

7. TEMPERATURA, CALOR Y ENERGIA:

Introducción:

Las nociones de calor y temperatura aceptadas científicamente se apoyan en las sensaciones que nos da nuestro cuerpo a través de algunos de nuestros sentidos. Así, por ejemplo, la sensación fisiológica revelada por el tacto, permite poder clasificar a los cuerpos en fríos y calientes, dando lugar a la noción aceptada de temperatura y por extensión a la de calor. Sin embargo, la física persigue nociones que vayan más lejos en la cual estas cantidades puedan ser cuantificadas, es decir, representadas por una cantidad numérica.

Cuando una taza llena de café acabado de servir, se toca con los dedos se tiene la sensación que se describe diciendo que la taza está caliente, o que es alta su temperatura. Si se toca una copa llena de helado se tiene una sensación de frío y se dice que la copa se encuentra a baja temperatura. Un cuerpo tibio o templado es aquel que no se siente ni frío ni caliente, porque su temperatura es parecida a la de nuestro cuerpo.

Si la taza de café y la copa de helado se dejan un y tiempo suficiente sobre la mesa, el café se enfría y el helado se derrite, adquiriendo la temperatura del medio ambiente. Si se mezcla el café caliente con el helado, la mezcla rápidamente adquiere una temperatura intermedia, igual para los dos. De esta forma podemos generalizar para dar una definición de temperatura como sigue:

“Existe una propiedad que poseen todos los cuerpos o sistemas, que al ponerse en contacto con otros, nos asegura que nos da la misma sensación térmica. Llamamos a esta propiedad temperatura”.

De este modo, los cuerpos en contacto y a diferentes temperaturas dejados un tiempo suficiente, tienden a igualarla, enfriándose los calientes y calentándose los fríos. En estas condiciones se dice que los cuerpos están en equilibrio térmico. Esto resume un postulado que a menudo se llama la ley cero de la termodinámica.

“Dos objetos, uno A frío al tacto y el otro B, que se siente caliente luego de un tiempo suficiente de ponerlos en contacto, los dos nos darán la misma sensación de temperatura”.

Por otro lado, ese paso de “algo” que se transfiere desde el cuerpo a mayor temperatura hacia el de menor temperatura o desde un sistema a su medio ambiente como resultado exclusivo de la diferencia de temperatura se denomina *calor*.

Hasta los principios del siglo XIX, los fenómenos encontrados en la cual intervenía la temperatura eran explicados suponiendo la existencia de una sustancia, denominada calórico, existente en todos los cuerpos. Se pensaba que un cuerpo a baja temperatura contenía poco calórico y que uno a alta temperatura contenía mucho calórico. Cuando los cuerpos se juntaban, el cuerpo rico en calórico entregaba tal sustancia a la que poseía menos hasta alcanzar ambos cuerpos la misma temperatura. Tal teoría fue capaz de describir procesos tales como la conducción del calor o mezclas entre sustancias. El concepto del calórico como sustancia, cuya cantidad total permanecía constante, a la larga no pudo resistir las pruebas experimentales. Transcurrieron muchos años desde que se concibió la teoría del calórico antes que llegara a aceptarse de una manera general que el calor es una forma de energía y no una sustancia. Fue Benjamín Thompson (1753-1814) quién realizó las primeras pruebas concluyentes de que el calor no podía ser una sustancia. Esta era una vieja idea tímidamente aceptada por sabios del siglo XVII como Galileo Galilei o Robert Boyle la cual resurgió de nuevo. Thompson, quién mas tarde llegó a ser Conde de Rumford de Bavaria, según sus propias palabras, aceptó la vuelta a aquellas viejas doctrinas que sostienen que el calor no es otra cosa que un *movimiento vibratorio de las partículas del cuerpo*.

Los experimentos, independientes entre sí*, de James Prescott Joule (1818-1889) en Inglaterra, Julius Robert von Mayer (1814-1878) en Heilbronn, Hermann von Helmholtz (1821-1894) en Alemania y L. A. Colding (1815-1888) en Dinamarca sobre la conservación de la energía, apuntaban fuertemente hacia el calor como una forma más de energía. En particular Joule, demostró experimentalmente que cada vez que una cantidad dada de energía mecánica se convierte en calor, se desarrolla la misma cantidad de calor. En esta forma se estableció de manera definitiva la equivalencia del calor y el trabajo mecánico como dos formas de energía.

El calor no sólo es capaz de aumentar la temperatura o modificar el estado físico de los cuerpos, sino que además puede moverlos y realizar un trabajo. Las máquinas de vapor que tan espectacular desarrollo tuvieron a finales del siglo XVIII y comienzos del XIX son una buena muestra de ello. Desde entonces las nociones de calor y energía quedaron unidas y el progreso de la física permitió, a mediados del siglo pasado, encontrar una explicación detallada para la naturaleza de esa nueva forma de energía, que se pone de manifiesto en los fenómenos caloríficos.

