

CAPÍTULO 22

TEMPERATURA

Hasta aquí hemos tratado, en su momento, la mecánica de las partículas aisladas, los sistemas de partículas, los cuerpos rígidos, y los fluidos. En cada caso, hemos utilizado de una forma u otra las leyes de Newton para analizar la dinámica del sistema y estudiar a la vez los movimientos de la partícula por separado o los movimientos de los elementos del sistema.

A partir de este capítulo, ampliamos ahora nuestra perspectiva para tratar con sistemas que resultan demasiado complejos como para tratarlos en términos del movimiento de la partícula por separado. Estos sistemas aparecen por lo general desordenados debido al gran número de partículas implicadas y a las muy diferentes maneras en que pueden compartir la energía del sistema. Para analizar estos sistemas hacemos uso de los principios de la termodinámica. En nuestro estudio de la termodinámica definiremos un nuevo conjunto de variables físicas para describir el estado de un sistema, y deduciremos un nuevo conjunto de leyes que rigen el comportamiento de los sistemas. También demostraremos cómo pueden entenderse estas nuevas leyes sobre la base de nuestras leyes previas de la mecánica.

Un concepto central de la termodinámica es la temperatura. En este capítulo damos la definición de la temperatura y exponemos la forma de medirla.

22-1 DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA Y DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

Un litro de gas contiene unas 3×10^{22} moléculas. Tomemos el caso más sencillo posible y tratemos a las moléculas del gas como partículas puntuales que chocan elásticamente entre sí y con las paredes del recipiente que las contiene. Si especificamos la posición y la velocidad iniciales de cada partícula, podemos entonces aplicar las leyes de Newton y deducir la posición y la velocidad de cada partícula en cualquier momento futuro. Dada esa información, podemos calcular ciertas propiedades mensurables del sistema, tales como la fuerza impulsiva neta ejercida sobre un elemento de área del recipiente. Llamamos a esto la descripción *microscópica* del sistema. Puesto que el número de partículas es tan grande, nos resulta ventajoso tratar al sistema usando valores promedio de las cantidades microscópicas. Este enfoque se llama *mecánica estadística* y se discute en el capítulo 24.

Un enfoque distinto se basa en la pregunta siguiente: ¿Podemos describir al sistema, incluyendo sus interacciones mutuas con su entorno, en términos de un número

pequeño de propiedades del conjunto que sean mensurables por medio de operaciones relativamente sencillas llevadas a cabo en el laboratorio? En el caso de un gas confinado en un recipiente, podemos realmente obtener tal descripción en términos de las cantidades *macroscópicas*, como presión, volumen, temperatura, cantidad de materia, y energía interna, entre otras. En sistemas diferentes a un gas, podemos definir y medir diferentes variables macroscópicas. Por ejemplo, en un material ferromagnético como el hierro, las partículas no interactúan por fuerzas impulsoras en las colisiones sino por fuerzas magnéticas; en la descripción macroscópica de un material ferromagnético, la magnetización debe ser incluida entre las cantidades macroscópicas.

Usualmente las propiedades macroscópicas pueden medirse directamente en el laboratorio, por ejemplo, la presión de un gas confinado o la magnetización de un trozo de hierro. Podemos también medir fácilmente la variación de cualquiera de tales propiedades con la temperatura y derivar una *ecuación de estado* que describa la dependencia de las variables macroscópicas entre sí.

En cualquier sistema, las cantidades macroscópica y las microscópicas deben relacionarse porque son modos sim-

plemente diferentes de describir la misma situación. En particular, deberíamos ser capaces de expresarla una en términos de la otra. La presión de un gas, una cantidad macroscópica, se mide operativamente usando un manómetro. Microscópicamente, la presión se relaciona con la cantidad promedio por unidad de área en que las moléculas del gas liberan ímpetu al fluido del manómetro al chocar con su superficie. En la sección 23-3 cuantificamos esta definición microscópica de la presión. De igual forma (véase la sección 23-4), la temperatura de un gas (cantidad macroscópica también) se relaciona con la energía cinética promedio de traslación de las moléculas.

Si las cantidades macroscópicas pueden expresarse en términos de las cantidades microscópicas, entonces las leyes de la termodinámica pueden expresarse cuantitativamente en términos de la mecánica estadística. Esta posibilidad es uno de los logros en el desarrollo de la física. Este tema de la relación entre las variables macroscópicas y microscópicas surgirá con frecuencia según avancemos en el estudio de la termodinámica.

22-2 TEMPERATURA Y EQUILIBRIO TÉRMICO

Consideremos los dos sistemas A y B ilustrados en la figura 1a. Están “aislados” uno del otro y del entorno. Por “aislados” queremos decir que ni la energía ni la materia pueden entrar o salir de cualquiera de los sistemas. Por ejemplo, los sistemas podrían estar rodeados por paredes hechas de placas gruesas de espuma de poliestireno (styrofoam), las que supuestamente son tanto rígidas como impermeables. En este caso se dice que las paredes son *adiabáticas*. (El término “adiabático” proviene del griego y quiere decir “que no puede ser atravesado”. Así, “adiabático” puede entenderse como “aislante”.) Los cambios en las propiedades de un sistema no tienen efecto sobre el otro sistema.

Podemos sustituir la pared adiabática que separa a A y a B por otra que permita el flujo de la energía (Fig. 1b) en una forma que conoceremos como calor. Un ejemplo podría ser una lámina de cobre delgada pero rígida. Esta pared se llama *diatérmica* (Este término, que también proviene del griego, significa que “el calor pasa a través de él”, por lo que podemos tomarlo con la connotación de “conductor de calor”).

Cuando dos sistemas están en mutuo contacto a través de una pared diatérmica, el intercambio de energía causa que las propiedades macroscópicas de los dos sistemas cambien. Por ejemplo, si los sistemas son gases confinados, la presión debería ser una de las cantidades macroscópicas que cambian. Los cambios son relativamente rápidos al principio, pero se vuelven cada vez más lentos en el transcurso del tiempo, hasta que finalmente las

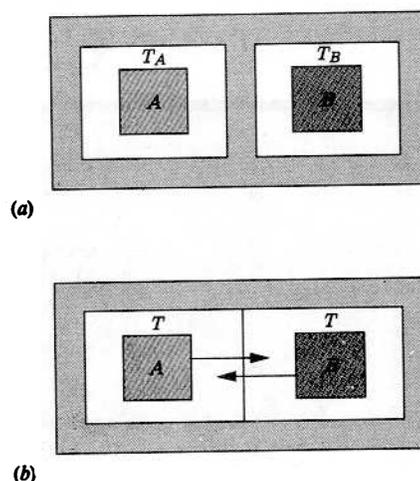


Figura 1 (a) Los sistemas A y B están separados por una pared adiabática. Los sistemas tienen temperaturas diferentes T_A y T_B . (b) Los sistemas A y B están separados por una pared diatérmica. Los sistemas, por haber llegado al equilibrio térmico, tienen la misma temperatura T .

propiedades macroscópicas se aproximan a valores constantes. Cuando ocurre esto, decimos que los dos sistemas están en *equilibrio térmico* entre sí.

Una manera de probar si los cuerpos están en equilibrio térmico es ponerlos en contacto a través de una pared diatérmica y observar si las propiedades macroscópicas de los sistemas cambian con el tiempo después de haber sido puestos en contacto. Si con el tiempo no se observan cambios en las propiedades macroscópicas, los sistemas estaban originalmente en equilibrio térmico. Sin embargo, pudiera ser inconveniente y hasta imposible mover a los dos sistemas con el fin de ponerlos en contacto entre sí. (Los sistemas podrían ser demasiado voluminosos para moverlos fácilmente, o podrían estar separados por una distancia muy grande.) Por lo tanto, generalizamos el concepto de equilibrio térmico de modo que los sistemas no necesariamente tienen que estar en contacto entre sí. Se dice que los cuerpos separados están en equilibrio térmico cuando están en estados tales que, si *estuviesen* conectados, estarían en equilibrio térmico.

La manera de probar si tales sistemas separados están en equilibrio térmico es usar un tercer sistema C . Al poner a C en contacto con A y luego con B , podríamos saber si A y B están en equilibrio térmico sin poner en contacto directo a A y a B . Esto se resume en un postulado llamado la *ley cero de la termodinámica* que se enuncia como sigue:

Si los sistemas A y B están cada uno en equilibrio térmico con un tercer sistema C , entonces A y B están en equilibrio térmico entre sí.

Esta ley puede parecer simple, pero no es del todo obvia. Si A , B , y C fueran personas, podría ser cierto que

A y C conocieran a B y que no se conocieran entre sí. Si A y C son trozos de hierro no imantados y B es un imán, entonces A y C son ambos atraídos por B sin ser atraídos entre sí.

A la ley cero se le ha llamado idea lógica tardía. Salió a la luz la década de 1930, mucho tiempo después de que la primera y segunda leyes de la termodinámica hubieran sido propuestas y aceptadas. Como veremos más adelante, la ley cero define en efecto el concepto de temperatura, fundamental en las leyes primera y segunda de la termodinámica. La ley que establece la temperatura debería tener un número más bajo; de aquí que se le llame ley cero.

La temperatura

Cuando dos sistemas están en equilibrio térmico, decimos que tienen la misma *temperatura*. A la inversa, la temperatura es aquella propiedad de un sistema que iguala a la de otro sistema cuando los dos sistemas están en equilibrio térmico. Por ejemplo, supongamos que los sistemas son dos gases que inicialmente tienen temperatura, presión, y volumen diferentes. Después de haber sido puestos en contacto y esperado un tiempo lo suficientemente largo para que lleguen al equilibrio térmico, sus presiones no serán en general iguales, como tampoco sus volúmenes; sin embargo, sus temperaturas siempre serán iguales en el equilibrio térmico. Sólo mediante este argumento basado en el equilibrio térmico puede introducirse en la termodinámica la noción de temperatura.

Aunque la temperatura, en su uso cotidiano, es algo que resulta familiar para todos nosotros, es necesario darle un significado preciso para que tenga valor como unidad de medida científica. Nuestra noción subjetiva de la temperatura no es totalmente confiable. Por ejemplo, suponga que está usted sentado en su casa en una silla hecha parcialmente de tela, madera y metal. Toque las diversas partes de la silla para decidir cuál es “la más fría”, al decir, cuál tiene la temperatura más baja. Es probable que llegue usted a la conclusión de que las partes de metal son las más frías. Sin embargo, cabría suponer que todas las partes de la silla han estado en la sala el tiempo suficiente como para estar en equilibrio térmico con el aire y, por lo tanto, deberían tener la misma temperatura que el aire. Lo que usted examina, al tocar el metal, es no sólo la temperatura de la silla sino también la capacidad de ésta para conducir el calor proveniente de su mano (presumiblemente más caliente). En este caso, su mano realiza una medición subjetiva e incorrecta de la temperatura. Además, ese juicio subjetivo cambiará con el tiempo, si mantiene su mano sobre el metal, cuando la mano y el metal alcancen el equilibrio térmico entre sí.

