

Termodinámica

Podemos definir la termodinámica, como la ciencia que se encarga del estudio de la energía, su transformación, el intercambio entre diferentes sistemas y la relación de ésta con las propiedades macroscópicas de la materia.

Antes de comenzar el estudio es conveniente describir algunos conceptos básicos.

- **Sistema físico**

Entenderemos por sistema físicos cualquier cuerpo o conjunto de éstos localizados en alguna región limitada del espacio.

- **Frontera**

La superficie que limita dicha región recibe el nombre de frontera. La región por fuera de esta frontera la llamaremos entorno.

- **Energía interna**

Es la energía total de los componentes del sistema descrita desde el centro de masa del sistema. Esto se refiere a todo tipo de energía que **no** esté asociada al movimiento del sistema como un todo.

- **Estado termodinámico**

La descripción termodinámica de los sistemas la podemos hacer mediante variables macroscópicas, tales como presión, volumen, temperatura. El estado termodinámico del sistema quedará definido cuando estas cantidades sean especificadas de manera única. Esto, para el caso de la presión y la temperatura significa uniformidad de estas cantidades en el sistema.

- **Estado de equilibrio**

El sistema se encontrará en equilibrio si las cantidades que definen su estado no cambian con el tiempo.

- **Contacto térmico**

Se dice que dos sistemas están en contacto térmico cuando, a través de una frontera común, es posible transferir energía.

- **Equilibrio térmico**

Si entre dos sistemas, que están en contacto térmico, no existe transferencia de energía se dice que están en equilibrio térmico.

Temperatura

Aún cuando estamos muy familiarizados con la medida de la temperatura, establecer una definición formal de esta cantidad resulta un poco complicado. Es bastante común confundir este concepto con la idea de calor o energía interna de un sistema. Veamos un par de ejemplos de esta equivocación:

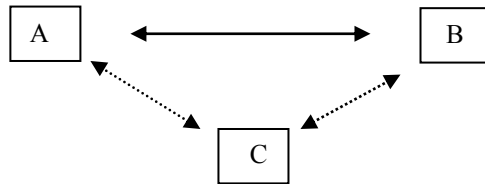
Suponga que sacamos de la nevera un vaso metálico y uno plástico, podríamos preguntarnos ¿cuál de los dos está más frío?

- Pensando en la sensación que nos produce al contacto con nuestros dedos, ambos objetos, la respuesta más común es que el vaso metálico estaría más frío..... Pero esto es **incorrecto**, ya que ambos objetos se encuentran a la misma temperatura: *la temperatura del interior de la nevera*. La sensación que se experimenta es debido a la propiedad de metal de absorber energía más rápido que el plástico.
- A menudo hablamos del calor en alguna región cuando en realidad nos referimos a la temperatura ambiental.

Entonces, ¿a qué nos referimos cuando hablamos de temperatura?

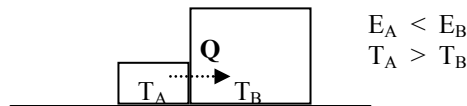
Para dar una ilustración de lo que representa la temperatura invocaremos la **Ley cero de la Termodinámica**:

“Si un sistema A está en equilibrio térmico con un sistema C, y a su vez, un sistema B también está en equilibrio con C, entonces los sistemas A y B se encuentran en equilibrio térmico entre sí”.



Este enunciado nos sugiere la existencia de alguna característica común entre los tres sistemas que permite que estén en equilibrio térmico. La variable asociada a dicha característica es lo que llamaremos **temperatura**. Así se puede afirmar que dos sistemas están en equilibrio térmico, sí y sólo sí, tienen la misma temperatura.

Evidentemente, si mantenemos dos sistemas en contacto térmico se producirá un flujo de energía de uno a otro mientras las temperaturas sean diferentes y dicho flujo cesará cuando las temperaturas sean iguales. Es justo el flujo de energía lo que entendemos por calor **Q** y como podemos ver este se produce cuando existe una diferencia de temperatura. Nótese que mientras el calor no es una cantidad que defina el estado del sistema la temperatura sí lo es. Es importante también señalar que la energía no necesariamente fluye de los sistemas más energéticos hacia aquellos con energía menores, la dirección de este flujo lo determina la diferencia de temperatura. Así, el flujo de energía se produce de los cuerpos con mayor temperatura hacia aquellos con temperatura menor.



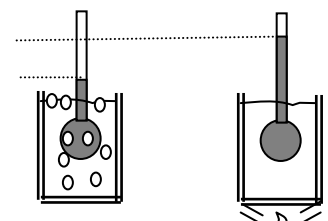
Medición de temperatura, termómetros.