MEDIDA CUANTITATIVA DE LA TEMPERATURA

Para medir temperaturas se utiliza un termómetro. Estos se construyen escogiendo una sustancia termométrica con una propiedad termométrica peculiar de esta sustancia que cambie en general continua y monótonamente con la temperatura. En la naturaleza existen muchas propiedades físicas las cuales cambian con la temperatura. Entre ellas están el largo de una varilla, la resistencia eléctrica de un alambre, la presión de un gas que se mantiene a volumen constante, el volumen de un gas que se mantiene a presión constante, el color de un filamento de ampolla, la altura de una columna de mercurio, etc. Por ejemplo, la sustancia termométrica puede ser un líquido (mercurio) en un tubo capilar de vidrio con la propiedad termométrica de que la altura del nivel del líquido es función de la temperatura. Otro ejemplo sería el caso de un gas encerrado en un recipiente que se mantiene a presión constante, siendo la propiedad termométrica el volumen que es función de la temperatura.

Las escalas termométricas:

Para definir una escala de temperaturas es necesario elegir la propiedad termométrica en la cual se conozca la relación matemática entre dicha, propiedad y la temperatura. La propiedad escogida debe además ser lo suficientemente sensible para poder medir pequeñas variaciones de temperatura. Por otro lado, se debe escoger los denominados puntos fijos o temperaturas de referencias para poder calibrar el termómetro. Estos puntos fijos son escogidos de ciertos eventos físicos que se manifiesten a una temperatura determinada.

Es así como Celcius (1701-1744) construyó la primera escala termométrica antiguamente llamada centígrada y que hoy lleva su nombre*. Los puntos fijos fueron escogidos como el de fusión del hielo y el de ebullición del agua, advirtiendo que estos eran constantes a la presión atmosférica. Asignó arbitrariamente a estos los valores de temperatura de 0[°C] y 100[°C] respectivamente. Dicha escala quedó dividida en 100 partes siendo 1[°C] la centésima parte comprendida entre el punto de fusión del hielo y el de la evaporación del agua a 1[atm] de presión.

* Mayer era un doctor de 28 años de edad; Helmholtz un fisiólogo de 32 años; Colding, un ingeniero de 27 años; y Joule un industrial de 25 años.

* En 1948 la novena Conferencia General de Pesas y Medidas decidió que se abandonara el nombre “centígrado” y que se usara en su lugar “Celcius”, escala inventada por el sueco Celcius en 1742.

La escala Fahrenheit que todavía se usa comúnmente en países de habla inglesa, no tiene estado legal científico. Quizá lo más sencillo es decir que está construida a partir de los dos puntos fijos escogidos para la Celsius, pero donde se le asignan a estos los valores de temperatura de 32 [°F] y 212 [°F] respectivamente. De este modo si T_C es la temperatura Celsius y T_F la Fahrenheit, se cumple que:

$$T_F = \frac{9}{5} T_C + 32. \quad (7.1)$$

La escala de temperaturas adoptada por el SI es la llamada escala absoluta o Kelvin. Como punto fijo se escoge aquél en la cual están presentes el equilibrio hielo, agua líquida y vapor de agua, el cual se denomina punto triple del agua. Este es un punto único que solamente se puede llegar a presión de $4,58 \text{ [mmHg]} = 6,026 \cdot 10^{-3} \text{ [atm]}$. En esta escala el tamaño de los grados es el mismo que en la Celsius, donde el cero se fija arbitrariamente (adoptada en 1954 en la Décima Conferencia de Pesas y Medidas en París) al valor $-273,16 \text{ [°C]}$. Este punto llamado cero absoluto de temperaturas es tal que a dicha temperatura desaparece la agitación molecular, por lo que, según el significado que la teoría cinética atribuye a la magnitud temperatura, no tiene sentido hablar de valores inferiores a él. El cero absoluto constituye un límite inferior natural de temperaturas, lo que hace que en la escala Kelvin no existan temperaturas bajo cero (negativas). Si T_K representa la temperatura Kelvin, la relación con la escala centígrada viene dada por:

$$T_C = T_K - 273,15. \quad (7.2)$$

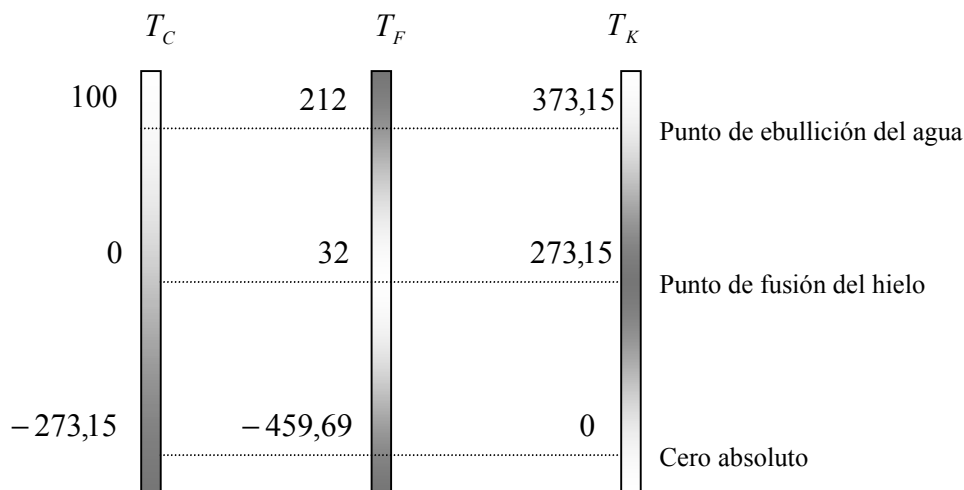


Fig. Comparación entre las escalas de temperaturas Kelvin, Celsius y Fahrenheit.

Dilatación Térmica:

Dilatación lineal de los sólidos:

Al calentar, por ejemplo, una varilla metálica su volumen aumenta y por lo tanto se alarga: este alargamiento constituye la dilatación lineal. Se ha encontrado experimentalmente que para rangos no muy altos de temperatura (0° a 100°C):

- El alargamiento es directamente proporcional a la elevación de temperatura
- El alargamiento es directamente proporcional al largo inicial de la varilla.

Resumiendo en una las dos leyes anteriores, se tiene la ley general de la dilatación lineal en que:

El largo de una varilla al calentarse, es directamente proporcional a la elevación de temperatura y al largo inicial de esta.

Si el largo inicial de la varilla es L_0 a la temperatura inicial T_0 , tendrá otro largo L a la temperatura final T , siendo la variación del largo $\Delta L = L - L_0$ para la variación de temperatura $\Delta T = T - T_0$.

La ley de dilatación lineal se escribe como:

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T,$$

o bien:

$$L = L_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T). \quad (7.3)$$

α es la constante de proporcionalidad, llamada coeficiente de dilatación lineal, con una unidad que frecuentemente es el $[1/^\circ C]$. Despejando α de la ecuación anterior, físicamente representa la fracción de cambio de longitud, por cambio de grado de temperatura.

La dilatación se hace presente en muchos sistemas cotidianos, los cuales deben tenerse en cuenta. Son así ejemplos el caso de los puentes, las tuberías que llevan fluido de un lugar a otro, los rieles de la línea férrea, el concreto que pavimenta las calles, etc.

Una aplicación termométrica del fenómeno de dilatación en sólidos lo constituye el *termómetro metálico*. Está formado por una lámina bimetalica de materiales de diferentes coeficientes de dilatación lineal que se consigue soldando o remachando dos láminas de metales tales como hierro y cobre, donde el cobre es más dilatante. Si esta lámina bimetalica se calienta o se enfría alargándose o acortándose más uno de los metales, la lámina se encorva. La lámina bimetalica tiene muchas aplicaciones; tal que si se añade una aguja indicadora al sistema, de modo que pueda moverse sobre una escala graduada y calibrada con la ayuda otro termómetro de referencia, se tiene un termómetro metálico. Otra aplicación es el termostato o aparato para mantener constante la temperatura de un recinto.

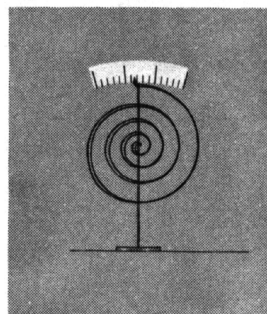
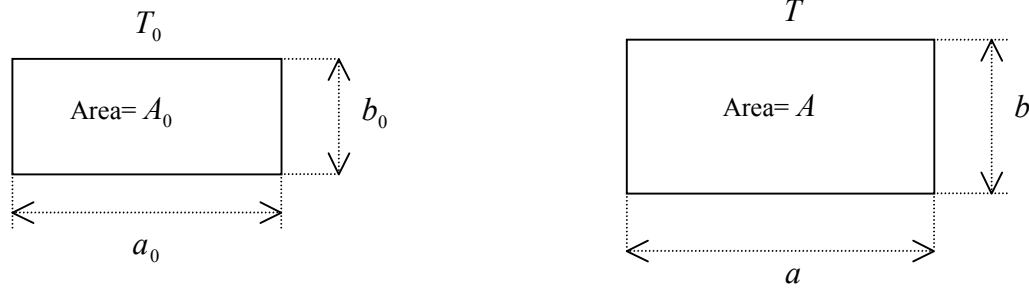


Fig.: Termómetro bimetalico: La espira, fija en el interior, tiende a desenrollarse si la temperatura sube y viceversa.