Puede usted también examinar esa subjetividad que mencionamos mojado una mano en agua fría y la otra en agua caliente. Comprobará que, al tomar un objeto de

temperatura intermedia, la primera mano siente una temperatura más alta que la segunda. Puede tratar de ser un poco más objetivo y comparar dos muestras diferentes del mismo material a temperaturas diferentes tocando cada muestra con la misma mano, la cual puede distinguir “lo más caliente” de “lo más frío”. Este procedimiento debería revelar cuál de los dos objetos está a una temperatura más alta, pero difícilmente es lo bastante cuantitativo como para que nos pueda dar la diferencia. Por lo tanto, es necesario especificar cuidadosamente una manera objetiva de medir la temperatura, lo cual constituye nuestro objetivo en este capítulo.

En el uso práctico de la ley cero, deseamos identificar al sistema C como un termómetro. Si el termómetro entra por separado en equilibrio térmico con los sistemas A y B e indica la misma temperatura, entonces podemos concluir que A y B están en equilibrio térmico y, por lo tanto, que tienen realmente la misma temperatura.

Otro postulado de la ley cero, más riguroso y más fundamental, es el siguiente:

Existe una cantidad escalar, llamada temperatura, que es una propiedad de todos los sistemas termodinámicos en equilibrio. Dos sistemas están en equilibrio térmico si y sólo si sus temperaturas son iguales.

La ley cero define entonces el concepto de temperatura y lo especifica como aquella propiedad macroscópica de un sistema que será igual a la de otro sistema cuando estén en equilibrio térmico. La ley cero nos permite construir y usar los termómetros para medir la temperatura de un sistema, ya que ahora sabemos que un termómetro en contacto térmico con un sistema alcanzará una temperatura común con el sistema.

22-3 MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA

En el capítulo 1 describíamos un procedimiento de dos etapas para establecer un patrón de medición o estándar de una cantidad física: definíamos una unidad básica, y luego especificábamos un procedimiento para hacer comparaciones con tal unidad básica. Por ejemplo, en el caso del tiempo, definíamos a la unidad básica en términos de la frecuencia de la luz de cierta longitud de onda emitida por los átomos de cesio. Para que pase 1 segundo se necesitan 9,192,631.770 de esas vibraciones. Contando el número de vibraciones correspondiente podemos usar (al menos en principio) esta escala para medir la vida media humana o incluso la edad del universo.

La temperatura es una de las siete unidades básicas (véase la tabla 1 del capítulo 1), por lo que podemos tratar la temperatura como hemos tratado a otras unidades básicas en el sistema SI: estableciendo un estándar y relacio-

nando a las demás escalas con el estándar. Sin embargo, la temperatura tiene una naturaleza diferente de la de otras unidades básicas en el SI, y, por lo tanto, este esquema no actuará realmente en esa forma simple. Por ejemplo, si definimos a un periodo de vibración de la luz emitida por un átomo de cesio como un patrón de tiempo, entonces dos de tales vibraciones duran el doble de tiempo, y cualquier intervalo de tiempo arbitrario puede ser, en efecto, medido en términos del número de vibraciones. Pero, incluso si definimos un estándar de temperatura, como la del agua hirviendo en ciertas condiciones, no tenemos un procedimiento para determinar una temperatura el doble de grande. Después de todo, dos marmitas de agua hirviendo tienen la misma temperatura que una marmita. No existe forma aparente de usar sólo este patrón para poder relacionar la temperatura del agua hirviendo con la del aceite hirviendo, por ejemplo; ninguna cantidad de agua en ebullición estará jamás en equilibrio térmico con el aceite en ebullición.

Para establecer una escala de medición de la temperatura adoptamos el procedimiento siguiente, que difiere del procedimiento usual para las unidades básicas del SI: buscamos una sustancia que tenga una propiedad que varíe con la temperatura, y medimos esa propiedad. La sustancia que elegimos se llama *sustancia termométrica*, y la propiedad que depende de la temperatura se llama *propiedad termométrica*. Ejemplos de ello podrían ser el volumen de un líquido (como en el termómetro de mercurio con bulbo de vidrio común), la presión de un gas mantenido a volumen constante, la resistencia eléctrica de un alambre, la longitud de una tira de metal, o el color del filamento de una lámpara, todos los cuales varían con la temperatura. *La elección de una de estas sustancias lleva a una escala individual de temperatura definida sólo para esa sustancia y que no necesariamente concuerda con otras escalas de temperatura definidas de manera independiente.* Para eliminar esta discrepancia es necesario adoptar estándares para la elección de determinada sustancia termométrica, determinada propiedad termométrica, y determinada relación entre esa propiedad y una escala de temperatura universalmente aceptada. Cada escala de temperatura por separado puede entonces ser calibrada contra la escala universal. En las secciones 22-4 y 26-5 describimos la escala universal aceptada.

Supongamos que nuestro termómetro está basado en un sistema en el cual medimos el valor de la propiedad termométrica X . La temperatura T es alguna función de X , $T(X)$. Elegimos la relación más sencilla posible entre T y X , la función lineal dada por

$$T(X) = aX + b, \quad (1)$$

donde deben ser determinadas las constantes a y b . Esta escala lineal significa que cada intervalo de temperatura ΔT corresponde al mismo cambio ΔX en el valor de la propiedad termométrica. Para determinar una temperatura

en esta escala, elegimos dos puntos de calibración, definimos arbitrariamente las temperaturas T_1 y T_2 en esos puntos, y medimos los valores correspondientes X_1 y X_2 de la propiedad termométrica.

Los ejemplos más conocidos de este tipo de escala son las escalas Celsius y Fahrenheit usadas en los termómetros comunes, en los que la sustancia termométrica suele ser el mercurio y la propiedad termométrica puede ser su volumen, observado en la longitud de la columna de mercurio en un tubo delgado de vidrio. El comportamiento lineal significa en este caso que los intervalos entre las marcas de los grados en el tubo de vidrio de un termómetro son de tamaño uniforme.

Las escalas Celsius y Fahrenheit*

En casi todos los países del mundo se emplea la escala Celsius (también llamada escala de grados centígrados) para todas las mediciones populares y comerciales y la mayoría de las científicas. La escala Celsius se basó originalmente en dos puntos de calibración: el punto normal de congelación del agua, que se definió como 0°C , y el punto normal de ebullición del agua, que se definió como 100°C . Estos dos puntos se emplearon para calibrar termómetros, y luego se dedujeron las demás temperaturas por interpolación y extrapolación. Para expresar la temperatura en la escala Celsius, la cifra dada debe ir siempre acompañada del símbolo de grados ($^\circ$).

La escala Fahrenheit emplea un grado más pequeño que la escala Celsius, y su cero se establece a una temperatura diferente. Originalmente se basó también en dos puntos fijos, cuyo intervalo se dividió en 100 grados: el punto de congelación de una mezcla de hielo y sal, y la temperatura normal del cuerpo humano. En esta escala, los puntos normales de congelación y de ebullición del agua vienen a ser, respectivamente, 32°F y 212°F . La relación entre las escalas Celsius y Fahrenheit es

$$T_F = \frac{9}{5}T_C + 32. \quad (2)$$

También en la escala Fahrenheit, debe utilizarse el símbolo de grados para expresar la temperatura como, por ejemplo, 98.6°F (la temperatura normal del cuerpo humano).

La conversión entre las escalas Fahrenheit y Celsius se lleva a cabo fácilmente recordando unos cuantos puntos

* Anders Celsius (1701-1744) fue un astrónomo sueco que, además de desarrollar la escala de temperatura que lleva su nombre, hizo mediciones de la longitud del arco de un meridiano, lo cual sirvió para corroborar la teoría de Newton sobre el achatamiento de la Tierra en los polos. Daniel Fahrenheit (1686-1736), contemporáneo de Celsius, fue un físico alemán que inventó los termómetros con líquidos de alcohol y de mercurio y los empleó para estudiar los puntos de ebullición y de congelación de los líquidos.

respectivos, tales como el punto normal de congelación ($0^{\circ}\text{C} = 32^{\circ}\text{F}$) y el punto normal de ebullición ($100^{\circ}\text{C} = 212^{\circ}\text{F}$) del agua, y haciendo uso de la igualdad entre un intervalo de 5 grados en la escala Celsius y un intervalo de 9 grados en la escala Fahrenheit, lo cual expresamos así:

$$9^{\circ}\text{F} = 5^{\circ}\text{C}. \quad (3)$$

Obsérvese que estos intervalos se expresan como $^{\circ}\text{F}$ y $^{\circ}\text{C}$, y no como $^{\circ}\text{F}$ y $^{\circ}\text{C}$. Las lecturas de la escala de temperatura se dan en $^{\circ}\text{F}$ o en $^{\circ}\text{C}$ (grados Fahrenheit o grados Celsius); las diferencias de lectura se dan en $^{\circ}\text{F}$ o en $^{\circ}\text{C}$ (grados Fahrenheit o grados Celsius).

La escala Kelvin*

En la escala Kelvin, uno de los puntos de calibración se define en una temperatura de cero, donde la propiedad termométrica tiene también un valor de cero; en efecto, la constante b de la ecuación 1 se establece como cero, en cuyo caso

$$T(X) = aX. \quad (4)$$

Para determinar una temperatura en esta escala necesitamos únicamente un punto P de calibración. En ese punto, se define que la temperatura es T_P y la propiedad termométrica tiene el valor medido X_P . En este caso

$$a = \frac{T_P}{X_P} \quad (5)$$

y por lo tanto

$$T(X) = T_P \frac{X}{X_P}. \quad (6)$$

Siguiendo la norma general, escogemos para nuestra calibración la temperatura a la cual coexisten en equilibrio el hielo, el agua líquida, y el vapor de agua. Este punto, que está muy cercano al punto normal de congelación del agua, se llama *punto triple* del agua (Fig. 2). Por acuerdo internacional se ha establecido que la temperatura en el punto triple sea

$$T_{tr} = 273.16 \text{ K},$$

donde K (= kelvin) es la unidad básica en el SI para la temperatura en la escala absoluta, idéntica a la escala de

* Lord Kelvin (William Thomson, 1824-1907) fue un físico e ingeniero escocés que contribuyó fundamentalmente a una amplia variedad de temas, incluyendo no sólo la termodinámica sino también la ley de conservación de la energía, la electricidad y el magnetismo, la acústica, y la hidrodinámica. Sus contribuciones científicas fueron conceptuadas como de enorme importancia en su época, por lo que, a su muerte, recibió sepultura en la Abadía de Westminster, en Londres.