Como podemos ver la temperatura (al igual que la masa, la longitud y el tiempo en mecánica), representa una cantidad fundamental esto es: no puede ser derivada de otras cantidades. Aún así su medida debe de hacerse en forma indirecta.

Existen muchas formas de medir la temperatura, pero todas (o casi todas) aprovechan los cambios físicos que experimenta algún sistema y que pueden reproducirse fácilmente. Por ejemplo, el punto de congelación del agua y su punto de ebullición, a nivel del mar, pueden ser usados para representar las temperaturas de dos estados termodinámicos diferentes. Por ejemplo, si le asociamos al punto de congelación la temperatura cero (0), y al punto de ebullición la temperatura cien (100) tendremos que todo sistema que se encuentre en equilibrio térmico con el agua hirviendo, se encontrará, en esta medición, a cien grados, mientras que aquellos que se encuentren en equilibrio con un depósito de agua, congelándose, estarán a cero grado. Estas temperaturas pueden ser registradas, usando el fenómeno de dilatación térmica de las sustancias, como la altura alcanzada por una columna de mercurio (Hg), contenida en un tubo de vidrio y sumergido en el agua en ambos estados.

Si dividimos la diferencia de altura en cien partes iguales tendremos una escala centígrada (Celsius).

Otras escalas son la Fahrenheit y la escala Kelvin (absoluta)



$$T_{\circ F} = 32^{\circ} + \frac{9}{5}T_{\circ C}$$

$$T_K = 273 + T_{\circ C}$$

En el primer caso se encuentra que el cero está desplazado -32 grados respecto al cero centígrado y cada grado Fahrenheit es $5/9$ del “tamaño” de un grado centígrado.

Para la escala Kelvin, el cero está desplazado -273 grados, respecto al cero centígrado, pero el “tamaño” de los grados es exactamente igual.

Por ejemplo, la temperatura del ambiente en las diferentes escalas puede ser:

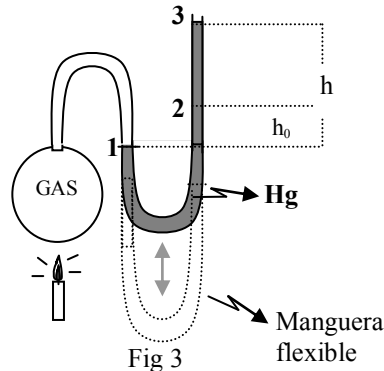
$25^{\circ} C$, $77^{\circ} F$ y $298 K$. representando las mismas condiciones.

Problemas

1. Existe una temperatura para la cual coincide el valor tanto en la escala centígrada como en la Fahrenheit. ¿Cuál es esta temperatura? ¿Cuál es su valor en la escala Kelvin?
2. Suponga que se construye un termómetro, con una escala en la cual la temperatura de congelación del agua es de 20° , mientras que la de ebullición es de 80° . ¿Qué lectura registrará este termómetro, si la temperatura del medio ambiente es $20^{\circ} C$?
¿Existe algún valor donde ambas escalas coinciden? ¿Cuál es éste?

Termómetro de gas

Dentro de los diferentes dispositivos usados para determinar la temperatura el termómetro de gas merece atención especial. En este instrumento, se asocia la temperatura a la presión que experimenta un porción de gas contenido en un recipiente a volumen constante.



En la figura 3 se ilustra este dispositivo: Un balón de vidrio en el que se encuentra el gas, un conducto con una manguera flexible conteniendo mercurio (Hg).

Al calentarse el gas aumenta la presión y se expande, por lo que desaloja al mercurio en la manguera. El punto (1) de contacto del mercurio con el gas es desplazado mas abajo y la altura inicial (2), en la parte derecha, también es modificada (sube). Luego, aprovechando la flexibilidad de la manguera, movemos ésta, hacia arriba, hasta lograr que el punto de contacto, del gas con el mercurio, vuelva a su posición original (1). En estas condiciones, donde la superficie libre del mercurio se encuentra en la posición 3, podemos asegurar que el volumen del gas es el mismo.

