

Capítulo 1 · Temperatura

M. W. Zemansky · R. H. Dittman — Calor y termodinámica (2.^a ed.) · edición web,
versión PDF

14 de septiembre de 2026

Contenido

1.1. CRITERIO MACROSCOPICO	1
1.2. CRITERIO MICROSCOPICO	2
1.3. COMPARACION DE LOS CRITERIOS MACROSCOPICO Y MICROSCOPICO	2
1.4. PROPOSITO DE LA TERMODINAMICA	3
1.5. EQUILIBRIO TERMICO	3
1.6. CONCEPTO DE TEMPERATURA	5
1.7. MEDIDA DE LA TEMPERATURA	7
1.8. COMPARACION DE TERMOMETROS	9
1.9. TERMOMETRO DE GAS	10
1.10. TEMPERATURA DEL GAS IDEAL	12
1.11. ESCALA DE TEMPERATURA CELSIUS	16
1.12. TERMOMETRIA DE RESISTENCIA ELECTRICA	16
1.13. TERMOPAR	17
1.14. ESCALA PRACTICA INTERNACIONAL DE TEMPERATURA (1968) (IPTS-68)	18
PROBLEMAS	20

1.1. CRITERIO MACROSCOPICO

El estudio de cualquier rama especial de la física comienza con el aislamiento de una región restringida del espacio o de una porción finita de materia de su entorno. La parte aislada (de forma imaginaria) y sobre la cual fijamos la atención se denomina sistema, y todo aquello exterior al sistema que tiene relación directa con su comportamiento se designa como entorno. Elegido un sistema, el paso siguiente es describirlo mediante magnitudes relacionadas con el comportamiento del sistema o sus interacciones con el entorno, o ambas cosas a la vez. Pueden adoptarse, en general, dos criterios: macroscópico y microscópico.

Tomemos como sistema el contenido de un cilindro de un motor de automóvil. Un análisis químico mostraría antes de la explosión una mezcla de hidrocarburos y aire y, tras la inflamación de la mezcla, los productos de la combustión se describirían en términos de ciertos compuestos químicos. La descripción de la composición

del sistema consiste en especificar las cantidades relativas de estas sustancias. En un instante cualquiera, el sistema cuya composición se ha descrito ocupa un cierto volumen, que depende de la posición del pistón. El volumen puede medirse fácilmente y en el laboratorio se registra automáticamente su valor por medio de un dispositivo acoplado al pistón. Otra magnitud indispensable en la descripción de nuestro sistema es la presión de los gases dentro del cilindro. Después de la inflamación de la mezcla la presión es grande; tras el escape de los productos de la combustión la presión es pequeña. En el laboratorio, para medir los cambios de presión y obtener registro automático mientras el motor funciona, puede usarse un manómetro. Finalmente existe otra magnitud sin la cual no tendríamos una idea adecuada del funcionamiento del motor. Esta magnitud es la temperatura, que, como veremos, en muchos casos puede medirse tan fácilmente como las otras magnitudes.

Hemos descrito el sistema contenido en un cilindro de un motor de automóvil especificando cuatro magnitudes: composición, volumen, presión y temperatura. Estas magnitudes se refieren a las macrocaracterísticas, o propiedades en gran escala, del sistema y proporcionan una descripción macroscópica del mismo. Por ello se denominan coordenadas macroscópicas. Las magnitudes que han de especificarse para proporcionar una descripción macroscópica de otros sistemas son, naturalmente, distintas; pero en general las coordenadas macroscópicas tienen las siguientes características comunes:

1. No implican hipótesis especiales concernientes a la estructura de la materia.
2. Su número es pequeño.
3. Nos las sugieren, más o menos directamente, nuestros sentidos.
4. En general pueden medirse directamente.

Resumiendo, la descripción macroscópica de un sistema implica la especificación de algunas propiedades fundamentales medibles del mismo.

1.2. CRITERIO MICROSCOPICO

Desde el punto de vista de la mecánica estadística, se considera que un sistema consiste en un gran número N de moléculas, cada una de las cuales puede existir en un conjunto de estados cuyas energías son $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots$. Se supone que las moléculas interaccionan mutuamente por medio de choques o de campos de fuerza. Podemos imaginar el sistema de moléculas aislado, o en ciertos casos, englobado en un grupo de sistemas similares o conjunto de sistemas. Se aplican conceptos probabilísticos, y se admite que el estado de equilibrio del sistema es el estado de mayor probabilidad. El problema fundamental consiste en hallar el número de moléculas que se encuentran en cada uno de los estados de energía molecular (conocido por poblaciones de los estados) cuando se alcanza el equilibrio. Dado que la mecánica estadística se tratará con cierta extensión en el Capítulo 11, no es necesario proseguir ahora con este tema. Es evidente, sin embargo, que la descripción microscópica de un sistema implica las siguientes características:

1. Se hacen hipótesis acerca de la estructura de la materia; por ejemplo, se supone la existencia de moléculas.
2. Deben especificarse muchas magnitudes.
3. Nuestros sentidos no sugieren las magnitudes a especificar.
4. Las magnitudes especificadas no pueden medirse.

1.3. COMPARACION DE LOS CRITERIOS MACROSCOPICO Y MICROSCOPICO

Aunque pudiera parecer que ambos criterios son totalmente distintos e incompatibles, existe, no obstante, una relación entre ellos; y cuando ambos criterios se aplican al mismo sistema, deben conducir a idéntica conclusión. La relación entre ambos criterios reside en el hecho de que las pocas propiedades medibles directamente cuya especificación constituye la descripción macroscópica son en realidad los valores medios, durante un cierto período de tiempo, de un gran número de características microscópicas. Por ejemplo, la magnitud macroscópica presión es el promedio de la derivada de la cantidad de movimiento debida

a todos los choques moleculares efectuados por unidad de superficie. La presión, sin embargo, es una propiedad que percibimos mediante nuestros sentidos. Sentimos los efectos de la presión. La presión fue comprobada, medida y utilizada mucho antes de que los físicos tuvieran razones para creer en la existencia de choques moleculares. El concepto de presión permanecerá y tendrá el mismo significado para todo ser humano, aunque se modifique la teoría molecular. En esto reside una diferencia importante entre los criterios macroscópico y microscópico. Las pocas propiedades macroscópicas medibles son tan seguras como nuestros sentidos. Permanecerán inmutables mientras nuestros sentidos sean los mismos. Por el contrario, el criterio microscópico va más allá de nuestros sentidos: postula la existencia de moléculas, su movimiento, sus estados energéticos, sus interacciones, etc. Continuamente se modifica y no podemos estar seguros de que las hipótesis están justificadas hasta que hemos comparado una consecuencia deducida tomando como base estas hipótesis, con una consecuencia análoga deducida sobre la base del criterio macroscópico.

1.4. PROPOSITO DE LA TERMODINAMICA

Hemos destacado que una descripción de las macrocaracterísticas de un sistema mediante algunas de sus propiedades medibles, sugeridas más o menos directamente por nuestros sentidos, constituye la descripción macroscópica. Tales descripciones constituyen el punto de partida de las investigaciones en todas las ramas de la física. Por ejemplo, al tratar de la mecánica de un cuerpo rígido adoptamos el criterio macroscópico en cuanto se consideran solamente los aspectos externos del cuerpo rígido. La posición de su centro de gravedad se especifica, en un instante determinado, respecto a unos ejes de coordenadas. La posición, el tiempo y una combinación de ambos, tal como la velocidad, constituyen algunas de las magnitudes macroscópicas utilizadas en mecánica, y se denominan coordenadas mecánicas. Las coordenadas mecánicas sirven para determinar las energías cinética y potencial del cuerpo rígido respecto a los ejes de coordenadas; es decir, las energías cinética y potencial del cuerpo en conjunto. Estos dos tipos de energía constituyen la energía externa o mecánica del cuerpo rígido. El propósito de la mecánica es encontrar relaciones entre las coordenadas de posición y el tiempo que sean consistentes con las leyes del movimiento de Newton.

En termodinámica, sin embargo, la atención se dirige hacia el interior de un sistema. Se adopta un criterio macroscópico y se consideran solamente aquellas magnitudes macroscópicas que están relacionadas con el estado interno de un sistema. Mediante la experimentación se determinan las magnitudes que son necesarias y suficientes para la descripción de tal estado interno. Las magnitudes macroscópicas que están relacionadas con el estado interno de un sistema se denominan coordenadas termodinámicas. Tales coordenadas se utilizan para determinar la energía interna de un sistema. El objeto de la termodinámica es encontrar entre las coordenadas termodinámicas relaciones generales coherentes con sus principios básicos. Un sistema que puede describirse mediante coordenadas termodinámicas se denomina sistema termodinámico. Ejemplos de importantes sistemas termodinámicos en ingeniería son: un gas, tal como el aire; un vapor, tal como el vapor de agua; una mezcla, tal como la de vapor de gasolina y aire; un vapor en contacto con un líquido, tal como el amoníaco líquido y su vapor. La termodinámica química se ocupa de tales sistemas y, además sólidos, láminas superficiales y pilas eléctricas. La termodinámica física abarca, además, sistemas tales como alambres estirados, condensadores eléctricos, termopares y sustancias magnéticas.