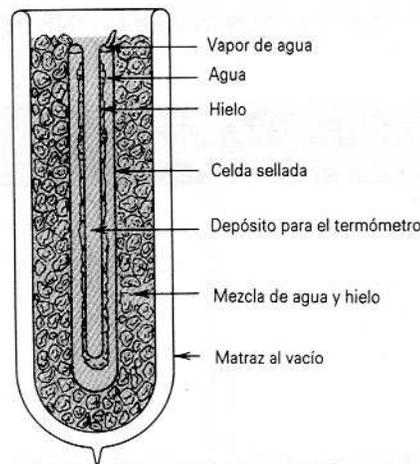


Figura 2 La celda del punto triple del National Institute of Standards and Technology (anteriormente la National Bureau of Standards) de Estados Unidos. La celda interior en forma de U contiene agua pura y está sellada, después de haberse extraído de ella todo el aire. Está sumergida en un baño de agua y hielo. El sistema está en el punto triple cuando el hielo, el agua, y el vapor de agua están todos ellos presentes, y en equilibrio, dentro de la celda. El termómetro que va a ser calibrado se inserta en el pozo central.

temperatura del gas ideal que se estudia en la sección siguiente. Así pues, se define que el kelvin es $1/273.16$ de la temperatura del punto triple del agua. Con esta elección del punto de calibración, la ecuación 6 resulta

$$T(X) = (273.16 \text{ K}) \frac{X}{X_{tr}}, \quad (7)$$

donde X_{tr} es el valor de la propiedad termométrica en el punto triple.

Una temperatura determinada a partir de la ecuación 7 es válida únicamente para esa propiedad termométrica en particular; otras propiedades termométricas y sustancias termométricas pueden dar lecturas de temperatura diferentes (véase al problema muestra 1). Para eliminar esta confusión entre las lecturas de termómetros diferentes, elegimos como norma aceptada un tipo de termómetro en el que la temperatura pueda determinarse independientemente de la naturaleza de la sustancia termométrica. Esta elección se trata en la sección siguiente.

El tamaño del grado es el mismo en las escalas Celsius y Kelvin, pero el cero de la escala Celsius se desplaza a un valor más conveniente. Hoy día ya no empleamos dos puntos fijos para definir la escala Celsius; en cambio, la escala Kelvin se define, y la relación entre la temperatura Celsius T_C y la temperatura Kelvin T ahora se establece así:

$$T_C = T - 273.15. \quad (8)$$

Los puntos de congelación y de ebullición del agua se miden ahora en la escala Kelvin y se convierten luego a

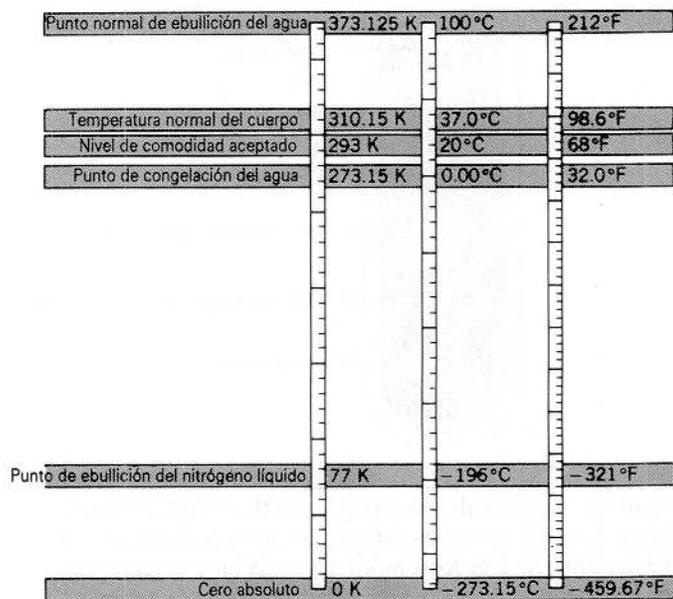


Figura 3 Comparación de las escalas Kelvin, Celsius, y Fahrenheit.

Celsius usando la ecuación 8. Los valores experimentales son, respectivamente, 0.00°C y 99.975°C. La figura 3 compara las escalas Fahrenheit, Celsius, y Kelvin.

Problema muestra 1 La resistencia de cierto alambre de platino aumenta en un factor de 1.392 entre el punto triple del agua y el punto de ebullición normal de ésta. Halle la temperatura por resistencia del platino del agua en ebullición.

Solución Usamos la ecuación 7, con la resistencia R como la propiedad termométrica X . No se nos da el valor de R_{tr} , pero sabemos que en el punto de ebullición del agua, $R = 1.392R_{tr}$. Entonces

$$T(R) = T_{tr} \frac{R}{R_{tr}} = (273.16 \text{ K})(1.392) = 380.2 \text{ K}.$$

Este valor da la "temperatura por resistencia del platino" del agua en ebullición. Otros termómetros darán valores diferentes; por ejemplo, la temperatura del agua hirviendo según un termopar de cobre-constantano es de 440 K. Cada una de estas lecturas es una temperatura determinada en una escala "propia", válida únicamente para ese aparato. La temperatura aceptada del punto de ebullición normal del agua es de 373.125 K, la cual se determina usando el termómetro de gas a volumen constante que se describe en la sección siguiente.

22-4 LA ESCALA DE TEMPERATURA DE UN GAS IDEAL

La temperatura de un sistema debe tener un valor bien definido, independiente del medio empleado para medir-

la. Según la ecuación 7, sustancias termométricas diferentes dan todas la misma temperatura en el punto triple, pero (como lo hemos visto en el problema muestra 1) sus lecturas en otros puntos pueden diferir. Podríamos imaginar efectuar una serie de mediciones en que simultáneamente empleásemos propiedades termométricas distintas para determinar la temperatura de un sistema. Los resultados de tal prueba demostrarían que todos los termómetros dan lecturas diferentes. Podríamos continuar eligiendo una propiedad termométrica en particular, tal como la resistencia de un alambre, y medir la temperatura del sistema usando diferentes clases de alambre, hechos con materiales diferentes: de nuevo hallaríamos una amplia variación en las mediciones.

Para obtener una escala de temperatura definida, debemos elegir determinada clase de termómetro como estándar. La elección se haría, no sobre la base de la conveniencia experimental, sino averiguando si la escala de temperatura definida por un termómetro en particular es útil para formular las leyes de la física. La variación de lecturas más pequeña se encuentra que es entre los *termómetros de gas a volumen constante* que utilizan gases diferentes, lo cual sugiere elegir un gas como sustancia termométrica estándar. Sucede que cuando se reduce la cantidad de gas y por lo tanto su presión, la variación de las lecturas entre termómetros de gas que usan diferentes clases de gas se reduce también. De aquí que parezca haber algo fundamental respecto al comportamiento de un termómetro a volumen constante que contenga un gas a baja presión. Consideremos por lo tanto las propiedades del termómetro de gas a volumen constante.

Si el volumen de un gas se mantiene constante, su presión depende de la temperatura y aumenta linealmente con la elevación de la temperatura. El termómetro de gas a volumen constante emplea la presión de un gas a volumen constante como la propiedad termométrica.

La figura 4 muestra un diagrama del termómetro. Consiste de un bulbo de vidrio, porcelana, cuarzo, platino, o una aleación de platino e iridio (dependiendo de la gama de temperaturas dentro de la cual se use), conectado por medio de un tubo capilar a un manómetro de mercurio. El bulbo B que contiene algún gas es puesto dentro del baño o entorno cuya temperatura T va a ser medida; al elevar o bajar el recipiente de mercurio R , el mercurio en la rama izquierda del tubo en U puede hacerse coincidir con una marca de referencia fija, manteniendo así a volumen constante al gas confinado. La diferencia entre la presión p del gas confinado en la rama izquierda del tubo y la presión p_0 de la atmósfera en la rama derecha del tubo está indicada por la altura h de la columna de mercurio, y entonces

$$p = p_0 - \rho gh, \tag{9}$$

donde ρ es la densidad del mercurio en el manómetro.

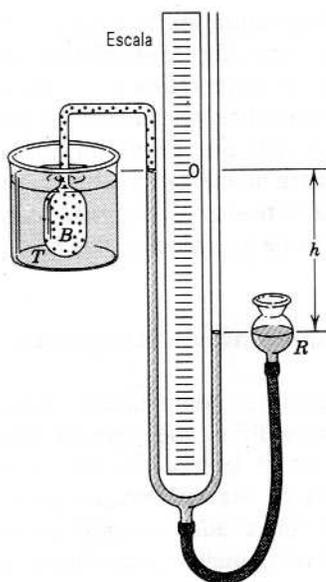


Figura 4 Termómetro de gas a volumen constante. El bulbo B está sumergido en un baño cuya temperatura T va a ser medida. La diferencia entre la presión del gas en el bulbo y la presión atmosférica se determina por la altura h de la columna de mercurio.

En la práctica el aparato es muy elaborado, y debemos llevar a cabo muchas correcciones, por ejemplo, (1) para compensar el pequeño cambio de volumen debido a la ligera contracción o expansión del bulbo y (2) para compensar el hecho de que no se ha sumergido en el baño todo el gas confinado (como el que se halla en el capilar). Supongamos que se han efectuado todas las correcciones, y que p es el valor corregido de la presión absoluta a la temperatura del baño. Entonces la temperatura se da provisionalmente por la fórmula

$$T(p) = (273.16 \text{ K}) \frac{p}{p_{tr}} \quad (\text{a } V \text{ constante}). \quad (10)$$

Pongamos cierta cantidad de gas, por ejemplo nitrógeno, dentro del bulbo de modo que cuando el bulbo esté rodeado de agua en el punto triple la presión p_{tr} sea igual a un valor definido, digamos 80 cm de Hg. Ahora sumergimos el bulbo en el sistema cuya temperatura T deseamos medir y, con el volumen mantenido constante en su valor previo, medimos la presión p del gas, según la ecuación 9, y calculamos la temperatura provisional T del sistema usando la ecuación 10. El resultado de esta medición se indica con un punto en la figura 5. Regresemos ahora el termómetro a la celda de punto triple y retiremos algo de gas, de modo que p_{tr} tenga un valor más pequeño, digamos 40 cm de Hg. Regresamos luego el termómetro al sistema desconocido, medimos el nuevo valor de p , y calculamos otra temperatura provisional T , indicada también en la figura 5. Continuamos con este mismo procedimiento,

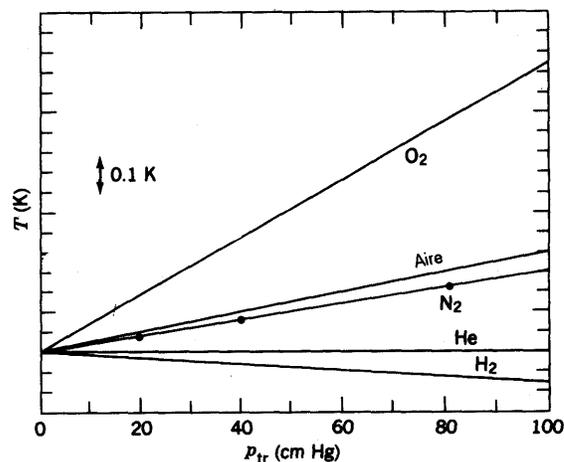


Figura 5 Cuando se reduce la presión del gas nitrógeno en un termómetro de gas a volumen constante de 80 cm de Hg a 40 y luego a 20, la temperatura calculada para el sistema tiende a un límite que corresponde a una presión de 0. Otros gases tienden al mismo límite, el cual es la temperatura T de gas ideal del sistema. La gama completa de la escala vertical es alrededor de 1 K para condiciones típicas.

reduciendo la cantidad de gas en el bulbo y calculando la temperatura T para cada nuevo valor más bajo de p_{tr} . Si graficamos los valores de T contra p_{tr} , podemos extrapolar la curva resultante hasta la intersección con el eje donde $p_{tr} = 0$. En la figura 5 se muestran los puntos-dato para el N_2 y la extrapolación en línea recta resultante.