Usando la ecuación de estado para gases ideales

$$PV = nRT \Rightarrow P = \frac{nR}{V}T \quad (2)$$

en donde n es el número de moles de gas (constante), R es la constante de los gases, V es el volumen (constante) y T la temperatura. La presión del gas, en el interior del balón, es equilibrada con la presión externa, esto es

$$P = P_{at} + \rho_{Hg}gh,$$

donde P_{at} es la presión atmosférica y ρ_{Hg} la densidad del mercurio. De esta forma se encuentra que

$$\Delta P \propto \Delta h = h - h_0$$

Así, si calibramos este termómetro usando la temperatura del agua congelándose como el cero (cuando la altura de la columna es h_0) y la del agua en ebullición como $T = 100$, podemos hacer un gráfico de h vs T (P vs T), el cual, de acuerdo a la ecuación (2) debe corresponder a una línea recta, cuya pendiente será

$$m = \frac{nR}{V}$$

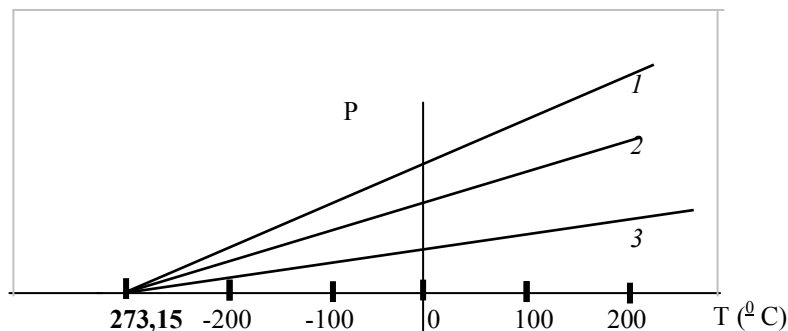


Fig 4

De esta forma, es claro que la inclinación de la curva sólo dependerá de la cantidad de gas y del volumen, mas no del tipo de gas (suponemos que están lo suficientemente diluidos para tratarlos como gases ideales). En la figura 4 se muestran las curvas correspondientes a tres muestra de gases. Uno de los resultados mas relevantes es que todas las curvas convergen hacia un mismo punto, cuando la presión es cero. Este punto corresponde al valor mas bajo de temperatura que puede existir $T = -273,15^\circ\text{C}$.

En la escala Kelvin esta temperatura corresponde al cero: **cero absoluto**.

Por está razón las temperaturas medidas en esta escala están desfasadas 273,15 grados respecto a la escala centígrada. Para efectos prácticos, de aquí en adelante, usaremos 273 en vez de 273,15 como el desfase entre ambas escalas.

Dilatación Térmica

Una de las propiedades mas frecuentemente usada, en líquidos y sólidos, para medir las variaciones de temperatura es al cambio de dimensiones que experimentan estos cuerpos con dichas variaciones. Dicho fenómeno lo llamaremos **dilatación**. Encontramos que ésta puede ser lineal, superficial o volumétrica, según sea las dimensiones a considerar.

- Dilatación lineal.

Esta corresponde a la variación de longitud que experimenta un cuerpo en alguna de sus dimensiones. Aún cuando nuestro estudio se hace desde un punto de vista macroscópico, conviene hacer una muy simple representación del comportamiento de los átomos y moléculas, en un material sólido, a fin ilustrar lo que sucede cuando un cuerpo experimenta un cambio de temperatura.

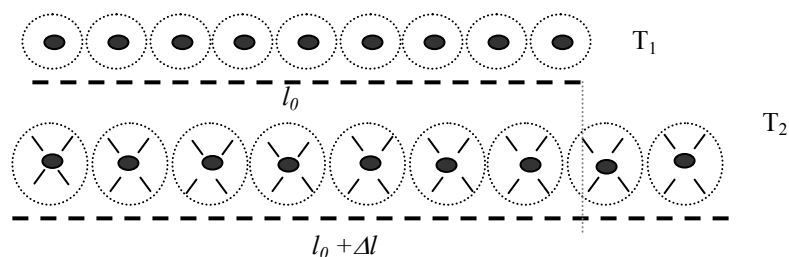


Fig 5
4

La figura 5 representa, en forma idealizada, un arreglo de átomos en una red cristalina unidimensional. Los átomos (puntos negros) no están en reposo si no que se mantienen en vibración alrededor de su posición promedio, esto permite que ocupen un volumen efectivo (círculo punteado) mayor que su tamaño. Al aumentar la temperatura, la energía aumenta y por lo tanto las vibraciones, lo que conlleva a un aumento del volumen efectivo ocupado por los átomos, de esta forma las dimensiones del sistema deben aumentar, en este caso la longitud. Fácilmente se puede ver que en la medida que el objeto es mas grande experimentará mayor dilatación. Por otro lado, ya que para los diferentes materiales las estructuras internas son distintas, es lógico que la dilatación dependa de la naturaleza del material. Por lo tanto, se espera que una ecuación para la dilatación tenga la forma

$$\Delta l = \Delta l(l_0, \Delta T, \alpha),$$

en donde l_0 , representa la longitud inicial, ΔT , el incremento de temperatura y α un parámetro que define la naturaleza del material.