1.5. EQUILIBRIO TERMICO

Hemos visto que puede darse una descripción macroscópica de una mezcla gaseosa especificando magnitudes tales como la composición, la masa, la presión y el volumen. La experiencia demuestra que, para una composición dada y una masa constante, son posibles muchos valores distintos de la presión y el volumen. Si se mantiene constante la presión, el volumen puede variar dentro de un amplio intervalo de valores, y viceversa. Dicho de otro modo, la presión y el volumen son coordenadas independientes. Análogamente, la experiencia demuestra que para un alambre de masa constante, la tensión y la longitud son coordenadas independientes, así como en el caso de una lámina superficial, la tensión superficial y la superficie pueden variarse independientemente. Algunos sistemas, tales como una pila eléctrica con dos electrodos distintos y un electrólito que, a primera vista, parecen muy complicados, también pueden describirse solamente mediante dos coordenadas independientes. Por el contrario hay sistemas compuestos, formados por un cierto número de partes homogéneas, que precisan la especificación de dos coordenadas independientes por

cada parte homogénea. En el Capítulo 2 se detallarán varios sistemas y sus coordenadas termodinámicas. Por ahora, para simplificar nuestro estudio, trataremos solamente con sistemas de masa y composición constantes, cada uno de los cuales precisa, para su descripción, únicamente un par de coordenadas independientes. Esto no implica pérdida esencial de generalidad y ocasiona una considerable economía de palabras. Cuando nos refiramos a cualquier sistema no especificado utilizaremos los símbolos Y y X para designar un par de coordenadas independientes.

i Oharra · Koordenatu independenteak: bikotea da aukeratzen dena

Pentsatzeko. Har ezazu masa finkoko gas bat, enbolo batek itxitako zilindro batean, eta sakatu enboloa barrurantz: presioa igo egiten da. Horrek erakusten al du P eta V ez direla independenteak? Zer mantendu duzu finko, esan gabe? Eta bururatzen al zaizu bolumena erdira murrizteko modurik, amaieran presioa lehengo bera izanik?

Azalpena irakasleak irekiko du. Pentsatu lehenago.

El estado de un sistema en el que Y y X tienen valores definidos, que permanecen constantes mientras no se modifican las condiciones externas, se dice que es un estado de equilibrio. La experiencia demuestra que la existencia de un estado de equilibrio en un sistema depende de la proximidad de otros sistemas y de la naturaleza de la pared de separación entre ellos. Las paredes pueden ser adiabáticas o diatérmicas. Si una pared es adiabática (véase Figura 1.1a), un estado Y, X del sistema A puede coexistir en equilibrio con un estado Y', X' del sistema B para cualesquiera valores posibles de las cuatro magnitudes, siempre que la pared resista los esfuerzos provocados por la diferencia entre ambos conjuntos de coordenadas. Gruesas capas de madera, hormigón, asbesto, fieltro, espuma de poliestireno, etc., constituyen excelentes aproximaciones experimentales de paredes adiabáticas. Si los dos sistemas están separados por una pared diatérmica (véase Fig. 1.1b), los valores de Y, X e Y', X' cambiarán espontáneamente hasta que se alcance un estado de equilibrio del conjunto. Entonces se dice que ambos sistemas se encuentran en equilibrio térmico entre sí. La pared diatérmica más frecuente es una placa metálica delgada. El equilibrio térmico es el estado alcanzado por dos (o más) sistemas, caracterizado por valores particulares de las coordenadas de los sistemas después de haber estado en comunicación entre sí a través de una pared diatérmica.

Imaginemos dos sistemas A y B separados entre sí por una pared adiabática, pero cada uno de ellos en contacto a través de una pared diatérmica con un tercer sistema C , estando todo el conjunto rodeado por una pared adiabática, como se muestra en la Figura 1.2a. La experiencia demuestra que ambos sistemas alcanzarán el equilibrio térmico con el tercero y que no tendrá lugar cambio alguno si, posteriormente, se sustituye la pared adiabática entre A y B por una pared diatérmica (Fig. 1.2b). Si en lugar de

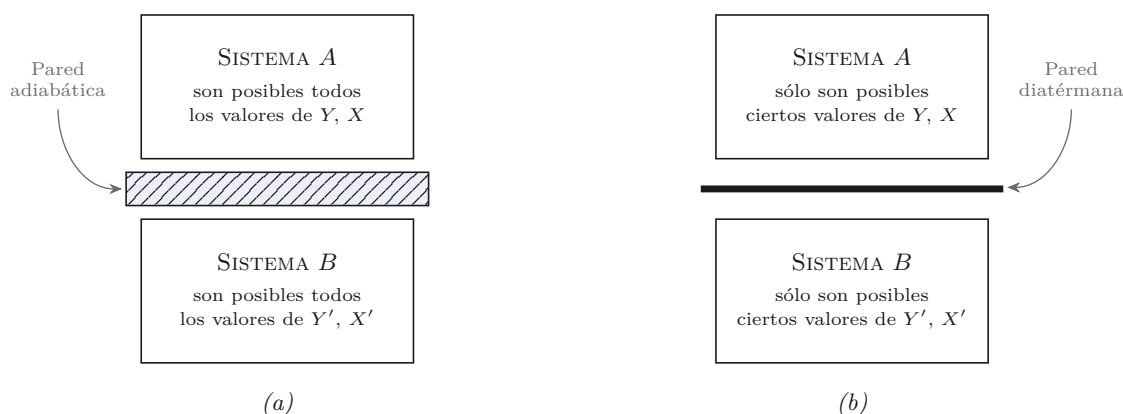


Figura 1.1. Propiedades de las paredes adiabáticas y diatérmicas.

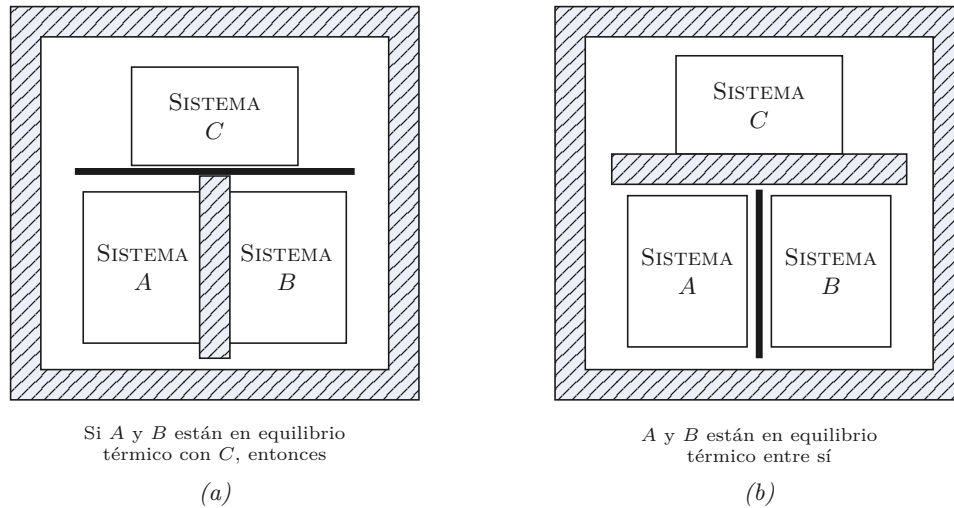


Figura 1.2. Principio cero de la termodinámica. (Las paredes adiabáticas se representan mediante sombreado; las paredes diatérmicas mediante líneas gruesas.)

permitir que los sistemas A y B alcancen el equilibrio con C al mismo tiempo, hacemos que primero se obtenga equilibrio entre A y C y luego entre B y C (siendo el estado del sistema C el mismo en ambos casos), entonces, cuando A y B se comuniquen a través de una pared diatérmica, se verá que están en equilibrio térmico. Utilizaremos la expresión «dos sistemas están en equilibrio térmico» para indicar que los dos sistemas están en estados tales que, si ambos se pusieran en contacto a través de una pared diatérmica, el conjunto estaría en equilibrio térmico. Estos hechos experimentales pueden enunciarse de la siguiente forma: Dos sistemas en equilibrio térmico con un tercero están en equilibrio térmico entre sí. De acuerdo con R. H. Fowler, llamaremos a este postulado el principio cero de la termodinámica.

i Oharra · Zero printzipioa bi esperimentu dira, ez bat

Pentsatzeko. Paragrafoak bi esperimentu deskribatzen ditu: lehenengoan, A -k eta B -k *aldi berean* ukitzen dute C ; bigarreanean, lehenik A -k eta gero B -k. Zer frogatzen du bigarrenak lehenengoak frogatu gabe uzten duena? Eta zeri dagokio parentesi arteko esaldia, «siendo el estado del sistema C el mismo en ambos casos» (C sistemaren egoera bera izanik bi kasuetan)? Azalpena irakasleak irekiko du. *Pentsatu lehenago.*

1.6. CONCEPTO DE TEMPERATURA

Consideremos un sistema A en el estado Y_1, X_1 , en equilibrio térmico con un sistema B en el estado Y'_1, X'_1 . Si separamos el sistema A y modificamos su estado, será posible encontrar otro estado Y_2, X_2 , el cual se halle en equilibrio térmico con el estado inicial Y'_1, X'_1 del sistema B . La experiencia demuestra que existe un conjunto de estados $Y_1, X_1; Y_2, X_2; Y_3, X_3$; etc., cada uno de los cuales se halla en equilibrio térmico con el mismo estado Y'_1, X'_1 del sistema B y que, de acuerdo con el principio cero, están en equilibrio térmico entre sí. Supondremos que todos estos estados, cuando se representan en un diagrama YX , se sitúan sobre una curva tal como la I de la Figura 1.3, que llamaremos isoterma. Una isoterma es el lugar de todos los puntos que representan estados en los cuales un sistema se halla en equilibrio térmico con un estado de otro sistema. No se hace hipótesis alguna sobre la continuidad de la isoterma, aunque los experimentos realizados con sistemas sencillos indican normalmente que por lo menos una porción de cada isoterma es una curva continua.