Repetimos este procedimiento con otros gases en el termómetro diferentes al nitrógeno, y obtenemos los resultados mostrados en la figura 5. Las líneas muestran que las lecturas de la temperatura de un termómetro de gas a volumen constante depende del gas empleado a valores ordinarios de la presión de referencia. Sin embargo, al disminuir la presión de referencia, las lecturas de temperatura de los termómetros de gas a volumen constante que empleen gases diferentes tienden al mismo valor T , el cual podemos considerar como la temperatura del sistema. *El valor extrapolado de la temperatura depende sólo de las propiedades generales de los gases y no de un gas en particular.* Por lo tanto, definimos la *escala de temperatura de gas ideal*:

$$T = (273.16 \text{ K}) \lim_{p_{tr} \rightarrow 0} \frac{p}{p_{tr}} \quad (\text{a } V \text{ constante}). \quad (11)$$

Elegimos como termómetro estándar un termómetro de gas a volumen constante que use una escala de temperatura definida por la ecuación 11.

Si la temperatura ha de ser en verdad una cantidad física fundamental, una en la que las leyes de la termodinámica puedan expresarse, es absolutamente necesario que su definición sea independiente de las propiedades de materiales específicos. Por ejemplo, no serviría que una canti-

TABLA 1 TEMPERATURAS DE ALGUNOS SISTEMAS

Sistema	Temperatura (K)
Plasma en un reactor de pruebas de fusión	10^8
Centro del Sol	10^7
Superficie del Sol	6×10^3
Punto de fusión del tungsteno	3.6×10^3
Punto de congelación del agua	2.7×10^2
Punto de ebullición normal del N_2	77
Punto de ebullición normal del 4He	4.2
Temperatura media del universo	2.7
Refrigerador por dilución $^3He - ^4He$	5×10^{-3}
Desimantación adiabática de la sal paramagnética	10^{-3}
Enfriamiento por espín nuclear	2×10^{-8}

dad básica como la temperatura dependiese de la dilatación del mercurio, de la resistividad eléctrica del platino, o de cualquier otra propiedad listada en algún manual. Elegimos al termómetro de gas como nuestro instrumento estándar precisamente porque en su operación no se hallan implicadas tales propiedades específicas de los materiales. Podemos usar cualquier gas y siempre obtendremos la misma respuesta.

Si bien nuestra escala de temperatura es independiente de las propiedades de cualquier gas determinado, sí depende, en cambio, de las propiedades de los gases en general (es decir, de las propiedades del así llamado gas ideal). La temperatura más baja que puede ser medida con un termómetro de gas es de alrededor de 1 K. Para obtener esta temperatura debemos emplear helio a baja presión, el cual permanece como gas a temperaturas más bajas que cualquier otro gas. No podemos dar un significado experimental a temperaturas por debajo de 1 K por medio de un termómetro de gas.

Nos gustaría definir una escala de temperatura de modo tal que sea independiente de las propiedades de cualquier sustancia en particular. En la sección 26-5 mostramos que la escala de temperatura termodinámica absoluta, llamada la escala Kelvin, es esa escala. Mostraremos también que la escala del gas ideal y la escala Kelvin son idénticas en la gama de temperaturas en que puede ser empleado un termómetro de gas. Por esta razón usamos unidades kelvin para la temperatura del gas ideal, como ya lo hicimos en la ecuación 11. La tabla 1 lista las temperaturas en kelvin de varios cuerpos y procesos.

En la sección 26-5 mostraremos también que la escala Kelvin tiene un *cero absoluto* de 0 K y que es imposible enfriar un sistema por debajo de 0 K. El cero absoluto de temperatura ha desafiado todos los intentos de alcanzarlo experimentalmente, pero se han conseguido temperaturas de cero absoluto dentro de un intervalo pequeño (10^{-8} K).

Si bien existe una conexión directa, como lo veremos en el capítulo 23, entre el movimiento microscópico de las

moléculas y la temperatura macroscópica, *no cesa* todo movimiento molecular en el cero absoluto de temperatura. La conexión entre la temperatura y la energía cinética molecular se basa en conceptos clásicos, mientras que la teoría cuántica nos dice que existe un límite más bajo diferente de cero para la energía cinética molecular, aun en el cero absoluto. Esta *energía del punto cero* no puede ser deducida a partir de los cálculos clásicos.

La escala internacional de temperatura

La medición precisa de una temperatura con un termómetro de gas es una tarea difícil que requiere muchos meses de trabajo arduo en el laboratorio. En la práctica, el termómetro de gas se usa únicamente para establecer ciertos puntos fijos que puedan ser empleados más tarde para calibrar otros termómetros secundarios más convenientes.

En el uso práctico, como en la calibración de termómetros industriales o científicos, ha sido adoptada la Escala Internacional de Temperatura. Esta escala consta de un grupo de procedimientos que proporcionan en la práctica las mejores aproximaciones posibles a la escala Kelvin. La escala adoptada consta de un conjunto de puntos fijos, junto con los instrumentos que deben utilizarse para interpolar entre estos puntos fijos y extrapolarlos más allá del punto fijo más alto. Aproximadamente, cada 20 años el Comité Internacional de Pesas y Medidas ha adoptado una escala nueva; en la tabla 2 se muestran los puntos fijos de la más reciente (1990).

22-5 DILATACIÓN TÉRMICA

Sucede a menudo que podemos aflojar una tapa de metal apretada de un frasco sometiéndola a la acción de un chorro de agua caliente. Al elevarse la temperatura, la tapa de metal se dilata ligeramente con relación al frasco de vidrio. No siempre es deseable la dilatación térmica, como lo sugiere la figura 6. Todos hemos visto las juntas de dilatación situadas en las calzadas de los puentes. Las tuberías de las refinerías suelen tener un bucle de expansión, con el fin de que la tubería no se deforme al elevarse la temperatura. Los materiales usados para obturaciones dentales tienen propiedades de dilatación similares a las del esmalte de los dientes. En la fabricación de aviones se diseñan a menudo remaches y otros afianzadores de modo que deban ser enfriados en hielo seco antes de su inserción, dejando luego que se dilaten para lograr el ajuste perfecto. Los termómetros y los termostatos pueden estar basados en las diferencias de dilatación entre los componentes de una laminilla bimetalica; véase la figura 7. En un termómetro de tipo bastante común, la lami-

TABLA 2 PUNTOS FIJOS PRIMARIOS EN LA ESCALA INTERNACIONAL DE TEMPERATURAS DE 1990*

Substancia	Estado	Temperatura (K)
Helio	Punto de ebullición	3-5 [‡]
Hidrógeno	Punto triple	13.8033
Hidrógeno	Punto de ebullición [†]	17.025-17.045 ^c
Hidrógeno	Punto de ebullición	20.26-20.28 ^c
Neón	Punto triple	24.5561
Oxígeno	Punto triple	54.3584
Argón	Punto triple	83.8058
Mercurio	Punto triple	234.3156
Agua	Punto triple	273.16
Galio	Punto de fusión	302.9146
Indio	Punto de congelación	429.7485
Estaño	Punto de congelación	505.078
Cinc	Punto de congelación	692.677
Aluminio	Punto de congelación	933.473
Plata	Punto de congelación	1234.93
Oro	Punto de congelación	1337.33
Cobre	Punto de congelación	1357.77

* Véase "The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)," por H. Preston-Thomas, *Metrologia*, 27 (1990), pág. 3.

† Este punto de ebullición es a una presión de $\frac{1}{3}$ de atmósfera. Todos los demás puntos de ebullición, de fusión, o de congelación, son a una presión de 1 atm.

‡ La temperatura del punto de ebullición varía un poco con la presión del gas encima del líquido. La escala de temperaturas da la relación entre T y p que puede emplearse para calcular T para una p dada.

nilla bimetalica tiene forma helicoidal, de modo que se enrolla y desenrolla con los cambios de temperatura; véase la figura 8. Los conocidísimos termómetros de líquido dentro de vidrio se basan en el hecho de que líquidos tales como el mercurio o el alcohol se dilatan en un grado diferente (mayor) de lo que lo hacen sus recipientes de vidrio.

Podemos entender esta dilatación considerando un modelo sencillo de la estructura de un sólido cristalino. Los átomos se mantienen juntos entre sí en un arreglo regular por medio de fuerzas eléctricas, que son como las que serían ejercidas por un conjunto de resortes que uniesen a los átomos. Podemos entonces formarnos una imagen del cuerpo sólido como si fuera un colchón de resortes microscópicos (Fig. 9). Estos "resortes" son bastante rígidos y no son ideales en absoluto (véase el problema 3 del capítulo 15), existiendo alrededor de 10^{23} de ellos por centímetro cúbico. Los átomos de los sólidos están vibrando a cualquier temperatura. La amplitud de la vibración es de alrededor de 10^{-9} cm, más o menos un décimo de un diámetro atómico, y la frecuencia es de alrededor de 10^{13} Hz.

Cuando aumenta la temperatura, los átomos vibran con una amplitud mayor, y la distancia promedio entre los átomos aumenta. (Véase el estudio de la base microscópica de la dilatación térmica al final de esta sección.) Esto

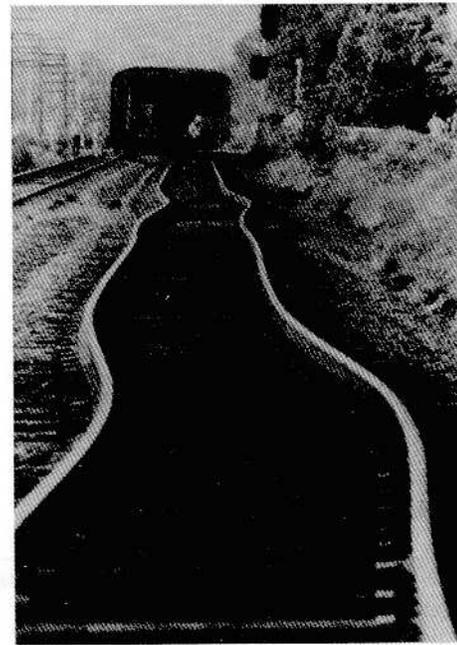


Figura 6 Deformación de las vías de ferrocarril debido a la dilatación térmica en un día muy caluroso. Las juntas de expansión entre los rieles de la vía pueden evitar esta deformación.