Para hallar el coeficiente α , consideremos la variación de longitud es Δl , cuando la temperatura cambia en ΔT . Obviamente, no es Δl lo que podemos asociar al cambio de temperatura, ya que éste depende la longitud inicial y para un mismo ΔT podemos tener diferentes Δl , si la longitud inicial es diferente. Es conveniente definir el cambio relativo de longitud

$$\Delta l_R = \frac{\Delta l}{l_0},$$

esta cantidad es independiente de la longitud inicial, por lo tanto sólo dependerá del cambio de temperatura. Definimos entonces el **coeficiente de dilatación lineal** α de una sustancia como la relación entre el cambio relativo de longitud y el incremento de temperatura

$$\alpha \equiv \frac{\Delta l_R}{\Delta T} = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta T}.$$

Fácilmente puede notarse que las unidades de α son las del inverso de la temperatura y representa el cambio relativo de longitud por grado de temperatura. Aún cuando esta propiedad puede depender de la temperatura, en la mayoría de los casos este coeficiente puede considerarse constante, bajo cierto rangos. Usando $\Delta l = l - l_0$, encontramos que

$$l = l_0(1 + \alpha \Delta T).$$

De igual forma, podemos considerar la superficie de un cuerpo y definir el coeficiente de dilatación superficial como la razón entre el cambio relativo de superficie s y la variación de temperatura

$$\beta = \frac{\Delta s}{s_0 \Delta T},$$

con lo cual obtenemos

$$s = s_0(1 + \beta \Delta T)$$

Así mismo se define el coeficiente volumétrico de dilatación como

$$\gamma = \frac{\Delta V}{V_0 \Delta T},$$

$$V = V_0(1 + \gamma \Delta T)$$

A continuación se muestra una tabla de valores característicos de coeficientes de dilatación

Materia (sólidos)	α (lineal) $\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$		Material (líquidos)	γ (volumétrico) $\times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Aluminio (Al)	24		Alcohol Etilico	1.12
Cobre(Cu)	17		Acetona	1.50
Vidrio	9.0		Glicerina	4.85
Vidrio Pyrex	3.2		Mercurio	1.82
Plomo (Pb)	29			
Acero	11			
Concreto	12			

Los valores presentados en la tabla anterior corresponden a temperaturas ambiente, siendo válidos en un rango del orden de $10^2 \text{ } ^\circ\text{C}$, aproximadamente. Los valores de los coeficientes de dilatación lineal de los sólidos, en esta tabla, nos permiten obtener valores aproximados de coeficientes de dilatación superficial y volumétrico.

Supongamos que un cuerpo, de forma cuadrada de lado l_0 , es sometido a un cambio de temperatura ΔT , experimentando una variación de su superficie de la forma

$$s = s_0(1 + \beta \Delta T),$$

donde $s_0 = l_0^2$ y $s = l^2$. Si analizamos la dilatación experimentada en uno de sus lados, encontramos que

$$l = l_0(1 + \alpha \Delta T),$$

así podemos escribir

$$s = l^2 = l_0^2(1 + \alpha \Delta T)(1 + \alpha \Delta T) = s_0(1 + 2\alpha \Delta T + \alpha^2 \Delta T^2).$$

De la tabla anterior observamos que los sólidos poseen un coeficiente de dilatación lineal de orden 10^{-6} . Por otra parte, si admitimos cambio de temperatura del orden de 10^2 , entonces

$$\alpha \Delta T \approx 10^{-4} \Rightarrow \alpha^2 \Delta T^2 \approx 10^{-8}$$

como puede verse, el término cuadrático es lo suficientemente pequeño, como para optar por la aproximación de primer orden ($\alpha^2 \Delta T^2 \approx 0$). De esta forma obtenemos

$$\beta \approx 2\alpha.$$

Un desarrollo, para el coeficiente volumétrico de sólidos, similar nos permite obtener

$$\gamma \approx 3\alpha$$

Problemas

- Un anillo, hecho de cobre, tiene un radio $R = 10 \text{ cm}$, cuando la temperatura de $0 \text{ } ^\circ\text{C}$.
 - ¿Cuál será el nuevo radio si la temperatura aumenta hasta $80 \text{ } ^\circ\text{C}$?
 - ¿Cuánto cambia el área interna del círculo en estas condiciones?