Análogamente, respecto al sistema B , encontraremos un conjunto de estados $Y'_1, X'_1; Y'_2, X'_2$; etc., todos los cuales se hallan en equilibrio térmico con un estado (Y_1, X_1) del sistema A y, por tanto, en equilibrio térmico entre sí. Estos estados se representan en el diagrama $Y'X'$ de la Figura 1.3 y se sitúan sobre la isoterma I' . De acuerdo con el principio cero se deduce que todos los estados sobre la isoterma I del sistema

A se hallan en equilibrio térmico con todos los estados sobre la isoterma I' del sistema B. A las curvas I e I' las denominaremos isotermas correspondientes de ambos sistemas.

Si las experiencias descritas anteriormente se repiten con diferentes condiciones iniciales, puede encontrarse otro conjunto de estados del sistema A situados sobre la curva II, cada uno de los cuales se halla en equilibrio térmico con cada estado del sistema B situado sobre la curva II'. De este modo puede encontrarse una familia de isotermas I, II, III, etc., del sistema A y una familia correspondiente I', II', III', etc., del sistema B. Además, por aplicaciones reiteradas del principio cero, pueden obtenerse isotermas correspondientes de otros sistemas C, D, etc. Todos los estados de las isotermas correspondientes de todos los sistemas tienen algo en común: a saber, que están en equilibrio térmico entre sí. Puede decirse que los sistemas, en estos estados, poseen una propiedad que asegura que se encuentran en equilibrio térmico entre sí. Denominamos temperatura a esta propiedad. La temperatura de un sistema es una propiedad que determina si un sistema se halla o no en equilibrio térmico con otros sistemas.

Se puede llegar al concepto de temperatura de una forma más concreta. Cuando un sistema A con coordenadas Y, X se separa de un sistema C con coordenadas Y'', X'' , el acceso al equilibrio térmico viene indicado por

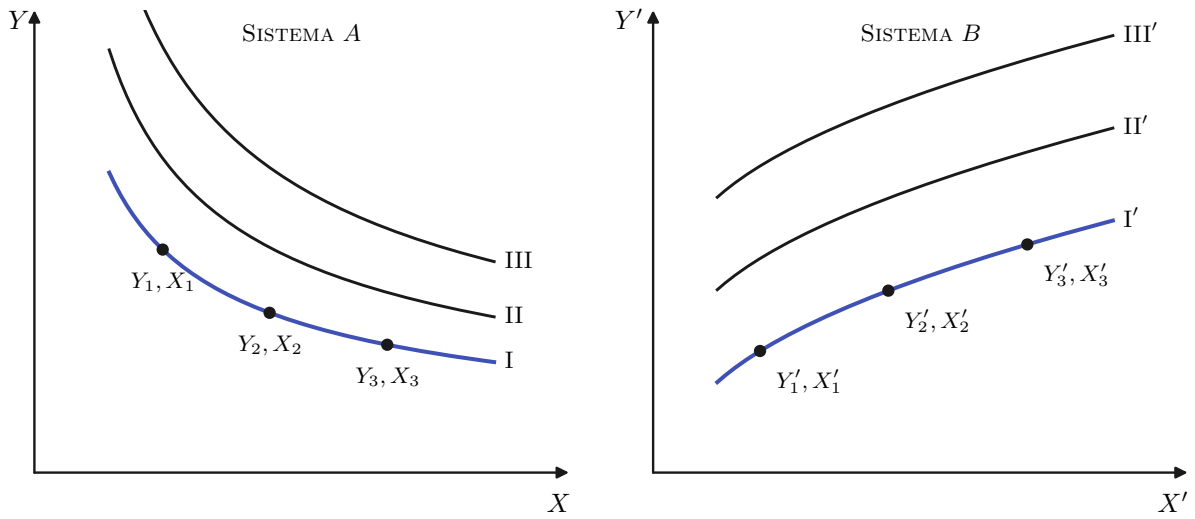


Figura 1.3. Isotermas de dos sistemas diferentes.

cambios en las cuatro coordenadas. El estado final de equilibrio térmico se designa por medio de una relación entre estas coordenadas, la cual puede escribirse en la forma funcional general

$$f_{AC}(Y, X; Y'', X'') = 0.$$

Por ejemplo, si A fuera un gas con coordenadas P (presión) y V (volumen) que siguiese la ley de Boyle, y C un gas similar con coordenadas P'' y V'' , la Ecuación (1-1) sería

$$PV - P''V'' = 0.$$

El equilibrio térmico entre el sistema B, con coordenadas Y', X' , y el sistema C se designa análogamente mediante la relación

$$f_{BC}(Y', X'; Y'', X'') = 0,$$

donde f_{BC} puede ser muy distinta de f_{AC} , pero suponiendo que también es una función sin singularidades.

Supongamos que se despeja Y'' en las Ecuaciones (1-1) y (1-2); entonces

$$Y'' = g_{AC}(Y, X, X''),$$

y

$$Y'' = g_{BC}(Y', X', X''),$$

o sea,

$$g_{AC}(Y, X, X'') = g_{BC}(Y', X', X'').$$

Ahora bien, de acuerdo con el principio cero, el equilibrio térmico entre A y C y entre B y C implica equilibrio térmico entre A y B , que se indica mediante una relación entre las coordenadas de los sistemas A y B únicamente; así,

$$f_{AB}(Y, X; Y', X') = 0.$$

Dado que la Ecuación (1-3) expresa también las dos mismas situaciones de equilibrio, debe coincidir con la Ecuación (1-4): esto es, ha de reducirse a una relación entre $Y, X; Y', X'$ únicamente. Por tanto, la coordenada X'' de la Ecuación (1-3) debe desaparecer, y la ecuación se reducirá a

$$h_A(Y, X) = h_B(Y', X').$$

Aplicando una segunda vez el mismo argumento con los sistemas A y C en equilibrio con B , se obtiene finalmente, cuando los tres sistemas se hallan en equilibrio térmico,

$$h_A(Y, X) = h_B(Y', X') = h_C(Y'', X'').$$

En otras palabras, existe una función de cada conjunto de coordenadas, y estas funciones son todas iguales cuando los sistemas se hallan en equilibrio térmico entre sí. El valor común t de estas funciones es la temperatura empírica común a todos los sistemas.

$$t = h_A(Y, X) = h_B(Y', X') = h_C(Y'', X'').$$

La relación $t = h_A(Y, X)$ es simplemente la ecuación de una isoterma del sistema A , tal como la curva I de la Figura 1.3. Si se da a t un valor numérico distinto, se obtiene una curva distinta, tal como la II en la Figura 1.3.

La temperatura de todos los sistemas en equilibrio térmico puede representarse mediante un número. El establecimiento de una escala de temperaturas consiste simplemente en la adopción de un conjunto de reglas para asignar un número a un conjunto de isotermas correspondientes y un número distinto a un conjunto diferente de isotermas correspondientes.

1.7. MEDIDA DE LA TEMPERATURA

Para fijar una escala de temperaturas empíricas, seleccionamos como patrón un cierto sistema con coordenadas Y y X , al cual denominaremos termómetro, y adoptamos un conjunto de reglas para asignar un valor numérico a la temperatura asociada a cada una de sus isotermas. A la temperatura de cualquier otro sistema en equilibrio térmico con el termómetro le asignamos el mismo número. El procedimiento más sencillo consiste en seleccionar una trayectoria conveniente en el plano YX , tal como la indicada en la Figura 1.4 por la línea de trazos $Y = Y_1$ que corta a las isotermas en puntos cada uno de los cuales tiene la misma coordenada Y , pero diferente coordenada X . La

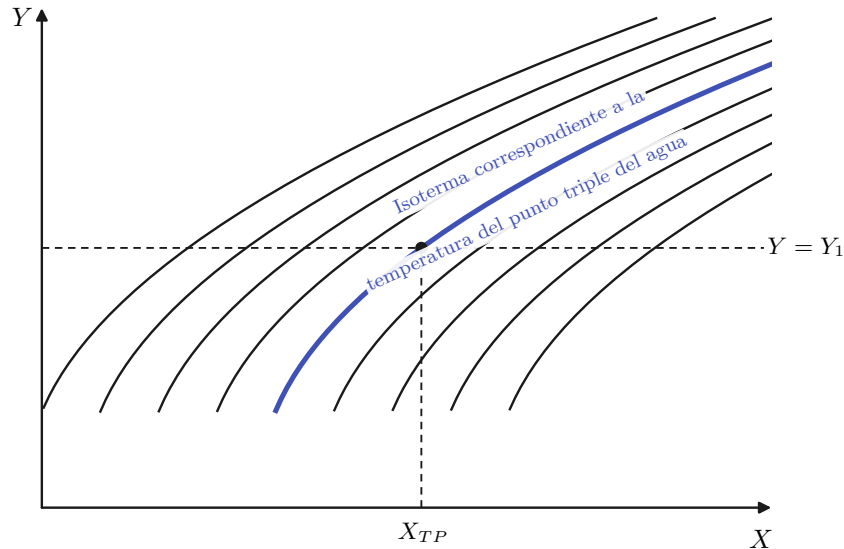


Figura 1.4. El establecimiento de una escala de temperaturas supone la asignación de valores numéricos a las isotermas de un sistema patrón elegido arbitrariamente o termómetro.