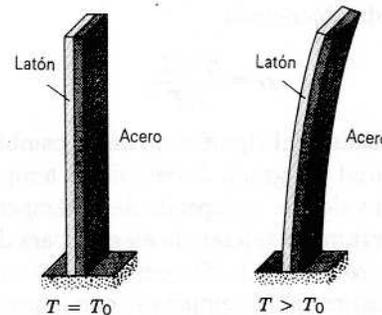


Figura 7 Laminilla bimetalica, que consta de una laminilla de latón y una laminilla de acero soldadas entre sí, a temperatura T_0 . A temperaturas más altas de T_0 , la laminilla se dobla como se muestra; a temperaturas más bajas se dobla en sentido opuesto. Muchos termostatos funcionan según este principio, usando el movimiento del extremo de la laminilla para formar o romper un contacto eléctrico.

conduce a una dilatación de todo el cuerpo sólido. El cambio en *cualquier* dimensión lineal del sólido, tal como su longitud, su ancho, o su espesor, se llama *dilatación lineal*. Si la longitud de esta dimensión lineal es L , el cambio de temperatura ΔT causa un cambio de longitud ΔL . Por medio de la experimentación hallamos que, si ΔT es lo suficientemente pequeña, este cambio de longitud ΔL es proporcional al cambio de temperatura ΔT y a la longitud original L . Por lo tanto, podemos escribir

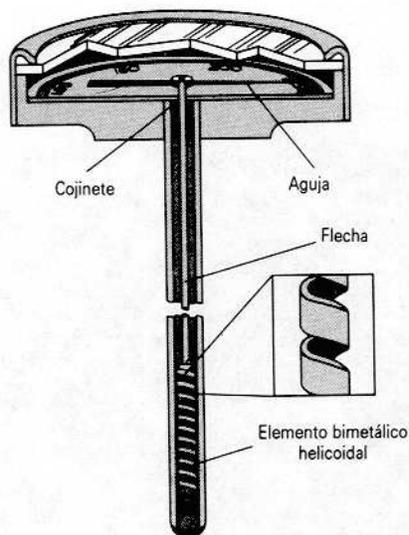


Figura 8 termómetro basado en una laminilla bimetalica. La laminilla tiene forma helicoidal, que se enrolla y desenrolla al cambiar la temperatura.

$$\Delta L = \alpha L \Delta T, \quad (12)$$

donde α , llamada el *coeficiente de dilatación lineal*, tiene valores diferentes para materiales diferentes. Reescribiendo esta fórmula obtenemos

$$\alpha = \frac{\Delta L/L}{\Delta T}, \quad (13)$$

de modo que α tiene el significado de un cambio fraccionario en longitud por grado de cambio de temperatura.

En rigor, el valor de α depende de la temperatura real y de la temperatura de referencia elegida para determinar a L (véase el problema 23). Sin embargo, su variación es usualmente despreciable comparada con la precisión con la que necesitan ser llevadas a cabo las mediciones. A menudo es suficiente elegir un valor promedio que pueda ser tratado como una constante dentro de cierta gama de temperaturas. En la tabla 3 se listan los valores experimentales del coeficiente de dilatación lineal promedio de varios sólidos comunes. Para todas las sustancias listadas, el cambio de tamaño consiste en una dilatación al elevarse la temperatura, ya que α es positivo. El orden de magnitud de la dilatación es de alrededor de 1 milímetro por metro de longitud por 100 grados Celsius. (Obsérvese el uso de $^{\circ}\text{C}$, y no de $^{\circ}\text{F}$, para expresar aquí los cambios de temperatura.)

Problema muestra 2 Una escala métrica de acero va a ser marcada de modo que los intervalos de un milímetro sean precisos dentro de unos 5×10^{-5} mm a cierta temperatura. ¿Cuál es la variación máxima de la temperatura permisible durante el marcado?

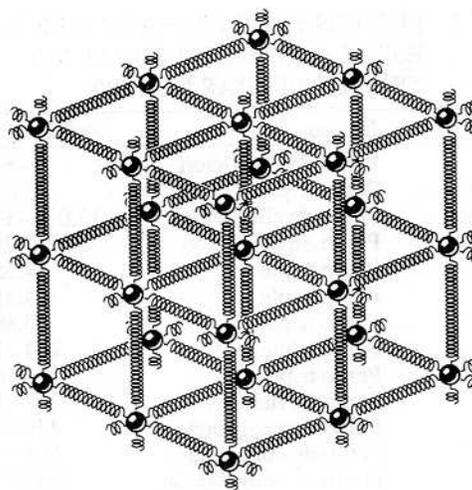


Figura 9 Un sólido se comporta en muchos sentidos como si fuese una colección de átomos unidos por fuerzas elásticas (representadas aquí por resortes).

Solución Partiendo de la ecuación 12, tenemos

$$\Delta T = \frac{\Delta L}{\alpha L} = \frac{5 \times 10^{-5} \text{ mm}}{(11 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})(1.0 \text{ mm})} = 4.5 ^{\circ}\text{C},$$

donde hemos usado el valor de α para el acero según la tabla 3. La temperatura durante el marcado debe mantenerse constante dentro de unos 5°C , y la escala debe ser usada dentro del mismo intervalo de la temperatura a la cual fue hecha.

Obsérvese que si se hubiera usado la aleación invar en lugar de acero, podríamos obtener la misma precisión dentro de un intervalo de temperatura de unos 75°C ; o, lo que es equivalente, si pudiéramos mantener la misma variación de la temperatura (5°C), podríamos obtener una precisión de unos 3×10^{-6} mm debido a los cambios de temperatura.

En muchos sólidos, llamados *isotrópicos*, el porcentaje del cambio en longitud para un cambio de temperatura dado es el mismo para todas las líneas del sólido.

TABLA 3 ALGUNOS COEFICIENTES DE DILATACIÓN LINEAL PROMEDIO*

Sustancia	$\alpha(10^{-6}$ por $^{\circ}\text{C}$)
Hielo	51
Plomo	29
Aluminio	23
Latón	19
Cobre	17
Acero	11
Vidrio (ordinario)	9
Vidrio (Pyrex)	3.2
Aleación invar	0.7
Cuarzo (fundido)	0.5

* Se consignan valores promedios típicos en el intervalo de temperatura de 0°C a 100°C , salvo para el hielo cuyo intervalo es de -10°C a 0°C .

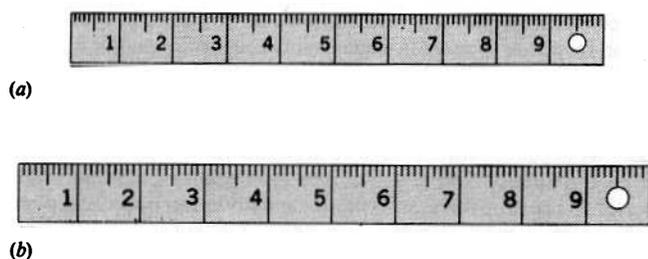


Figura 10 Una regla de acero a dos temperaturas diferentes. La dilatación aumenta en proporción en todas las dimensiones: la regla, los números, el orificio, y el espesor crecen todos en el mismo factor. (La dilatación mostrada está muy exagerada; para obtener tal expansión se requeriría un aumento de temperatura de unos ¡20,000 C°!)

La expansión es bastante análoga a una amplificación fotográfica, excepto que un sólido es tridimensional. Entonces, si tenemos una lámina plana con un orificio troquelado en ella, $\Delta L/L (= \alpha \Delta T)$ para una ΔT dada es la misma para la longitud, el espesor, la diagonal de una cara, la diagonal del cuerpo, y el diámetro del orificio. Cada línea, ya sea recta o curva, se alarga en la razón α por grado de elevación de la temperatura. Si usted graba su nombre sobre la lámina, la línea que representa a su nombre tiene el mismo cambio fraccionario de longitud que cualquier otra línea. En la figura 10 se muestra la analogía con una amplificación fotográfica.

Teniendo en cuenta estas ideas, debería serle a usted posible demostrar (véanse los problemas 30 y 31) que, con un alto grado de precisión, el cambio fraccionario en el área A por cambio de temperatura en grados de un sólido isotrópico es 2α , es decir,

$$\Delta A = 2\alpha A \Delta T, \quad (14)$$

y el cambio fraccionario en el volumen V por cambio de temperatura en grados de un sólido isotrópico es 3α , es decir,

$$\Delta V = 3\alpha V \Delta T. \quad (15)$$

Puesto que la forma de un fluido no es precisa, únicamente el cambio de volumen con la temperatura es significativo. Los gases responden fuertemente a los cambios de temperatura o de presión, mientras que el cambio de volumen de los líquidos con los cambios de temperatura o de presión es mucho más pequeño. Si hacemos que β represente al coeficiente de dilatación volumétrica de un líquido, de modo que

$$\beta = \frac{\Delta V/V}{\Delta T}, \quad (16)$$

hallamos que β es relativamente independiente de la temperatura. Los líquidos se dilatan típicamente con un aumento de la temperatura, siendo su dilatación volumétrica

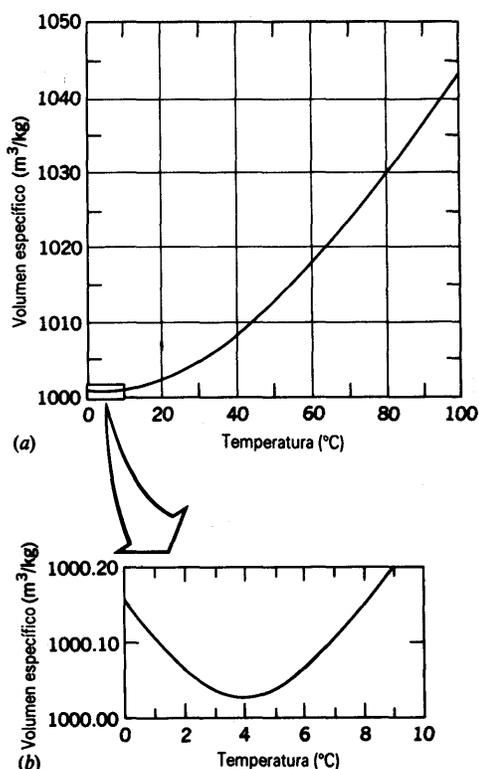


Figura 11 (a) Volumen específico (volumen ocupado por una masa en particular) del agua en función de su temperatura. El volumen específico es el inverso de la densidad (masa por unidad de volumen). (b) Ampliación de la región cercana a 4°C, mostrando un mínimo en el volumen específico (o una densidad máxima).

generalmente alrededor de 10 veces más grande que la de los sólidos.

Sin embargo, el líquido más común, el agua, no se comporta como muchos otros líquidos. En la figura 11 mostramos la curva de dilatación volumétrica del agua. Obsérvese que a más de 4°C el agua se dilata al aumentar la temperatura, aunque no linealmente. (Esto es, β no es constante durante estos intervalos grandes de temperatura.) Empero, al bajar la temperatura de 4°C a 0°C, el agua se dilata en lugar de contraerse, lo cual es la razón de que los lagos se congelen primero en su superficie. Tal dilatación con el descenso de la temperatura no se observa en ningún otro líquido común; se observa en sustancias parecidas al hule y en ciertos sólidos cristalinos dentro de intervalos de temperatura limitados. La densidad del agua tiene un máximo en 3.98°C, donde su valor es de 999.973 kg/m³. (En un principio se suponía que el kilogramo patrón y el metro patrón correspondían a una densidad máxima del agua de 1000 kg/m³, o sea 1 g/cm³. Sin embargo, mediciones más precisas demuestran que los patrones internacionales no corresponden exactamente a este valor.)