Resp.

Para obtener el nuevo radio, debemos determinar la longitud del anillo, ésta puede ser calculada a través de la expresión

$$l = l_0(1 + \alpha_{cu} \Delta T)$$

en donde α_{cu} , es el coeficiente de dilatación lineal del cobre, según la tabla anterior su valor es $17 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Por otro lado, ΔT es $80 \text{ } ^\circ\text{C}$, mientras que la longitud inicial del anillo es $l_0 = 2\pi R_0$. Ahora bien, la nueva longitud l , en términos del nuevo radio R , es de la forma $l = 2\pi R$, por lo que podemos escribir, luego de manipular la ecuación, que

$$R = R_0(1 + \alpha_{cu} \Delta T)$$

esta expresión nos sugiere que el radio, que es una línea imaginaria, se comporta como un segmento hecho del mismo material. Luego de los hacer los cálculos se obtiene que $R = 10.0136 \text{ cm}$.

Ahora, fácilmente podemos calcular el área, ésta se obtiene como

$$s = \pi R^2$$

donde

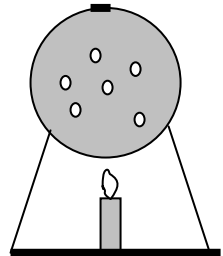
$$R^2 = R_0^2 (1 + \alpha_{cu} \Delta T)^2 = R_0^2 (1 + 2\alpha_{cu} \Delta T + \alpha_{cu}^2 \Delta T^2),$$

dado que $\alpha_{cu}^2 \Delta T^2 \cong 1.9 \cdot 10^{-6}$, en una aproximación de primer orden esta cantidad puede ser despreciada en comparación con la unidad, resultando

$$s = s_0 (1 + 2\alpha_{cu} \Delta T) \cong s_0 (1 + \beta_{cu} \Delta T)$$

donde β_{cu} es el coeficiente de dilatación superficial del cobre. Este resultado nos dice que el área interior del anillo se expande como si existiese materia (cobre) en ella.

- Un recipiente esférico, de aluminio, de radio $R=10$ cm. está completamente lleno de glicerina cuando la temperatura es de 25°C . Si se calienta el sistema hasta alcanzar 45°C ,
 - a. Se derramará la glicerina
 - b. Si esto sucede, ¿qué cantidad?



Resp.

Para saber si la glicerina se derrama, debemos desarrollar un criterio que permita saber bajo que condiciones esto puede suceder. El criterio es sencillo:

Se derramará el líquido contenido, si la dilatación de éste es mayor que la capacidad del envase dilatado

Sí $V_L > C$ el líquido se derrama

Sí $V_L \leq C$ el líquido no se derrama

El volumen del líquido dilatado se calcula a través de la expresión

$$V_L = V_0 (1 + \gamma \Delta T).$$

Para determinar la capacidad del envase calculemos primero el área de éste al dilatarse. Sabemos que una esfera tiene una superficie dada por

$$s = 4\pi R^2$$

de esta forma encontramos que

$$s = s_0 (1 + 2\alpha \Delta T) \Rightarrow R^2 = R_0^2 (1 + 2\alpha \Delta T)$$

aquí hemos usado una aproximación de primer orden, admitiendo que el término $\alpha \Delta T$ es muy pequeño. Obtenemos entonces el radio como

$$R = R_0 \sqrt{1 + 2\alpha \Delta T},$$

con un desarrollo de la raíz de la forma $\sqrt{1 + 2\alpha \Delta T} = 1 + \alpha \Delta T + [0]\alpha^2 \Delta T^2 + \dots + [0]\alpha^n \Delta T^n$ obtenemos, en primera aproximación, de nuevo

$$R = R_0 (1 + \alpha \Delta T)$$

y por lo tanto la capacidad del envase, en esta aproximación, es

$$C = C_0 (1 + 3\alpha_{al} \Delta T)$$

Usando el criterio anterior encontramos

Sí $\gamma > 3\alpha$ el líquido se derrama

Sí $\gamma \leq 3\alpha$ el líquido no se derrama

En nuestro caso encontramos, de acuerdo a la tabla anterior, que el líquido se derramará, ya que $\alpha = 24 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ y $\gamma = 4.85 \times 10^{-4}$.