temperatura asociada a cada isoterma se toma de modo que sea una función cómoda de la X en el punto de intersección. La coordenada X se denomina propiedad termométrica, y la forma de la función termométrica $\theta(X)$ determina la escala de temperatura. Existen seis tipos importantes de termómetros, cada uno de los cuales tiene su propia propiedad termométrica, como se indica en la Tabla 1.1

Tabla 1.1. Termómetros y propiedades termométricas

Termómetro	Propiedad termométrica	Símbolo
Gas (volumen constante)	Presión	P
Resistencia eléctrica (tensión constante)	Resistencia eléctrica	R'
Termopar (tensión constante)	Fem térmica	ε
Vapor de helio (saturado)	Presión	P
Sal paramagnética	Susceptibilidad magnética	χ
Radiación del cuerpo negro	Emitancia radiante	$R_{B,1}$

Sea X una cualquiera de las propiedades termométricas relacionadas en la Tabla 1.1 y decidamos, arbitrariamente, definir la escala de temperatura de forma que la temperatura θ sea directamente proporcional a X . De este modo, la temperatura común al termómetro y a todos los sistemas en equilibrio térmico con él viene dada por

$$\theta(X) = aX \quad (Y \text{ const.}).$$

Debe observarse que cuando esta relación arbitraria se aplica a diferentes tipos de termómetros se obtienen, comúnmente, diferentes escalas de temperatura e incluso cuando se aplica a diferentes sistemas del mismo tipo. Finalmente debe seleccionarse, ya sea arbitrariamente o de forma razonada, un tipo de termómetro y un sistema particular (o tipo de sistema) para ser utilizado como dispositivo termométrico patrón. Pero independientemente del patrón escogido, hay que fijar el valor de a en la Ecuación (1-7); únicamente entonces se tiene una relación numérica entre la temperatura $\theta(X)$ y la propiedad termométrica X .

La Ecuación (1-7) se aplica generalmente a un termómetro puesto en contacto con un sistema del cual debe medirse su temperatura $\theta(X)$. Por tanto, se aplica cuando el termómetro se pone en contacto con un sistema patrón, seleccionado arbitrariamente, en un estado fácilmente reproducible; tal estado de un sistema patrón seleccionado arbitrariamente se denomina punto fijo. Desde 1954 está en uso un único punto fijo patrón, el punto triple del agua, el estado del agua pura en el que coexisten en el equilibrio

una mezcla de hielo, líquido y vapor. Arbitrariamente asignamos a la temperatura de este estado el valor 273.16 Kelvin, abreviadamente 273.16 K. Entonces la Ecuación (1-7) se escribe

$$a = \frac{273.16 \text{ K}}{X_{PT}},$$

en la que el subíndice PT identifica explícitamente el valor X_{PT} de la propiedad con la temperatura del punto triple. De acuerdo con (1-8), la ecuación general (1-7) puede escribirse

$$\theta(X) = 273.16 \text{ K} \frac{X}{X_{PT}} \quad (Y \text{ const.}).$$

La temperatura del punto triple del agua es el punto fijo patrón en termometría. Para obtener el punto triple se destila agua muy pura, y sustancialmente de idéntica composición isotópica a la del agua de mar, en un recipiente representado esquemáticamente en la Figura 1.5. El recipiente se cierra cuando se ha eliminado todo el aire. Con ayuda de una mezcla frigorífica colocada en el hueco interior se forma alrededor del mismo una capa de hielo. Cuando la mezcla frigorífica se sustituye por un depósito termométrico, se funde en sus proximidades una fina capa de hielo. Mientras coexistan en equilibrio las fases sólida, líquida y vapor, el sistema se encuentra en el punto triple.

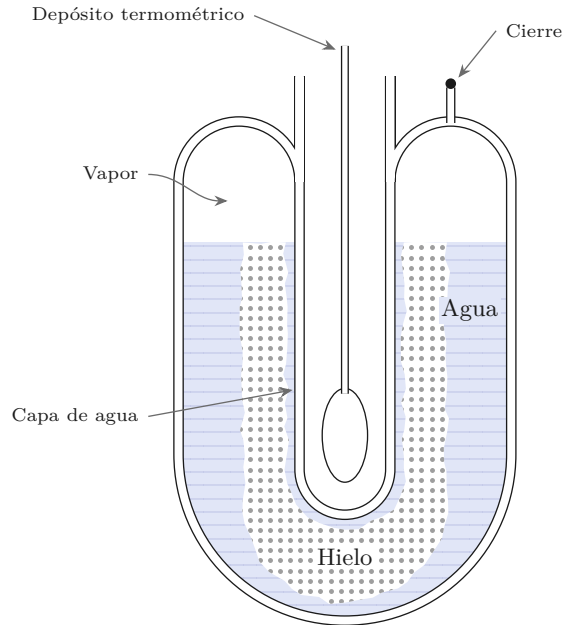


Figura 1.5. Celdilla para la obtención del punto triple.

1.8. COMPARACION DE TERMOMETROS

Aplicando los principios descritos en los apartados anteriores a los tres primeros termómetros relacionados en la Tabla 1.1 tenemos tres métodos diferentes de medir temperaturas. Así, para un gas a volumen constante,

$$\theta(P) = 273.16 \text{ K} \frac{P}{P_{PT}} \quad (V \text{ const.});$$

para una resistencia eléctrica,

$$\theta(R') = 273.16 \text{ K} \frac{R'}{R'_{PT}};$$

y para un termopar

$$\theta(\varepsilon) = 273.16 \text{ K} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{PT}}.$$

Imaginemos ahora una serie de pruebas en las cuales se mide simultáneamente la temperatura de un sistema dado con cada uno de los tres termómetros. El resultado de tal comparación se indica en la Tabla 1.2. Las iniciales PEN representan el punto de ebullición normal, que es la temperatura a la cual hierve un líquido a la presión atmosférica; las letras PFN representan el punto de fusión normal, las PSN el punto de sublimación y

Tabla 1.2. Comparación de termómetros

Punto fijo	Termopar, cobre- constan- tán		Termómetro de resis- tencia de platino		Termómetro de H ₂ a volumen constante		Termómetro de H ₂ a volumen constante	
	ε , mV	$\theta(\mathcal{E})$	R' , ohms	$\theta(R')$	P , kPa*	$\theta(P)$	P , kPa*	$\theta(P)$
N ₂ (PEN)	0.73	32.0	1.96	54.5	184	73	29	79
O ₂ (PEN)	0.95	41.5	2.50	69.5	216	86	33	90
CO ₂ (PSN)	3.52	154	6.65	185	486	193	73	196
H ₂ O(PT)	$\varepsilon_{PT} = 6.26$	273	$R'_{PT} = 9.83$	273	$P_{PT} = 689$	273	$P_{PT} = 101$	273
H ₂ O(PEN)	10.05	440	13.65	380	942	374	139	374
Sn (PFN)	17.50	762	18.56	516	1287	510	187	505

[^0]las PT el punto triple. Los valores numéricos no pretenden ser exactos, y en lugar de 273.16 se ha escrito 273. Si se comparan las columnas θ puede verse que en cualquier punto fijo, excepto en el punto triple del agua, los termómetros discrepan. Incluso los dos termómetros de hidrógeno difieren ligeramente, pero la variación entre termómetros de gas puede reducirse mucho utilizando bajas presiones, por lo que para definir la escala de temperaturas empíricas se ha seleccionado como termómetro patrón un termómetro de gas.

i Oharra · 1.2. taulako bi hidrogeno-termometroak

Pentsatzeko. 1.2. taulako azken bi zutabe bikoitzak bi hidrogeno-termometro dira. Zergatik dira desberdinak haien P presioak errenkada *guztietan* eta, hala ere, biek zehazki 273 markatzen dute puntu hirukoitzean? Eta zergatik dira apur bat desberdinak haien θ balioak gainerako puntu finkoe-tan?

Azalpena irakasleak irekiko du. Pentsatu lehenago.