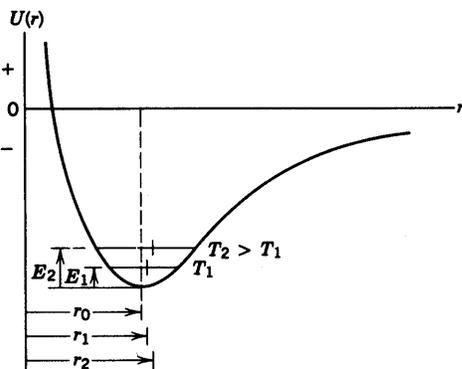


Figura 12 Curva de la energía potencial de dos átomos adyacentes de un sólido en función de su distancia de separación internuclear. La separación en equilibrio es r_0 . Puesto que la curva es asimétrica, la separación promedio, (r_1, r_2) aumenta al aumentar la temperatura (T_1, T_2) y la energía vibratoria (E_1, E_2).

Base microscópica de la dilatación térmica (Opcional)

A nivel microscópico, la dilatación térmica de un sólido sugiere un aumento en la separación promedio entre los átomos del sólido. La curva de la energía potencial de dos átomos adyacentes en un sólido cristalino en función de su separación internuclear es una curva asimétrica como la de la figura 12. Cuando los átomos se acercan entre sí, disminuyendo su separación a partir del valor de equilibrio r_0 , entran en juego fuerzas de repulsión fuertes, y la energía potencial se eleva rápidamente ($F = -dU/dr$); cuando los átomos se alejan entre sí, aumentando su separación a partir del valor de equilibrio, intervienen fuerzas de atracción un poco más débiles y la energía potencial se eleva más lentamente. Para una energía vibratoria dada la separación

de los átomos cambia periódicamente de un valor mínimo a un valor máximo, siendo la separación promedio mayor que la separación de equilibrio a causa de la naturaleza asimétrica de la curva de la energía potencial. Para una energía vibratoria aún más alta la separación promedio es aun mayor. El efecto se acentúa porque, como lo sugiere la figura 12, la energía cinética es más pequeña para separaciones más grandes; entonces las partículas se mueven más lentamente e invierten más tiempo en separaciones más grandes, contribuyendo entonces con una parte mayor al tiempo promedio. Puesto que la energía vibratoria aumenta al elevarse la temperatura, la separación promedio entre los átomos aumenta con la temperatura, y todo el sólido se dilata.

Obsérvese que si la curva de la energía potencial fuese simétrica con respecto a la separación de equilibrio, entonces la separación promedio sería igual a la separación de equilibrio, sin importar cuán grande fuese la amplitud de la vibración. De aquí que la dilatación térmica sea una consecuencia directa de la desviación de la simetría de la curva característica de la energía potencial de los sólidos.

Algunos sólidos cristalinos, en ciertas regiones de temperatura, pueden contraerse al elevarse la temperatura. El análisis anterior es válido si suponemos que existen únicamente modos de vibración compresivos (longitudinales) o que predominan estos modos. Sin embargo, los sólidos pueden vibrar igualmente en modos similares al modo de corte (transversales), y estos modos de vibración permiten que el sólido se contraiga al elevarse la temperatura, disminuyendo la separación promedio de los planos de los átomos. En ciertos tipos de estructura cristalina y en ciertas regiones de temperatura, estos modos de vibración transversales pueden predominar sobre los longitudinales, produciendo un coeficiente neto de dilatación térmica negativo.

Debe hacerse hincapié en que los modelos microscópicos que se presentan aquí, constituyen una gran simplificación de un fenómeno complejo que puede ser tratado con mayor detalle mediante la mecánica estadística y la teoría cuántica. ■

PREGUNTAS

1. ¿Es la temperatura un concepto microscópico o macroscópico?
2. ¿Podemos definir la temperatura como una cantidad derivada, en términos de longitud, masa, y tiempo? Piense en un péndulo, por ejemplo.
3. El cero absoluto es una temperatura mínima. ¿Existe una temperatura máxima?
4. ¿Puede un objeto estar más caliente que otro si ambos están a la misma temperatura? Explique.
5. ¿Existen cantidades físicas, distintas a la temperatura, que tiendan a igualarse cuando se juntan dos sistemas diferentes?
6. Un trozo de hielo y un termómetro más caliente están suspendidos en un recipiente al vacío y aislado, de modo que no entran en contacto. ¿Por qué disminuye la lectura del termómetro durante cierto tiempo?
7. ¿Qué cualidades hacen a una propiedad termométrica en particular apta para usarse en un termómetro práctico?
8. ¿Qué dificultades surgirían si se definiese la temperatura en términos de la densidad del agua?

9. Sea p , la presión en el bulbo de un termómetro de gas a volumen constante cuando el bulbo está a la temperatura del punto triple de 273.16 K y p la presión cuando el bulbo está a la temperatura ambiente. Se tienen tres termómetros de gas a volumen constante: para A el gas es oxígeno y $p_3 = 20$ cm Hg; para B el gas es también oxígeno pero $p_3 = 40$ cm Hg; para C el gas es hidrógeno y $p_3 = 30$ cm Hg. Los valores de p medidos en los tres termómetros son p_A, p_B , y p_C . (a) Puede obtenerse un valor aproximado de la temperatura ambiente T con cada uno de los termómetros usando

$$T_A = (273.16 \text{ K})(p_A/20 \text{ cm Hg}),$$

$$T_B = (273.16 \text{ K})(p_B/40 \text{ cm Hg}),$$

$$T_C = (273.16 \text{ K})(p_C/30 \text{ cm Hg}).$$

Marque si es cierta o falsa para cada una de las aseveraciones siguientes: (1) Con el método descrito, los tres termómetros darán el mismo valor de T . (2) Los dos termómetros de oxígeno concordarán entre sí pero no con el termómetro de hidrógeno. (3) Cada uno de los tres termó-

- metros dará un valor de T diferente. (b) En caso de que exista un desacuerdo entre los tres termómetros, explique cómo cambiaría usted el método de usarlos para hacer que los tres den el mismo valor de T .
10. El editor en jefe de una revista de negocios bien conocida, al discutir los posibles efectos de calentamiento asociados con el aumento en la concentración de bióxido de carbono en la atmósfera terrestre (efecto de invernadero), escribió: "Las regiones polares podrían llegar a ser tres veces más cálidas que ahora, ..." ¿Qué se supone usted que quería decir, y qué dijo literalmente? (Véase "Warmth and Temperature: A Comedy of Errors", por Albert A. Bartlett, *The Physics Teacher*, noviembre de 1984, pág. 517).
 11. Aunque parece que el cero absoluto de temperatura es imposible de obtener experimentalmente, en el laboratorio se han logrado temperaturas tan bajas como 0.0000002 K. ¿Por qué se esfuerzan los físicos, como realmente lo hacen, para obtener temperaturas aún más bajas? ¿No es ésta lo suficientemente baja para todos los propósitos prácticos?
 12. Usted pone dos ollas de agua sin tapar, una conteniendo agua caliente y la otra conteniendo agua fría, a la intemperie en un clima por debajo del punto de congelación. La olla con el agua caliente comenzará por lo general a congelarse primero. ¿Por qué? ¿Qué sucedería si usted tapase las ollas?
 13. ¿Puede asignarse una temperatura a un vacío?
 14. ¿Tiene implícito nuestro "sentido de la temperatura" un sentido de dirección; es decir, más caliente significa necesariamente una temperatura mayor, o es esto simplemente una convención arbitraria? Por cierto que, Celsius eligió originalmente al punto de vaporización como 0°C y al punto de congelación como 100°C.
 15. En Estados Unidos muchas etiquetas de productos médicos informan al usuario que debe almacenarlos a menos de 86°F. ¿Por qué 86? (*Sugerencia: Haga el cambio a Celsius*) (Véase *The Science Almanac*, 1985-1986, pág. 430.)
 16. ¿Cómo sugeriría usted medir la temperatura de (a) el Sol, (b) la atmósfera superior de la Tierra, (c) un insecto, (d) la Luna, (e) el fondo del océano, y (f) el helio líquido?
 17. Considerando las escalas Celsius, Fahrenheit, y Kelvin, ¿corresponde alguna a la "escala de la naturaleza"? Explique.
 18. ¿Es un gas mejor que otro para construir un termómetro estándar de gas a volumen constante? ¿Qué propiedades son deseables en un gas para tales objetivos?
 19. Dé algunas objeciones al uso de un termómetro de agua dentro de vidrio. ¿Es una mejora el mercurio en vidrio? De ser así, explique por qué.
 20. Explique por qué la columna de mercurio desciende primero y luego se eleva al calentar con una llama el termómetro de este metal.
 21. ¿Cuáles son las dimensiones de α , el coeficiente de dilatación lineal? ¿Depende el valor de α de la unidad de longitud empleada? Cuando se emplean grados Fahrenheit en lugar de grados Celsius como la unidad de cambio de la temperatura, ¿cambia el valor numérico de α ? De ser así, ¿cómo? Si no es así, pruébelo.
 22. Una bola de metal puede pasar a través de un anillo de metal. Sin embargo, al calentar la bola ésta se pega en el anillo. ¿Qué pasaría si calentásemos el anillo en lugar de la bola?
 23. Como un elemento de control en el termostato común se emplea una laminilla bimetalica, que consta de dos laminillas de diferente metal remachadas entre sí. Explique cómo trabaja.
 24. Dos laminillas, una de hierro y otra de cinc, se remachan entre sí lado con lado para formar una barra recta que se curva al ser calentada. ¿Por qué está el hierro en el interior de la curva?
 25. Explique cómo puede mantenerse constante con la temperatura el periodo de un reloj de péndulo adosando tubos verticales de mercurio a la base del péndulo.
 26. ¿Por qué se hace que una chimenea esté aislada, es decir, que no sea parte del soporte estructural de la casa?
 27. El agua se dilata al congelarse. ¿Podemos definir un coeficiente de dilatación volumétrica para el proceso de congelación?
 28. Explique por qué la dilatación aparente de un líquido en un bulbo de vidrio no da la dilatación verdadera del líquido.
 29. ¿Depende el cambio de volumen de un objeto al aumentar su temperatura de si el objeto tiene cavidades en su interior, quedando en éste todas las demás características igual?
 30. ¿Por qué es mucho más difícil hacer una determinación precisa del coeficiente de dilatación de un líquido que de un sólido?
 31. El modelo común de un sólido supone que los átomos son puntos que ejecutan un movimiento armónico simple en torno a posiciones medias de la red. ¿Cuál sería el coeficiente de dilatación lineal de esta red?
 32. Explique el hecho de que la temperatura del océano a grandes profundidades sea casi constante durante todo el año, a una temperatura de unos 4°C.
 33. Explique por qué los lagos se congelan primero en la superficie.
 34. ¿Qué causa que las tuberías de agua exploten en el invierno?
 35. ¿Qué puede usted concluir respecto a cómo depende el punto de fusión del hielo de la presión partiendo del hecho de que el hielo flota en el agua?

