K. En un test de calibración se encuentra que $R = 0,31 \Omega$ para $T = 422$ K. Determinése el valor β para el termistor y obténgase una representación de la resistencia frente a la temperatura.

1.26 Se propone una nueva escala absoluta de temperatura. En esta escala el punto de hielo es 150°S y el punto de vapor es 300°S. Determine las temperaturas en °C que corresponden a 100° y 400°S, respectivamente. ¿Cuál es la relación del tamaño del °S al del Kelvin?

1.27 En un día de enero el termómetro de ambiente de una vivienda da la misma lectura del exterior sea en °C o °F. ¿Cuál es dicha temperatura? Exprésela en K y en °R.

1.28 La Fig. P1.28 muestra un flujo de vapor de agua que pasa por una válvula y entra en una turbina que acciona un generador eléctrico. La masa sale de la turbina con un flujo másico de 10.000 kg/h. Utilizando los datos de la figura,

- (a) convierta el flujo másico a kg/s.
- (b) exprese p_2 en MPa.
- (c) exprese T_1 en K.
- (d) exprese p_1 en bar.

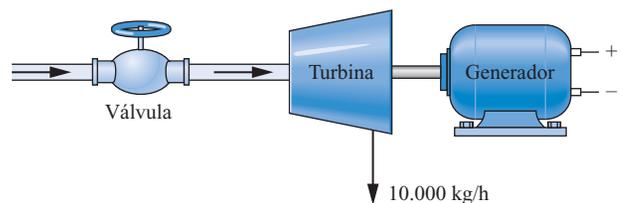


Figura P1. 28

Problemas de diseño y de final abierto

- 1.1D** Compare el índice analítico de este libro con el de su libro de Física o Química. Escriba un informe sobre las diferencias en el tratamiento de los diferentes temas. ¿Cuáles se tratan con mayor énfasis en Termodinámica técnica?
- 1.2D** Los recursos energéticos y las cuestiones ambientales son frecuentemente noticia en la actualidad. A lo largo del curso prepare un fichero de recortes de periódicos y revistas sobre estos temas y prepare un informe sobre un aspecto concreto de un determinado tema que sea de su interés.
- 1.3D** Escriba un informe sobre los principios y objetivos de la *Termodinámica estadística*. ¿En qué difieren del enfoque macroscópico de la Termodinámica que recoge este texto? Explíquelo.
- 1.4D** Tome un vaso ordinario de vidrio lleno de agua, coloque sobre él una cartulina, tapándolo, y déle la vuelta. Si suelta la cartulina comprobará que el agua permanece en el vaso retenida por la cartulina. Desarrolle los cálculos apropiados que expliquen este hecho. Repita la operación con un cuadrado de hoja de aluminio en lugar de la cartulina y comente los resultados. ¿Puede pensar en una aplicación práctica de esto?
- 1.5D** Obtenga información de fabricantes de tres tipos diferentes de sensores para presiones en el rango de 0 a 70 kPa. Explique los principios básicos de operación de cada sensor y compare sus ventajas y desventajas respectivas. Considere sensibilidad, precisión, calibración y coste.
- 1.6D** Obtenga información de fabricantes de sensores con termopares y termistores para medir temperaturas de los gases calientes de la combustión en un horno. Explique los principios básicos de la operación de cada sensor y compare sus ventajas y desventajas respectivas. Considere sensibilidad, precisión, calibración y coste.
- 1.7D** Haga una lista de diversos aspectos económicos e ingenieriles significativos en el diseño. ¿Cuáles son los que más contribuyen al *coste* y que por lo tanto deberían ser considerados en el diseño ingenieril? Discuta lo que se entiende por *costes anualizados*.