1.9. TERMOMETRO DE GAS

En la Figura 1.6 se muestra un esquema de un termómetro de gas de volumen constante. Los materiales, construcción y dimensiones difieren en los diferentes laboratorios e instituciones internacionales que los utilizan y dependen de la naturaleza del gas y del intervalo de temperaturas en el que se va a usar el termómetro. El gas está contenido en el depósito B (ordinariamente de platino o una aleación del mismo), que comunica con la

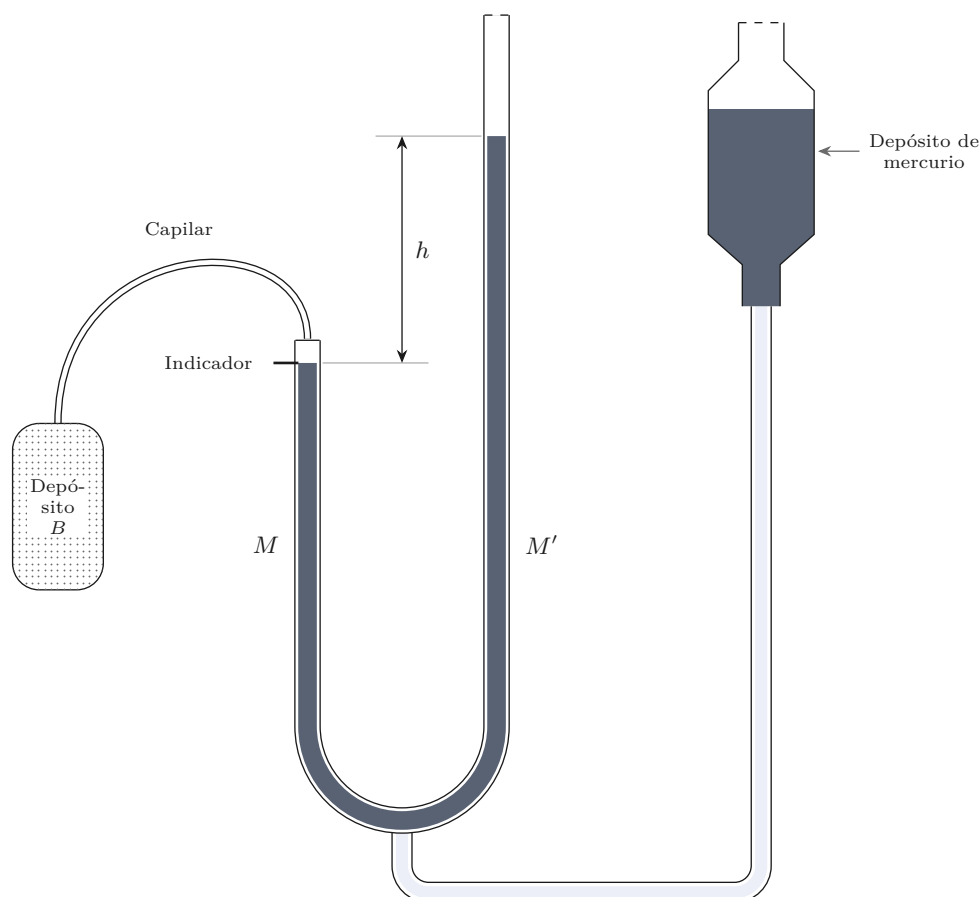


Figura 1.6. Termómetro de gas de volumen constante (simplificado). El depósito de mercurio se eleva o desciende de forma que el menisco de la izquierda siempre está en contacto con el indicador. La presión en el depósito es igual a h más la presión atmosférica (en mm & Hg)

columna de mercurio M a través de un capilar. El volumen de gas se mantiene constante ajustando la altura de la columna de mercurio M hasta que el nivel del mercurio alcance el extremo de un indicador situado en el espacio por encima de M , denominado espacio muerto o volumen perjudicial. La columna de mercurio M se ajusta subiendo o bajando el depósito. La diferencia h de altura entre las dos columnas de mercurio M y M' se mide cuando el depósito está rodeado por el sistema cuya temperatura va a medirse, y cuando se halla rodeado de agua en el punto triple.

Los distintos valores de la presión deben corregirse teniendo en cuenta las siguientes fuentes de error:

1. El gas en el espacio muerto (y en cualquier otro volumen perjudicial) está a temperatura distinta a la del depósito.
2. En el capilar que une el depósito con el manómetro el gas tiene un gradiente de temperatura; es decir, no se encuentra a temperatura uniforme.
3. Depósito, capilares y volúmenes perjudiciales experimentan cambios de volumen a temperatura y presión constantes.
4. Si el diámetro del capilar es comparable al recorrido libre medio de las moléculas del gas, existe un gradiente de presión en el capilar (efecto Knudsen).
5. Algo de gas se adsorbe por las paredes del depósito y del capilar; cuanto más baja es la temperatura mayor es la adsorción.
6. La temperatura y compresibilidad del mercurio producen efectos en el manómetro.

Recientemente se ha perfeccionado el diseño de termómetros de gas. Dos de estos perfeccionamientos se muestran esquemáticamente en la Figura 1.7.

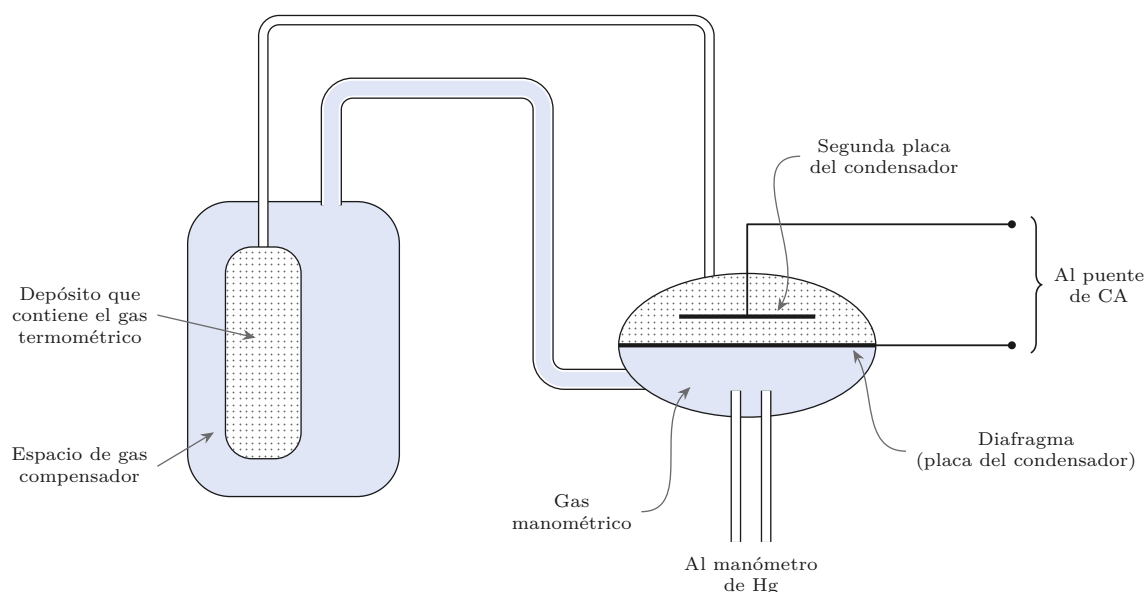


Figura 1.7. Esquema de dos perfeccionamientos introducidos en el termómetro de gas utilizado en el National Bureau of Standards de U.S.A.

En lugar de que el gas termométrico del depósito comunique directamente con el mercurio del manómetro, hay dos volúmenes separados de gas: el gas termométrico, que ejerce una presión sobre una de las caras de un diafragma, y un gas manométrico al otro lado del diafragma en contacto con el manómetro. El diafragma es una de las placas de un condensador, próxima a la otra placa fija. Una diferencia de presión entre ambas caras del diafragma produce un ligero movimiento del mismo, ocasionando una variación de la capacidad que se observa con la ayuda de un puente de corriente alterna. A la presión atmosférica normal puede detectarse una diferencia de presión de la millonésima parte. Cuando el diafragma no indica desviación, la presión del gas manométrico es igual a la del gas termométrico, y la lectura del manómetro da la presión de gas en el depósito.

Otra mejora descrita en la Figura 1.7 es la existencia de un espacio de gas compensador rodeando el depósito. Este espacio está ocupado por el gas manométrico. En el instante de llevar a cabo una lectura manométrica no existe fuerza neta que tienda a alterar las dimensiones del depósito y, por tanto, no es necesario hacer corrección alguna por la variación del volumen del depósito con la presión.

Los perfeccionamientos más importantes se han realizado en el manómetro de mercurio. El menisco de mercurio en cada tubo se ha hecho muy plano ensanchando los tubos, ya que el espacio muerto no depende de esta anchura como sucedía en el antiguo instrumento representado en la Figura 1.6. Se obtiene la posición de un menisco de mercurio utilizándolo como placa de un condensador, cuya otra placa está fija en las proximidades de aquélla, y midiendo la capacidad con un puente de corriente alterna. Para medir la diferencia de altura entre ambas columnas de mercurio se utilizan catetómetros. Así pueden medirse presiones con una exactitud de diez milésimas de milímetro de mercurio o de centésimas de pascal*.