PROBLEMAS

Sección 22-3 Medición de la temperatura

1. Un *termómetro de resistencia* es un termómetro en el que la resistencia eléctrica cambia con la temperatura. Esta-

mos en libertad de definir temperaturas medidas por uno de estos termómetros en kelvin (K) que sean directamente

proporcionales a la resistencia R , medida en ohms (Ω). Se halla que cierto termómetro de resistencia tiene una resistencia R de 90.35Ω cuando su bulbo se sumerge en agua a la temperatura del punto triple (273.16 K). ¿Qué temperatura indica el termómetro si el bulbo está situado en un entorno tal que su resistencia es de 96.28Ω ?

- Se forma un termopar a partir de dos metales diferentes unidos en dos puntos de modo tal que se produzca un pequeño voltaje cuando las dos uniones están a temperaturas diferentes. En un termopar de hierro-constantano, con una unión mantenida a 0°C , el voltaje de salida varía linealmente desde 0 hasta 28.0 mV al elevar la temperatura de la otra unión desde 0 hasta 510°C . Halle la temperatura de la unión variable cuando la salida del termopar sea de 10.2 mV .
- La amplificación o *ganancia* de un amplificador de transistores puede depender de la temperatura. La ganancia para cierto amplificador a la temperatura ambiente (20.0°C) es de 30.0 , mientras que a 55.0°C es de 35.2 . ¿Cuál sería la ganancia a 28.0°C si la ganancia depende linealmente de la temperatura dentro de este limitado intervalo?
- El cero absoluto es -273.15°C . Halle el cero absoluto en la escala Fahrenheit.
- Si su médico le dice que su temperatura es de 310 kelvin sobre el cero absoluto, ¿se preocuparía? Explique su respuesta.
- (a) La temperatura de la superficie del Sol es de unos 6000 K . Expresé ésta en la escala Fahrenheit. (b) Expresé la temperatura normal del cuerpo humano, 98.6°F , en la escala Celsius. (c) En la región continental de Estados Unidos, la temperatura más baja registrada oficialmente es de -70°F en Rogers Pass, Montana. Expresé ésta en la escala Celsius. (d) Expresé el punto de ebullición normal del oxígeno, -183°C , en la escala Fahrenheit. (e) ¿Qué temperatura Celsius cree usted que tiene una habitación si el calor en ella resulta insoportable?
- ¿A qué temperatura darían los siguientes pares de escalas la misma lectura: (a) Fahrenheit y Celsius, (b) Fahrenheit y Kelvin, y (c) Celsius y Kelvin?
- ¿A qué temperatura es la lectura en la escala Fahrenheit igual (a) al doble de la Celsius y (b) a la mitad de la Celsius?
- A diario podemos comprobar que los objetos calientes y fríos se enfrían o se calientan respecto a la temperatura de su entorno. Si la diferencia de temperatura ΔT entre un objeto y su entorno ($\Delta T = T_{\text{obj}} - T_{\text{ent}}$) no es demasiado grande, la razón de enfriamiento o de calentamiento del objeto es proporcional, aproximadamente, a esta diferencia de temperatura; es decir,

$$\frac{d\Delta T}{dt} = -A(\Delta T),$$

donde A es una constante. El signo menos se debe a que ΔT disminuye con el tiempo si ΔT es positiva, y aumenta si ΔT es negativa. Esto se conoce como la *ley de Newton para el enfriamiento*. (a) ¿De qué factores depende A ? ¿Cuáles son sus dimensiones? (b) Si en algún instante $t = 0$

la diferencia de temperatura es ΔT_0 , demuestre que esa diferencia es

$$\Delta T = \Delta T_0 e^{-At}$$

en un tiempo t más tarde.

- Por la mañana temprano se descompone el calentador de una casa. La temperatura exterior es de -7.0°C . Como resultado, la temperatura en el interior desciende de 22 a 18°C en 45 min . ¿Cuánto tiempo más tomará para que la temperatura interior descienda otros 4.0°C ? Suponga que la temperatura exterior no cambia y que se aplica la ley de enfriamiento de Newton; vea el problema anterior.

Sección 22-4 La escala de temperatura de un gas ideal

- Si la temperatura del gas en el punto de vapor es de 373.15 K , ¿cuál será el valor limitante de la relación de las presiones de un gas en el punto de vaporización y del agua en el punto triple cuando el gas se mantiene a volumen constante?
- Un termómetro de gas se construye de dos bulbos que contienen gas, cada uno de los cuales se pone en un baño de agua, como se muestra en la figura 13. La diferencia de presión entre los dos bulbos se mide por medio de un manómetro de mercurio ilustrado en la figura. Depósitos apropiados, no mostrados en el diagrama, mantienen constante el volumen de gas en ambos bulbos. No hay diferencia en la presión cuando ambos baños se encuentran en el punto triple del agua. La diferencia de presión es de 120 mm Hg cuando un baño está en el punto triple y el otro en el punto de ebullición del agua. Por último, la diferencia de presión es de 90.0 mm Hg cuando un baño se encuentra en el punto triple y el otro tiene una temperatura desconocida. Halle la temperatura desconocida.

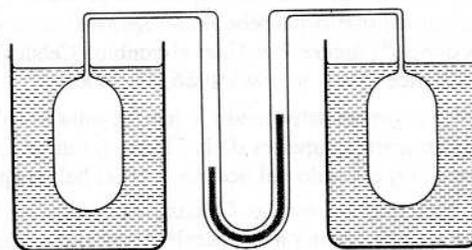


Figura 13 Problema 12.

- Se ensamblan dos termómetros de gas a volumen constante; uno utiliza nitrógeno como gas de trabajo y el otro utiliza helio. Ambos contienen el gas suficiente para que $p_v = 100 \text{ cm Hg}$. ¿Cuál es la diferencia entre las presiones de los dos termómetros si ambos están sumergidos en un baño de agua al punto de ebullición? ¿Cuál de las dos presiones es más alta? Véase la figura 5.

Sección 22-5 Dilatación térmica

- El asta de aluminio de una bandera tiene 33 m de altura. ¿En cuánto aumenta su longitud cuando la temperatura aumenta en 15 C° ?

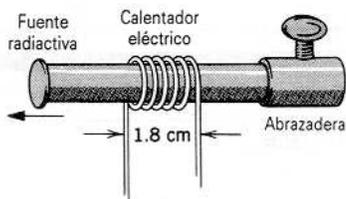


Figura 14 Problema 22.

15. El espejo de vidrio Pyrex del telescopio del observatorio de Monte Palomar (el telescopio Hale) tiene un diámetro de 200 in. Las temperaturas más extremas registradas en el Monte Palomar son de -10°C y 50°C . Determine el cambio máximo del diámetro del espejo.
16. Un orificio circular practicado en una placa de aluminio tiene 2.725 cm de diámetro a 12°C . ¿Cuál es el diámetro cuando la temperatura de la placa se eleva a 140°C ?
17. Se colocan unas vías de acero para el ferrocarril cuando la temperatura es de -5.0°C . Una sección estándar de riel tiene entonces 12.0 m de longitud. ¿Qué claro deberá dejarse entre secciones de riel de modo que no exista una compresión cuando la temperatura suba hasta los 42°C ?
18. Una ventana de vidrio tiene 200 cm por 300 cm a 10°C . ¿En cuánto ha aumentado su área cuando su temperatura es de 40°C ? Suponga que el vidrio puede dilatarse libremente.
19. Un cubo de latón tiene una longitud de 33.2 cm de lado a 20.0°C . Halle (a) el aumento en el área superficial y (b) el aumento en el volumen cuando se calienta a 75.0°C .
20. ¿Cuál es el volumen de una bola de plomo a -12°C si su volumen a 160°C es de 530 cm^3 ?
21. Demuestre que cuando la temperatura de un líquido en un barómetro cambia en ΔT , y la presión es constante, la altura h cambia en $\Delta h = \beta h \Delta T$, donde β es el coeficiente de dilatación volumétrica del líquido. Desprecie la dilatación del tubo de vidrio.
22. En cierto experimento fue necesario estar en posibilidad de mover una fuente radiactiva pequeña a velocidades selectas extremadamente bajas. Esto se realizó asegurando la fuente a un extremo de una barra de aluminio y calentando la sección central de la barra de una manera controlada. Si la sección calentada efectiva de la barra de la figura 14 es de 1.8 cm, ¿a qué razón constante debe hacerse cambiar la temperatura de la barra si la fuente ha de moverse a una velocidad constante de 96 nm/s?
23. Demuestre que si α depende de la temperatura T , entonces

$$L \cong L_0 \left[1 + \int_{T_0}^T \alpha(T) dT \right],$$

donde L_0 es la longitud a la temperatura de referencia T_0 .

24. Poco después de que se formara la Tierra, el calor liberado por la desintegración de elementos radiactivos elevó la temperatura interna promedio de 300 a 3000 K, a cuyo valor permanece hoy día aproximadamente. Suponiendo un coeficiente de dilatación volumétrica promedio de $3.2 \times 10^{-3}\text{ K}^{-1}$, ¿en cuánto ha aumentado el radio de la Tierra desde su formación?

25. Se mide una barra en 20.05 cm de longitud usando una regla de acero a la temperatura ambiente de 20°C . Tanto la barra como la regla se introducen en un horno a 270°C , en donde la barra mide ahora 20.11 cm usando la misma regla. Calcule el coeficiente de dilatación térmica del material del cual está hecha la barra.
26. Considérese un termómetro de mercurio en vidrio. Supóngase que la sección transversal A del capilar es constante, y que V es el volumen del bulbo de mercurio a 0.00°C . Suponga que el mercurio llena apenas el bulbo a 0.00°C . Demuestre que la longitud L de la columna del mercurio en el capilar a una temperatura T , en $^{\circ}\text{C}$, es

$$L = \frac{V}{A} (\beta - 3\alpha) T,$$

es decir, proporcional a la temperatura, siendo β el coeficiente de dilatación volumétrica del mercurio y α el coeficiente de dilatación lineal del vidrio.

27. (a) Demuestre que si las longitudes de dos barras de sólidos diferentes son inversamente proporcionales a sus respectivos coeficientes de dilatación lineal a la misma temperatura inicial, la diferencia de longitud entre ellas será constante a todas las temperaturas. (b) ¿Cuál sería la longitud de una barra de acero y de una barra de latón a 0°C , de modo que a todas las temperaturas su diferencia de longitud sea 0.30 m?
28. Como resultado de un aumento de temperatura de 32°C , una barra con una grieta en su centro se patea hacia arriba, como se muestra en la figura 15. Si la distancia fija $L_0 = 3.77\text{ m}$ y el coeficiente de dilatación lineal es de $25 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, halle x , la distancia a la cual se eleva el centro.