Para hallar la cantidad de líquido derramado, ΔV , sólo tenemos que hacer la diferencia entre el volumen del líquido dilatado V_L y la capacidad del envase luego que se ha calentado

$$\Delta V = V_L - C = V_0(\gamma - 3\alpha)\Delta T = \frac{4}{3}\pi R_0^3(\gamma - 3\alpha)\Delta T$$

$$\Delta V = 34.50 \text{ cm}^3$$

Problemas propuestos

1. Se tiene un alambre de longitud l_0 . Si la mitad de éste está hecho de un material cuyo coeficiente de dilatación lineal es α_1 , mientras que el coeficiente de la otra mitad es α_2 , demuestre que el cambio de longitud, para una variación de temperatura ΔT , está dado por

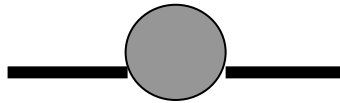
$$\Delta l_0 = l_0(1 + \bar{\alpha} \Delta T),$$

donde

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}.$$

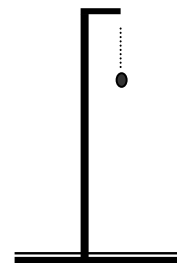
2. Una pequeña esfera de acero, de diámetro $d_1 = 58.02 \text{ mm}$, está encajada en un orificio circular de radio $r = 29.0 \text{ mm}$, en una lámina de cobre, siendo la temperatura 25° C , como se muestra en la figura. ¿Cuál es la temperatura mínima a la que habrá que calentar el sistema, para que la esfera pase a través del orificio?

Resp. $T = 82.5^\circ \text{ C}$



3. Para calcular la aceleración de gravedad, se lleva a cabo un experimento donde se deja caer una pequeña masa, desde la parte más alta, de un soporte de metal, de coeficiente de dilatación lineal α y longitud l_0 . Se mide el tiempo de caída, t_0 , y se aplican las ecuaciones cinemáticas despreciando la resistencia del aire. Estas medidas, sin embargo, se ven afectadas por un segundo factor: la temperatura. Demuestre, en una aproximación de primer orden, que los cambios de temperatura, ΔT , afectan el tiempo de caída de la forma

$$t' = t_0 \left(1 + \frac{\alpha \Delta T}{2}\right)$$



Calor

Usualmente se asocia el calor a la temperatura de los cuerpos, confundiéndolo con la energía interna. Es esta última la que está contenida en los sistemas. El calor, por su parte, puede definirse como la energía que está siendo transferida hacia (o desde) el sistema. Al igual como el trabajo mecánico no puede ser asociado al estado de movimiento de una partícula, el calor no puede ser asociado al estado termodinámico de los sistemas.

Entonces, los cambios en la energía interna de un sistema se producen por dos vías:

- 1.- Si se hace trabajo W sobre éste
- 2.- Si al estar en contacto térmico se transfiere energía, esto es calor ΔQ

$$\Delta E = \Delta Q + W \tag{3}$$

En esta ecuación W representa el trabajo que se efectúa sobre el sistema y que no está asociado al movimiento de éste como un todo, por lo cual, dicho trabajo, estará más bien relacionado al cambio de volumen por efectos de presión. En el caso de sólidos y líquidos (sustancias poco compresibles), estos cambios son muy pequeños y para efectos prácticos el trabajo en estos sistemas puede despreciarse.

En un proceso en el cual no se hace trabajo (procesos a volumen constante), todo el calor proporcionado se convierte en energía interna, dicho de otra forma: el cambio de energía interna es sólo debido al calor transferido. De acuerdo a (3) tenemos

$$\Delta Q = \Delta E. \quad (4)$$

Generalmente, los cambios de energía interna en un sistema están asociados a cambio de temperatura $\Delta E \propto \Delta T$. Así, usando (4), tenemos que,

$$\Delta Q \propto \Delta T \Rightarrow \Delta Q = C \Delta T, \quad (5)$$

donde C , que representa la capacidad del sistema de absorber (o emitir) calor por cambios de temperatura, se conoce con el nombre de **capacidad calórica**. Una forma alternativa de referirse a esta cantidad, la representa el llamado **calor específico c** . Este último puede definirse, por ejemplo, como la capacidad calórica por unidad de masa

$$c = \frac{C}{m}$$

De esta forma, en términos del calor específico, escribimos (5) como

$$\Delta Q = m c \Delta T. \quad (6)$$

El calor específico es característico de la sustancia de la cual está hecha el sistema y aún cuando puede depender de la temperatura ($c = c(T)$), al igual que la capacidad calórica, sus cambios son poco apreciables, principalmente en sólidos y líquidos, para rangos de temperatura razonables en los que no se producen cambios de fases en el sistema.