1.10. TEMPERATURA DEL GAS IDEAL

Supongamos que se introduce una cierta cantidad de gas en el depósito de un termómetro de gas de volumen constante de modo que la presión P_{PT} , cuando el depósito está rodeado de agua en las condiciones de su punto triple, es igual a 120 kPa. Supongamos que, manteniendo constante el volumen V , llevamos a cabo las siguientes experiencias:

1. Rodeamos el depósito con vapor de agua saturado a la presión atmosférica normal, determinamos la presión P_s del gas y calculamos

$$\theta(P_s) = 273.16 \text{ K} \frac{P_s}{120}.$$

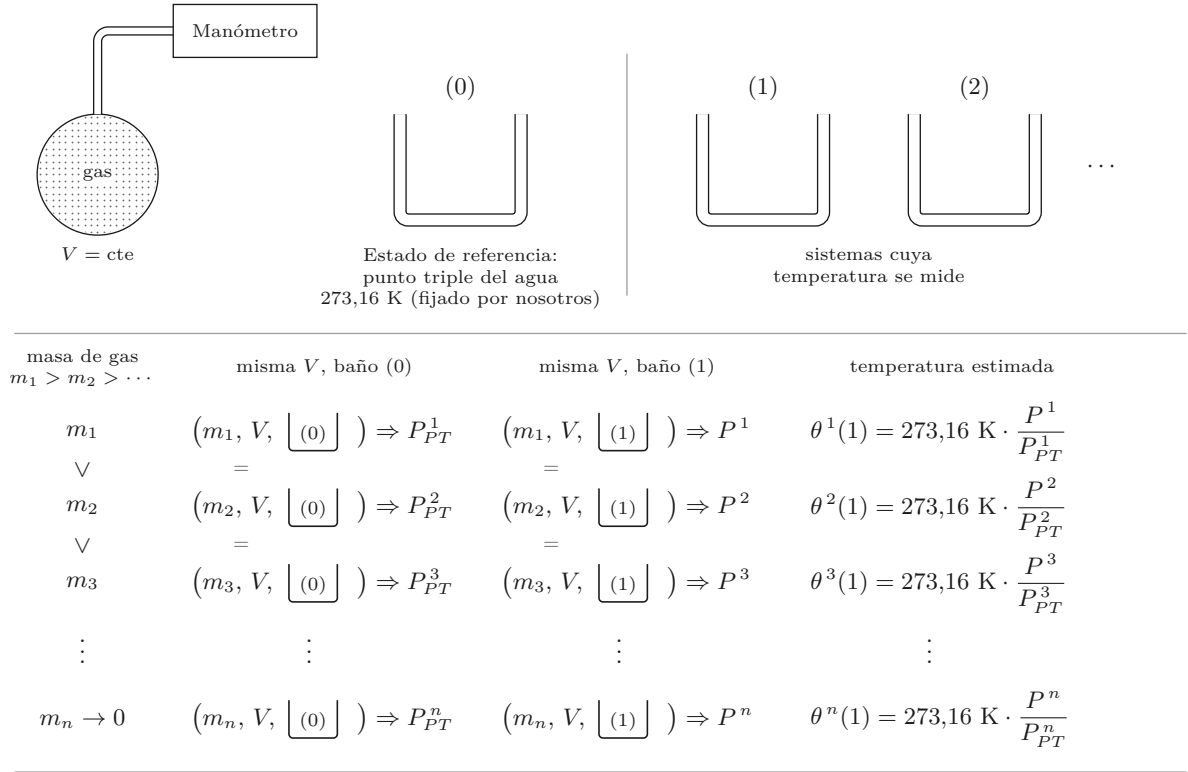
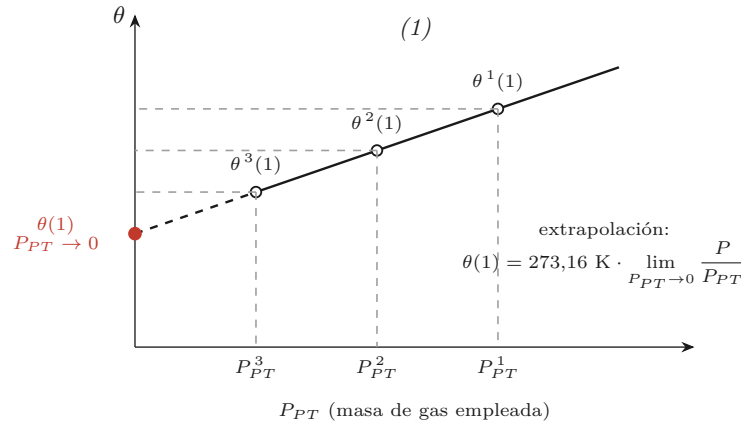
[1]

2. Eliminamos algo de gas de modo que P_{PT} tenga un valor menor, por ejemplo, 60 kPa. Determinamos el nuevo valor de P_s y calculamos el correspondiente valor

$$\theta(P_s) = 273.16 \text{ K} \frac{P_s}{60}.$$

3. Seguimos reduciendo la cantidad de gas en el depósito de modo que P_{PT} y P_s tengan cada vez valores más pequeños, alcanzando P_{PT} valores de 40 kPa, 20 kPa, etc. Para cada valor del P_{PT} calculamos el correspondiente de $\theta(P_s)$.
4. Representamos $\theta(P_s)$ en función de P_{PT} y extrapolamos la curva resultante hacia el valor $P_{PT} = 0$. Leemos en el gráfico

$$\lim_{P_{PT} \rightarrow 0} \theta(P_s).$$



Protocolo de medida con el termómetro de gas de volumen constante: con la misma cantidad de gas y el mismo volumen se mide la presión en el baño de referencia (punto triple del agua, 273,16 K) y en el sistema (1); se repite con masas de gas decrecientes y se extrapola θ a $P_{PT} \rightarrow 0$.

En la Figura 1.8 se representan los resultados de una serie de experiencias realizadas con tres gases distintos con el objeto de medir $\theta(P)$ no solamente

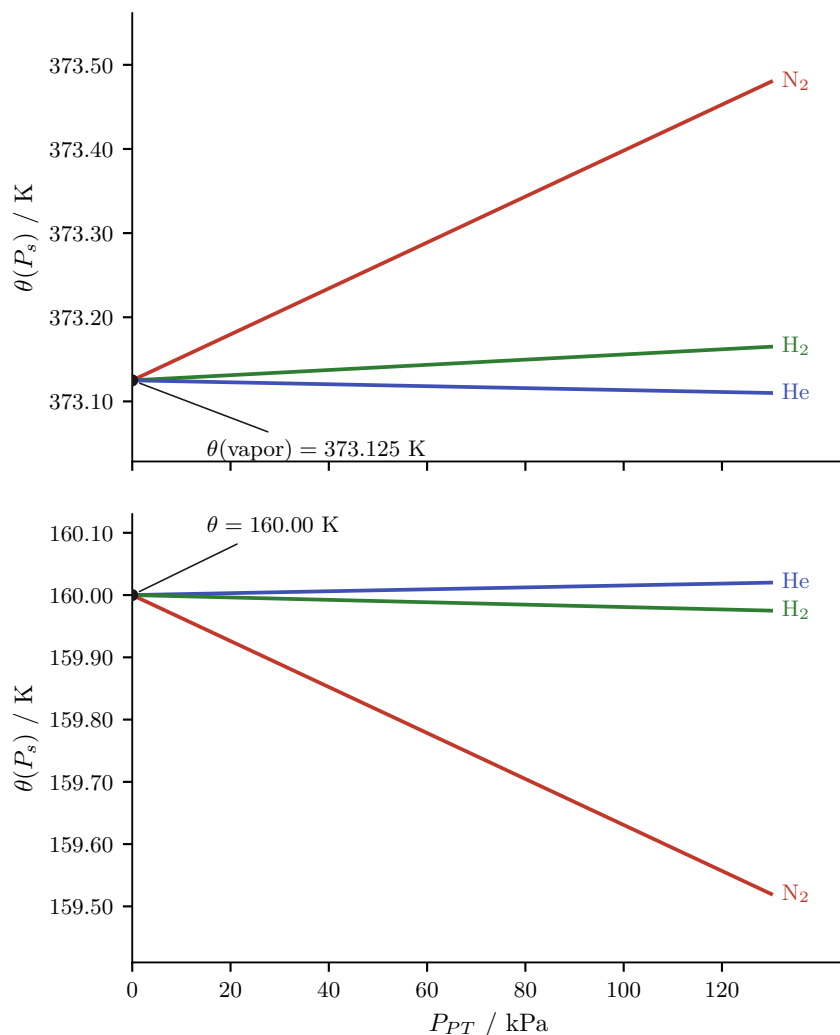


Figura 1.8. Indicaciones de un termómetro de gas de volumen constante para la temperatura del vapor de agua saturado y para el que es objeto de la prueba, utilizando gases a diferentes valores de P_{PT} .

para la temperatura del vapor del agua saturado, sino también para otra temperatura. El gráfico muestra que, aunque las indicaciones de un termómetro de gas de volumen constante dependen de la naturaleza del gas para valores ordinarios de P_{PT} , todos los gases señalan la misma temperatura al disminuir P_{PT} y tender hacia cero.

Por consiguiente, definimos la temperatura θ del gas ideal mediante la ecuación

$$\theta = 273.16 \text{ K} \lim_{P_{PT} \rightarrow 0} \left(\frac{P}{P_{PT}} \right) \quad (\text{V const.}).$$

Aunque la escala de temperaturas del gas ideal es independiente de las propiedades de cualquier gas particular, depende, sin embargo, de las propiedades de los gases en general. El helio es el gas más útil para termometría por dos razones. A altas temperaturas el helio no se difunde a través del platino, mientras que el hidrógeno sí lo hace. Además el helio se licúa a una temperatura inferior a la de cualquier otro gas y, en consecuencia, un termómetro de helio puede utilizarse para medir temperaturas más bajas de las que sería posible medir con cualquier otro termómetro de gas.