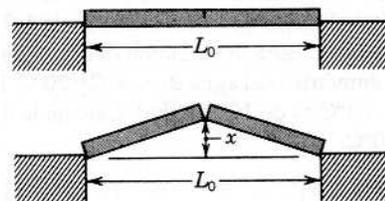


Figura 15 Problema 28.

29. Una barra de acero tiene 3.000 cm de diámetro a 25°C . Un anillo de latón tiene un diámetro interior de 2.992 cm a 25°C . ¿A qué temperatura común se deslizará justamente el anillo en la barra?
30. El área A de una placa rectangular es ab . Su coeficiente de dilatación lineal es α . Después de un aumento de temperatura ΔT , el lado a es más largo en Δa y el lado b es más largo en Δb . Demuestre que si despreciamos la pequeña cantidad $\Delta a \Delta b / ab$ (véase la Fig. 16), entonces $\Delta A = 2\alpha A \Delta T$, lo que coincide con la ecuación 14.
31. Demuestre que, si despreciamos cantidades extremadamente pequeñas, el cambio de volumen de un sólido en dilatación a través de un aumento de temperatura ΔT está dado por $\Delta V = 3\alpha V \Delta T$, donde α es el coeficiente de dilatación lineal. Véase la ecuación 15.

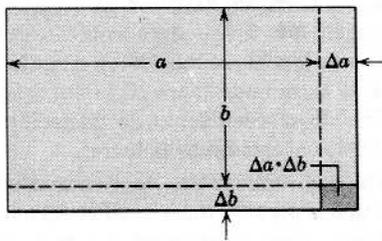


Figura 16 Problema 30.

32. Cuando la temperatura de una moneda de cobre (que no es cobre puro) de un centavo se eleva en 100°C, su diámetro aumenta en 0.18%. Halle el porcentaje de aumento en (a) el área de una cara, (b) el espesor, (c) el volumen, y (d) la masa del centavo. (e) Calcule su coeficiente de dilatación lineal.
33. La densidad es la masa dividida por el volumen. Si el volumen V depende de la temperatura, entonces también su densidad ρ . Demuestre que el cambio de densidad $\Delta\rho$ con el cambio de temperatura ΔT está dado por

$$\Delta\rho = -\beta\rho \Delta T,$$

donde β es el coeficiente de dilatación volumétrica. Explique el signo menos.

34. Cuando la temperatura de un cilindro de metal se eleva de 60 a 100°C, su longitud aumenta en 0.092%. (a) Halle el cambio porcentual en la densidad. (b) Identifique el metal.
35. A 100°C un frasco de vidrio está completamente lleno de 891 g de mercurio. ¿Qué masa de mercurio se necesita para llenar el frasco a -35°C? (El coeficiente de dilatación lineal del vidrio es de $9.0 \times 10^{-6}/\text{C}^\circ$; el coeficiente de dilatación volumétrica del mercurio es de $1.8 \times 10^{-4}/\text{C}^\circ$).
36. La figura 17 muestra la variación del coeficiente de dilatación volumétrica del agua entre 4°C y 20°C. La densidad del agua a 4°C es de 1000 kg/m³. Calcule la densidad del agua a 20°C.

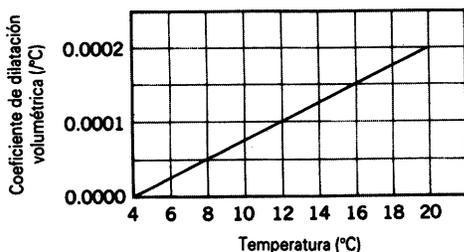


Figura 17 Problema 36.

37. Una barra compuesta de longitud $L = L_1 + L_2$ está hecha de una barra de material 1 y longitud L_1 unida a una barra de material 2 y longitud L_2 , como se muestra en la figura 18. (a) Demuestre que el coeficiente efectivo de dilatación lineal α de esta barra está dado por $\alpha = (\alpha_1 L_1 + \alpha_2 L_2)/L$. (b) Si se utilizara acero y latón, diseñe dicha barra compuesta cuya longitud sea de 52.4 cm y cuyo coeficiente efectivo de dilatación lineal sea de $13 \times 10^{-6}/\text{C}^\circ$.

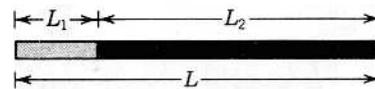


Figura 18 Problema 37.

38. (a) Demuestre que el cambio en inercia rotatoria I con la temperatura de un objeto sólido está dado por $\Delta I = 2\alpha I \Delta T$. (b) Una barra uniforme de latón, que gira libremente a 230 rev/s en torno a un eje perpendicular a ella en su centro, se calienta sin contacto mecánico hasta que su temperatura aumenta en 170°C. Calcule el cambio en la velocidad angular.
39. Un cilindro situado en chumaceras sin fricción se hace girar en torno a su eje y luego se calienta, sin contacto mecánico, hasta que su radio aumenta en 0.18%. ¿Cuál es el cambio porcentual en (a) el ímpetu angular, (b) la velocidad angular, y (c) la energía rotatoria del cilindro?
40. (a) Demuestre que el cambio con la temperatura en el periodo P de un péndulo físico está dado por $\Delta P = \frac{1}{2}\alpha P \Delta T$. (b) Un péndulo de reloj hecho de invar tiene un periodo de 0.500 s y es exacto a 20°C. Si el reloj se emplea en un clima en que la temperatura promedie 30°C, ¿qué corrección aproximada al tiempo indicado por el reloj es necesaria al cabo de 30 días?
41. Un reloj de péndulo con un péndulo hecho de latón está diseñado para mantener un tiempo preciso a 20°C. ¿De cuánto será el error, en segundos por hora, si el reloj opera a 0°C?
42. Un vaso de aluminio de 110 cm³ de capacidad se llena de glicerina a 22°C. ¿Cuánta glicerina, se derramará del vaso si la temperatura del vaso y de la glicerina se eleva a 28°C? (El coeficiente de dilatación volumétrica de la glicerina es de $5.1 \times 10^{-4}/\text{C}^\circ$).
43. Un tubo vertical de vidrio de 1.28 m de longitud está medio lleno de un líquido a 20.0°C. ¿Cuál será el cambio de altura del líquido cuando el tubo se caliente a 33.0°C? Suponga que $\alpha_{\text{vid}} = 1.1 \times 10^{-5}/\text{C}^\circ$ y $\beta_{\text{liq}} = 4.2 \times 10^{-5}/\text{C}^\circ$.
44. Una barra de acero a 24°C se atornilla fuertemente en ambos extremos y luego se enfría. ¿A qué temperatura empezará a ceder? Véase la tabla 1, capítulo 14.
45. Tres barras rectas de igual longitud, de aluminio, invar y acero, todas a 20°C, forman un triángulo equilátero con pivotes en los vértices. ¿A qué temperatura tendrá 59.95° el ángulo opuesto a la barra de invar? Véase el apéndice H para las fórmulas trigonométricas necesarias.
46. Dos barras de materiales diferentes, pero de las mismas longitudes L y las mismas áreas A en sus secciones transversales están dispuestas extremo con extremo entre soportes rígidos y fijos como se muestra en la figura 19a. La temperatura es T y no existe un esfuerzo inicial. Las barras se calientan, de modo que su temperatura aumenta en ΔT . (a) Demuestre que la superficie de contacto de las barras se desplaza al calentarlas en una cantidad dada por

$$\Delta L = \left(\frac{\alpha_1 E_1 - \alpha_2 E_2}{E_1 + E_2} \right) L \Delta T,$$

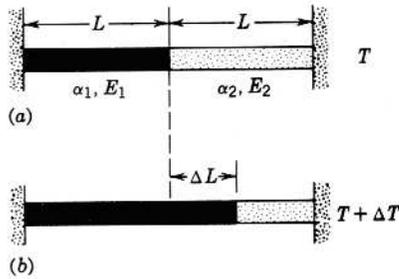


Figura 19 Problema 46.

donde α_1, α_2 son los coeficientes de dilatación lineal y E_1, E_2 son los módulos de Young de los materiales. Desprecie los cambios en las áreas de la sección transversal; véase la figura 19b. (b) Halle el esfuerzo de contacto después del calentamiento.

47. Un cubo de aluminio de 20 cm de lado flota en mercurio. ¿Qué tanto más se hundirá el bloque cuando la temperatura se eleve de 270 a 320 K? (El coeficiente de dilatación volumétrica del mercurio es de $1.8 \times 10^{-4}/C^\circ$).
48. Un tubo de vidrio casi lleno de mercurio está unido en serie a la base de un péndulo de hierro de 100 cm de longitud en forma de barra. ¿A qué altura estará el mercurio en el tubo de vidrio de modo que el centro de masa de este péndulo no se eleve ni baje con los cambios de temperatura? (El área de la sección transversal del tubo es igual a la de la barra de hierro. Desprecie la masa del vidrio. El hierro tiene una densidad de $7.87 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ y un coeficiente de dilatación lineal igual a $12 \times 10^{-6}/C^\circ$. El coeficiente de dilatación volumétrica del mercurio es de $18 \times 10^{-5}/C^\circ$).
49. La distancia entre las torres del claro principal del puente Golden Gate cerca de San Francisco es de 4200 ft

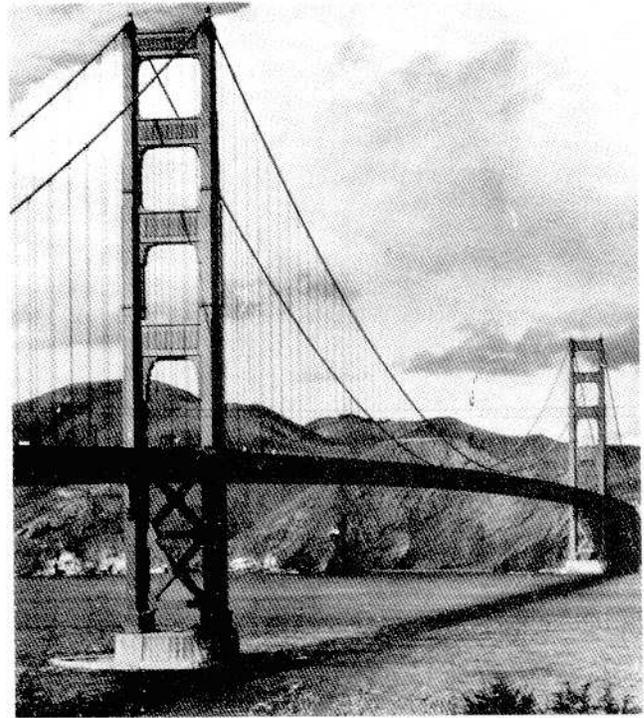


Figura 20 Problema 49.

(Fig. 20). La flecha del cable a la mitad entre las torres a 50°F es de 470 ft. Considere $\alpha = 6.5 \times 10^{-6}/F^\circ$ para el cable y calcule (a) el cambio de longitud del cable y (b) el cambio en la flecha para un cambio de temperatura desde 10 hasta 90°F . Suponga que no hay flexión ni separación de las torres y una forma parabólica para el cable.