En algunas situaciones a volumen constante la energía absorbida por el sistema no provoca cambios en la temperatura, siendo la situación bastante diferente a la planteada anteriormente, pues en un proceso de esta naturaleza la energía entregada al sistema (el calor) es usada por éste para cambiar su fase, por ejemplo: al pasar de una fase líquida a una gaseosa, o de sólido a líquido, de líquido a sólido, de un estado cristalino a otro. Mientras esta transformación se está realizando la temperatura del sistema **no cambia**, manteniéndose constante hasta finalizar toda la transición. Por esta razón, en estos casos, es imposible establecer una capacidad calórica. Debido a que la cantidad de calor absorbido (o emitido), para llevar a efecto una transición de fase, depende de la naturaleza de la sustancia, caracterizamos estos sistemas mediante una cantidad llamada **calor latente**. Esta representa la porción de calor que se le debe suministrar (o extraer) al sistema, por unidad de masa, para provocar un cambio de fase. Así obtenemos para cada sustancia, el calor latente de fusión L_f , el calor latente de evaporización L_e , entre otros. De esta forma cuando producimos un cambio de fase al suministrar o extraer calor del sistema, tendremos

$$\Delta Q = mL. \quad (7)$$

Para una situación general, donde el sistema absorba (o emita) energía, donde ocurran alternadamente cambios en la temperatura ΔT y transformaciones de fase, podemos combinar (6) y (7) en una sola ecuación de la forma

$$\Delta Q = mc_1 \Delta T_1 + mL_1 + mc_2 \Delta T_2 + mL_2 + \dots + mc_n \Delta T_n + mL_n \quad (8)$$

En esta ecuación los términos del tipo $mc_k \Delta T_k$, representa la cantidad de calor absorbido (o emitido) por el sistema, en una fase k , que originan un cambio de temperatura ΔT_k , cuando el calor específico es c_k . Por su parte, mL_k , corresponde al calor, que el sistema absorbe o emite, al cambiar de fase. Por ejemplo,

Si se saca de la nevera un trozo de hielo a -5°C , y éste se derrite terminando como agua líquida a temperatura ambiente, la energía absorbida por esta masa constará de las siguientes porciones:

ΔQ_1 : La cantidad de calor para elevar la temperatura del hielo de -5°C a 0°C ($mc_h\Delta T_1$)

ΔQ_2 : El calor absorbido para derretir el hielo (mL_f)

ΔQ_3 : El calor necesario para elevar la temperatura de agua de 0°C a 20°C ($mc_A\Delta T_2$)

Obtenemos entonces

$$\Delta Q = mc_h\Delta T_1 + mL_f + mc_A\Delta T_2.$$

En general, cuando ponemos varios sistemas en contacto térmico, algunos emitirán calor y otros lo absorberán. Esto puede representarse por una ecuación muy sencilla permite describir la conservación de la energía estableciendo que: " el calor emitido, ΔQ_e , es igual al calor absorbido, ΔQ_a "

$$\Delta Q_e = -\Delta Q_a \quad (9)$$

Sabemos que los sistemas que emiten son los que se encuentran a mayor temperatura y los que absorben se encuentran a una temperatura menor.

A continuación se muestra en una tabla los calores específicos, de algunos sólidos y líquidos, a temperatura ambiente y una atmósfera de presión:

Calores específicos

Sustancia	MKS ($\frac{joul}{Kg.^{\circ}C}$)	$\frac{cal}{g.^{\circ}C}$
Aluminio	900	0.215
Cobre	387	0.092
Oro	129	0.031
Hierro	448	0.107
Hielo (-5°C)	2090	0.500
Alcohol (etílico)	2400	0.580
Agua	4186	1.000
Plomo	130	0.031

En la tabla anterior, en la segunda columna, la unidad de energía es el Joule (Sistema Internacional), y en la tercera la caloría.

Conviene hacer notar que

$$1 \text{ caloria} = 4.186 \text{ joul}.$$

Seguidamente se muestran algunos calores latentes, para la transición de fase de algunas sustancias

Calor Latente (L)

Sustancia	Punto de fusión ($^{\circ}\text{C}$)	Calor latente de fusión (Joul/Kgr)	Punto de ebullición ($^{\circ}\text{C}$)	Calor latente de vaporización (Joul/Kgr)
Helio	-269.65	5.23×10^3	-268	2.09×10^4
Alcohol Eetílico	-114	1.04×10^5	78	8.54×10^5
Agua	0.00	3.33×10^5	100	2.66×10^6
Azufre	119	3.81×10^4	444.60	3.26×10^5
Plomo	327	2.45×10^4	1750	8.70×10^5
Aluminio	660	3.94×10^5	2450	1.14×10^7