La menor temperatura del gas ideal que puede medirse con un termómetro de gas es de 0.5 K aproximadamente, siempre que se utilice ^3He a baja presión. La temperatura $\theta = 0$ queda por ahora sin definir. En el Capítulo 7 se definirá la escala Kelvin de temperatura, que es independiente de las propiedades de cualquier sustancia particular. Se demostrará que, en el intervalo de temperatura en el que puede utilizarse un termómetro de gas, la escala de gas ideal y la escala Kelvin son idénticas. Anticipándonos a este resultado,

escribimos K después de una temperatura de gas ideal. En el Capítulo 7 también se explicará cómo se define el cero absoluto de temperatura en la escala Kelvin. Hasta entonces, la frase «cero absoluto» carecerá de significado. Debe señalarse que la afirmación, que se encuentra en muchos textos de física elemental, de que a la temperatura $T = 0$ cesa toda actividad molecular es totalmente errónea. En primer lugar, tal afirmación implica una hipótesis que relacione el concepto puramente macroscópico de temperatura y el concepto microscópico de movimiento molecular. Si deseamos que nuestra teoría sea general debemos evitar, precisamente, este tipo de hipótesis. En segundo lugar, cuando en mecánica estadística se hace necesario relacionar la temperatura con la actividad molecular, se encuentra que debe modificarse la mecánica estadística clásica con ayuda de la mecánica cuántica y que, cuando se realiza esta modificación, las moléculas de una sustancia en el cero absoluto tienen una cantidad finita de energía cinética, denominada energía en el punto cero.

1.11. ESCALA DE TEMPERATURA CELSIUS

La escala de temperatura Celsius utiliza un grado de idéntica magnitud que el de la escala de gas ideal, pero su punto cero está desplazado, de modo que la temperatura Celsius del punto triple del agua es 0.01 grados Celsius, abreviadamente 0.01 °C. Así, si t representa la temperatura Celsius,

$$t(^{\circ}\text{C}) = \theta(\text{K}) - 273.15.$$

De acuerdo con esto, la temperatura Celsius t_s a la que condensa el vapor de agua a la presión atmosférica normal es

$$t_s = \theta_s - 273.15,$$

y leyendo el valor θ en la Figura 1.8,

$$\begin{aligned} t_s &= 373.125 - 273.15 \\ &= 99.975^{\circ}\text{C}. \end{aligned}$$

Mediciones análogas para el punto de congelación (la temperatura a la cual el hielo y el agua líquida saturada con aire a la presión atmosférica normal están en equilibrio) indican que en la escala Celsius esta temperatura es de 0.00 °C. Debe hacerse notar, sin embargo, que estas dos temperaturas están sujetas a incertidumbres experimentales como consecuencia de la extrapolación, tal como se indica en la Figura 1.8. La única temperatura Celsius que se fija por definición es la del punto triple.

1.12. TERMOMETRIA DE RESISTENCIA ELECTRICA

Cuando el termómetro de resistencia es un hilo largo y delgado, se enrolla alrededor de un ligero bastidor construido de forma que se eviten las tensiones excesivas cuando el hilo se contrae por enfriamiento. En casos especiales el hilo puede enrollarse o embutirse en el material cuya temperatura se va a medir. En la zona de bajas temperaturas los termómetros de resistencia constan a menudo de pequeñas resistencias a base de carbón o de un cristal de germanio «dopado» con arsénico y cerrado en una cápsula llena de helio líquido. Estos termómetros pueden adherirse a la superficie de la sustancia cuya temperatura se va a medir o colocarse en una cavidad taladrada para tal fin.

Se acostumbra medir la resistencia manteniendo en el termómetro una corriente constante conocida y midiendo la diferencia de potencial entre sus extremos mediante un potenciómetro muy sensible. En la Figura 1.9 se muestra un circuito típico. La corriente se mantiene constante ajustando un reóstato de modo que la diferencia de potencial entre los extremos de una resistencia patrón en serie con el termómetro se mantenga constante, como se observa con un potenciómetro monitor.

Para trabajos muy precisos en el intervalo de -253 a 1200 °C puede utilizarse el termómetro de resistencia de platino. El calibrado del instrumen-

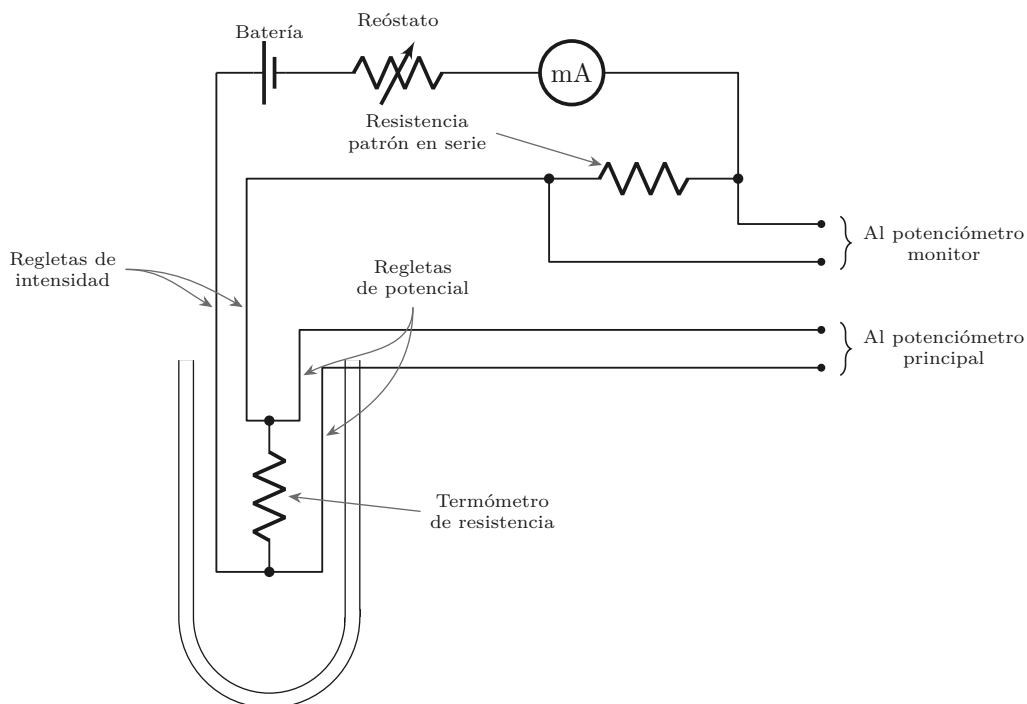


Figura 1.9. Circuito para medir la resistencia de un termómetro de resistencia a través del cual se mantiene una corriente constante.

to implica la medida de R'_{Pt} a varias temperaturas y la representación de los resultados mediante una fórmula empírica. En un intervalo limitado se utiliza, a menudo, la siguiente ecuación cuadrática:

$$R'_{Pt} = R_0 (1 + At + Bt^2),$$

de donde R'_0 es la resistencia del hilo de platino cuando está rodeado de agua en las condiciones del punto triple, A y B son constantes y t es la temperatura Celsius empírica.

1.13. TERMOPAR

En la Figura 1.10 se indica el empleo correcto de un termopar. La fuerza electromotriz térmica (fem) se mide con un potenciómetro, el cual, por lo

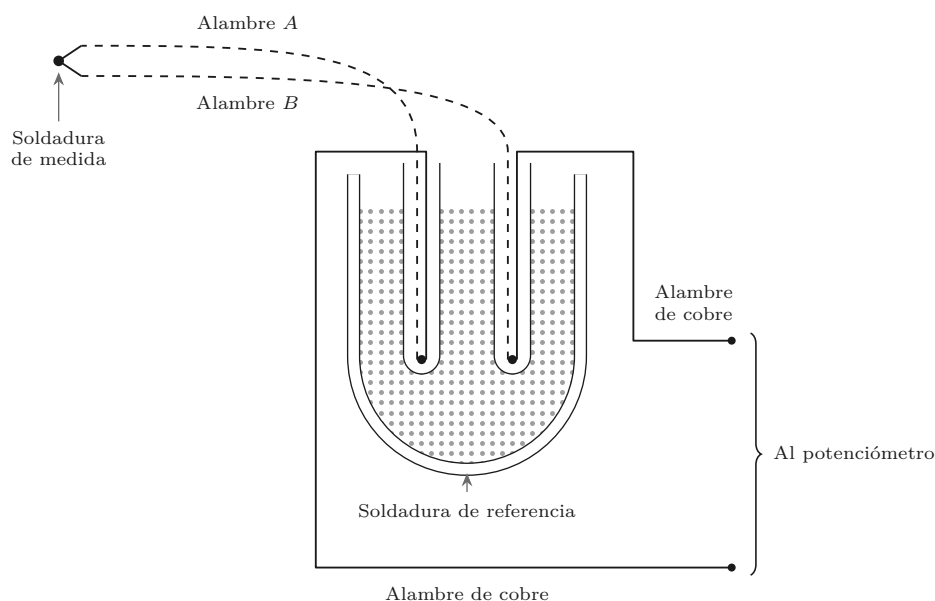


Figura 1.10. Termopar con los metales A y B con una soldadura de referencia compuesta de dos conexiones con hilo de cobre conectadas a un potenciómetro.

regular, debe colocarse a cierta distancia del sistema cuya temperatura se va a medir. La soldadura de referencia, por tanto, está próxima a la soldadura de medida y está formada por dos conexiones con hilo de cobre, mantenidas a la temperatura del hielo fundente. Este dispositivo permite el uso de hilos de cobre para la conexión al potenciómetro. Los bornes de unión del potenciómetro son comúnmente de latón y, por tanto, en el potenciómetro hay dos termopares cobre-latón. Si los dos bornes de unión se hallan a la misma temperatura, estos dos termopares cobre-latón no introducen errores.

Un termopar se calibra midiendo la fem térmica a varias temperaturas, manteniendo la soldadura de referencia a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. En la mayor parte de termopares los resultados de tales medidas pueden representarse por medio de una ecuación cúbica como la que sigue:

$$\varepsilon = a + bt + ct^2 + dt^3,$$

en donde $\mathcal{E}$ es la fem térmica y las constantes a, b, c y d son diferentes para cada termopar. Dentro de un intervalo limitado de temperatura a menudo es suficiente una ecuación cuadrática. El intervalo de un termopar depende de los materiales de que se compone. Un termopar de platino - 10 por 100 de platino/rodio tiene un intervalo de 0 a $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$. La ventaja de un termopar es que alcanza muy rápidamente el equilibrio térmico con el sistema cuya temperatura debe medirse, debido a que su masa es pequeña. Por esto se adapta fácilmente a los cambios de temperatura, pero no es tan preciso como un termómetro de resistencia de platino.

1.14. ESCALA PRACTICA INTERNACIONAL DE TEMPERATURA (1968) (IPTS-68)

La utilización del termómetro de gas ideal para calibrados rutinarios o para la medida de la temperatura termodinámica no es práctica. En el XVII Congreso de Pesas y Medidas de 1927 se adoptó una escala práctica internacional de temperaturas con el fin de conseguir un calibrado fácil y rápido de instrumentación científica e industrial. Esta escala se revisó en 1948 y fue perfeccionada en 1960.

La Escala Práctica Internacional de Temperatura (1968) (IPTS-68) fue perfeccionada en 1975, se compone de una serie de puntos fijos medidos con un termómetro de gas de volumen constante y una colección de procedimientos para la interpolación entre los puntos fijos. Aunque la Escala Práctica Internacional no trata de suplir a las escalas de gas ideal o Celsius, está pensada como una muy buena aproximación a las

mismas; las diferencias entre las escalas se mantienen dentro de los límites de precisión de las mediciones admitidos en 1975.

La medición exacta de la temperatura con un termómetro de gas requiere meses de laborioso trabajo de laboratorio y de cálculo y cuando se ha realizado constituye un acontecimiento internacional. Los resultados se

Tabla 1.3. Temperaturas de los puntos fijos según IPTS-68*

Puntos fijos**		T , K	t , °C
Patrón	Punto triple del agua	273.16	0.01
Puntos fijos básicos	PT del hidrógeno (equilibrio)	13.81	-259.34
	PE del hidrógeno (equilibrio) a 33330.6 Pa	17.042	-256.108
	PEN del hidrógeno (equilibrio)	20.28	-252.87
	PEN del neón	27.102	-246.048
	PT del oxígeno	54.361	-218.789
	PT del argon	83.798	-189.352
	PEN del oxígeno	90.188	-182.962
	PEN del agua***	373.125	99.975
	PFN del estaño	505.074	231.924
	PFN del cinc***	692.664	419.514
	PFN de la plata	1235.08	961.93
	PFN del oro	1337.58	1064.43
Puntos de referencia secundarios	PT del hidrógeno normal	13.965	-259.194
	PEN del hidrógeno normal	20.397	-252.753
	PT del neón	24.561	-248.589
	PT del nitrógeno	63.146	-210.004
	PEN del nitrógeno	77.344	-195.806
	PEN del argón	87.294	-185.856
	PSN del dióxido de carbono	194.674	-78.476
	PFN del mercurio	234.314	-38.836
	Equilibrio del hielo y del agua-aire (sat)	273.15	0
	PT del fenoxibenceno	300.02	26.87
	PT ácido benzoico	395.52	122.37
	PFN del indio	429.784	156.634
	PFN del bismuto	544.592	271.442
	PFN del cadmio	594.258	321.108
	PFN del plomo	600.652	327.502
	PEN del mercurio	629.81	356.66
	PEN del azufre	717.824	444.674
	PFN del antimonio	903.905	630.755
	PFN del aluminio	933.61	660.46
	PFN del cobre	1358.03	1084.88
	PFN del níquel	1728	1455
	PFN del cobalto	1768	1495
	PFN del paladio	1827	1554
	PFN del platino	2042	1769
	PFN del rodio	2236	1963
	PFN del indio	2720	2447
	PFN del niobio	2750	2477
	PFN del molibdeno	2896	2623
	PFN del wolframio	3695	3422

[2]publican en las revistas de física y, finalmente, se catalogan en las tablas de constantes físicas. En la Tabla 1.3 se indican, para un cierto número de materiales, los resultados de la medición de la temperatura del punto de ebullición normal (PEN), punto de fusión normal (PFN) y de algunos estados de equilibrio.

La temperatura límite inferior de la Escala Práctica Internacional de 1968 es 13.81 K, el punto triple del hidrógeno. Por debajo de dicha temperatura no se define la escala. Por encima del punto de fusión del oro (1337.58 K) se utiliza un método óptico conjuntamente con la fórmula de Planck de la radiación. El intervalo entre 13.81 y 1337.58 K se divide en tres partes, como sigue:

1. Desde 13.81 K hasta 273.15 K. Se utiliza un termómetro de resistencia de hilo de platino. La gama de temperaturas se divide en cuatro subintervalos, y en cada intervalo se mide la resistencia en las condiciones especificadas por los puntos fijos seleccionados a partir de la Tabla 1.3. Las diferencias entre las resistencias medidas y una función de referencia se ajustan a un polinomio en T o t , que sirve como fórmula para la conversión en temperatura de los valores medidos de R .
2. Desde 273.15 K hasta 903.89 K. Se utiliza el mismo termómetro de resistencia de platino y un polinomio expresando t en función de R . Las constantes del polinomio se determinan a partir de las mediciones de resistencia en las condiciones del punto triple del agua, el punto de ebullición normal del agua y el punto de fusión normal del cinc.
3. Desde 903.89 K hasta 1337.58 K. Un termopar, uno de cuyos hilos es de platino de pureza especificada y el otro es de una aleación del 90 por 100 de platino y 10 por 100 de rodio, tiene una soldadura mantenida a 0 °C. La fuerza electromotriz e está representada por la fórmula

$$e = a + bt + ct^2$$

en la que a , b y c se calculan a partir de medidas de e a 903.89 ± 0.1 K, como se determina para un termómetro de resistencia de platino, y en los puntos normales de fusión de la plata y del oro.

PROBLEMAS

- 1.1. Los sistemas A , B y C son gases con coordenadas $P, V; P', V'; P'', V''$. Cuando A y C están en equilibrio térmico se cumple la relación

$$PV - nbP - P''V'' = 0.$$

Cuando están en equilibrio térmico B y C se cumple

$$P'V' - P''V'' + \frac{nB'P''V''}{V'} = 0.$$

Los símbolos n , b y B' son constantes.

- (a) ¿Cuáles son las tres funciones que son iguales entre sí en el equilibrio térmico, siendo cada una de ellas igual a t , donde t es la temperatura empírica?
 - (b) ¿Cuál es la relación que expresa el equilibrio térmico entre A y B ?
- 1.2. Los sistemas A y B son sales paramagnéticas con coordenadas $\mathcal{H}, M$ y $\mathcal{H}', M'$, respectivamente. El sistema C es un gas con coordenadas P, V . Cuando A y C están en equilibrio térmico se cumple la relación

$$4\pi nRC_C\mathcal{H} - MPV = 0.$$

Cuando están en equilibrio térmico B y C se tiene

$$nR\Theta M' + 4\pi nRC'_C\mathcal{H}' - M'PV = 0,$$

donde n , R , C_C , C'_C y Θ son constantes.

- (a) ¿Cuáles son las tres funciones que son iguales entre sí en el equilibrio térmico?
- (b) Hacer cada una de estas funciones igual a la temperatura del gas ideal y ver si algunas de estas ecuaciones son ecuaciones de estado como las estudiadas en el Capítulo 2.

1.3. En la tabla adjunta, las cifras de la fila superior representan la presión de un gas en el depósito de un termómetro de gas de volumen constante (hechas las correcciones de espacio muerto, dilación térmica del depósito, etc.) cuando el depósito se halla en las condiciones del punto triple del agua. La fila inferior representa las lecturas correspondientes de la presión cuando el depósito está rodeado de una sustancia a una temperatura constante desconocida. Calcular la temperatura θ del gas ideal de esta sustancia. (Utilizar cinco cifras significativas.)

P_{PT} , mmHg	1000.0	750.00	500.00	250.00
P , mmHg	1535.3	1151.6	767.82	383.95

1.4. La resistencia R' de una cierta resistencia de carbón obedece a la ecuación

$$\sqrt{\frac{\log R'}{\theta}} = a + b \log R',$$

en donde $a = -1.16$ y $b = 0.675$.

- (a) En un criostato de helio líquido se encuentra que la resistencia es, exactamente, 1000Ω . ¿Cuál es la temperatura?
- (b) Dibujar el gráfico $\log - \log$ de R' en función de θ en el intervalo de resistencias entre 1000 y 30000 Ω .

1.5. La resistencia de un cristal de germanio «dopado» obedece a la ecuación

$$\log R' = 4.697 - 3.917 \log \theta.$$

- (a) En un criostato de helio líquido se mide una resistencia de 218 Ω . ¿Cuál es la temperatura?
- (b) Dibujar el gráfico $\log - \log$ de R' en función de θ en el intervalo de resistencias entre 200 y 30000 Ω .