Problemas

Suponga que se dispone de gran cantidad de cubitos de hielo, de 50 grs cada uno, a una temperatura de -5°C y se desea enfriar a temperatura ambiente (25°C) una bebida caliente (por ejemplo té) que se encuentra en un envase de aluminio a 90°C . Que cantidad de estos cubos es necesaria, si se trata de 2 Kgr de dicha bebida y el recipiente posee una masa de 0.5 Kgr (Suponga que el calor específico de la bebida es $2400\text{ joul/Kg}\cdot^{\circ}\text{C}$).

Sol.

Para resolver este problema, primero supondremos que no se irradia calor al medio ambiente. De esta forma nuestro sistema estará constituido solamente por El Envase, La bebida y los cubos de Hielo.

Aplicamos entonces la ecuación de conservación

$$Q_{\text{absorbido}} = -Q_{\text{emitido}}$$

Identificamos la parte del sistema que absorbe calor: El Hielo, mientras el envase y la bebida, que está a mayor temperatura, son los que emiten. De esta forma la ecuación anterior toma la forma

$$Q_{\text{hielo}} = -Q_{\text{bebida}} + Q_{\text{envase}}$$

El calor emitido por la bebida y el envase estarán dado por

$$Q_b = m_b c_b \Delta T_1$$

$$Q_e = m_e c_e \Delta T_1'$$

donde ΔT_1 , representa la variación de temperatura que experimentarán tanto el envase como la bebida (-65°C). Por otro lado, la absorción de calor, por el hielo, se llevará a cabo en tres etapas: en la primera los cubos de hielo aumentarán su temperatura hasta alcanzar el punto de fusión (o congelación), cero grado centígrado, luego seguirán absorbiendo calor hasta que se derritan por completo, por último, el agua, producida por el deshielo, seguirá absorbiendo calor hasta que su temperatura sea la deseada (ambiente). De esta forma el calor absorbido, se debe calcular como

$$Q_a = m_h c_h \Delta T_2 + m_h L_f + m_a c_a \Delta T_3 = m_h (c_h \Delta T_2 + L_f + c_a \Delta T_3)$$

siendo ΔT_2 , la variación de temperatura experimentada por el hielo cuando alcanza cero grado (5°C), y ΔT_3 corresponde a la diferencia de temperatura que experimenta el agua (25°C). Por otra parte, es conveniente adoptar la siguiente convención: cuando el calor es absorbido $Q > 0$, por el contrario cuando es emitido $Q < 0$, es fácil ver esto cuando la temperatura cambia, pero cuando se trata de una transformación de fase hay que ser cuidadoso en la observancia de este hecho. Habiendo tomado esto último en cuenta encontramos,

$$m_h (c_h \Delta T_2 + L_f + c_a \Delta T_3) = -(m_b c_b + m_e c_e) \Delta T_1 \Rightarrow m_h = -\frac{(m_b c_b + m_e c_e)}{(c_h \Delta T_2 + L_f + c_a \Delta T_3)},$$

y luego de sustituir los valores adecuados obtenemos que la masa de hielo necesaria es $m_h = 0.762\text{ Kgr.}$, lo cual equivale aproximadamente a 15 cubitos de hielo (15.2 para ser más exacto).

Problemas propuestos

- En un envase metálico, de 198.6 grs de masa, que contiene 0.50 lts de agua a 24.1°C , se sumerge un objeto de hierro cuya masa es 250 gr. que se encuentra a una temperatura de 151.7°C . Si al alcanzar el equilibrio la temperatura del conjunto es 30.0°C , de que metal está hecho el envase. (Suponga que no se emite calor al medio ambiente) **Sol: Aluminio**
- En un ambiente aislado, se tiene tres pequeños bloques de igual masa, pero de diferentes materiales: el bloque 1 es de aluminio y se encuentra a una temperatura de 250°C , el bloque 2 es de cobre y su temperatura es 100°C y el tercero de hierro con una temperatura de 400°C . Suponga que el bloque 1 y el 2 se ponen en contacto y luego, de alcanzado el equilibrio, se separan. Seguidamente se juntan el 2 y el 3, dejando que se establezca el equilibrio entre estos. ¿Cuál es la temperatura final de cada bloque? **Sol : $T_1 = 205^{\circ}\text{C}$, $T_2 = T_3 = 309.6^{\circ}\text{C}$ (aproximadamente).**