Dilatación superficial y volumétrica:

Considerando una placa rectangular de lados a_0 y b_0 a la temperatura T_0 , sus lados se incrementaran a los valores a y b , de acuerdo a la ecuación (7.3) cuando su temperatura se eleva al valor T .



Como $a = a_0(1 + \alpha\Delta T)$, $b = b_0(1 + \alpha\Delta T)$, y las áreas a las temperaturas T_0 y T son $A_0 = a_0 \cdot b_0$ y $A = a \cdot b$, respectivamente:

$$A = a \cdot b = a_0(1 + \alpha\Delta T) \cdot b_0(1 + \alpha\Delta T) = A_0(1 + 2\alpha\Delta T + (\alpha \cdot \Delta T)^2).$$

De la expresión anterior para un rango de temperatura no muy alto, entre 0 [°] a 100 [°C], el término $(\alpha\Delta T)^2$ puede ser despreciado frente a 1 y $(2\alpha\Delta T)$. De este modo, la dilatación superficial puede ser escrita como:

$$A = A_0(1 + \beta \cdot \Delta T), \quad (7.4)$$

donde $\beta = 2\alpha$, es denominado coeficiente de dilatación superficial.

Para el caso de volúmenes, podemos considerar un cuerpo con la forma de una caja de lados a_0 , b_0 y c_0 a la temperatura T_0 , y de lados a , b , c a la temperatura T . Puesto que el volumen inicial será $V_0 = a_0 \cdot b_0 \cdot c_0$, y el final $V = a \cdot b \cdot c$, por extensión de lo anterior, para un rango de variación de temperatura no muy grande encontramos:

$$V = V_0(1 + \gamma \cdot \Delta T), \quad (7.5)$$

donde $\gamma = 3\alpha$, es denominado coeficiente de dilatación volumétrica.

Calor y calor específico:

La cantidad de calor se mide de acuerdo al calor necesario para producir algún cambio en alguna sustancia elegida como patrón. Hay dos unidades de calor que se usan comúnmente, la caloría $[cal]$ y la unidad térmica británica $[Btu]$.

La sustancia patrón escogida es el agua, tal que una caloría se define como la cantidad de calor que hay que entregar a $1[gr]$ de agua para elevar su temperatura de $14,5$ a $15,5[^\circ C]$.

El $[Btu]$ se define como la cantidad de calor que se necesita para elevar la temperatura de $1[lb]$ de agua de $63 [^\circ F]$ a $64 [^\circ F]$. Si representamos la cantidad de calor con la letra Q , las unidades anteriores están relacionadas como:

$$1[Btu] = 212[cal]$$

Supongamos que se calienta con la misma llama una masa dada, $1 [kg]$ de una sustancia, por ejemplo agua, durante tiempos medidos. En un minuto, por ejemplo, la temperatura sube de 20 a $30 [^\circ C]$, en dos minutos llega a $40 [^\circ C]$, en tres a $50 [^\circ C]$, etc., esto es, en cada minuto la temperatura sube $10 [^\circ C]$. Como es la misma llama, el calor Q suministrado por ella, será $2Q$ a los dos minutos, $3Q$ a los tres minutos, etc. En resumen, si no hay cambio de estado (ley del calentamiento):

El calor suministrado a la unidad de masa de un cuerpo homogéneo, es directamente proporcional a la elevación de temperatura.

Llamando Q al calor suministrado, m a la masa del cuerpo, T_0 la temperatura inicial del cuerpo y T la temperatura final, lo anterior se puede anotar como:

$$\frac{Q}{m} = c \cdot (T - T_0),$$

o bien

$$Q = m \cdot c \cdot (T - T_0) \quad (7.6)$$

c es la constante de proporcionalidad, denominada calor específico. De la misma expresión anterior:

$$c = \frac{Q}{m \cdot (T - T_0)} \quad (7.7)$$

El calor específico de una sustancia es el calor que se debe suministrar a la unidad de masa, para que su temperatura se eleve en un grado. Habitualmente las unidades de c son: $[cal/gr \cdot ^\circ C]$. El calor específico es diferente para cada sustancia y estrictamente hablando no es una constante. Esta depende de la localización del intervalo de temperaturas tratadas. Por consiguiente, las ecuaciones previas considera solamente los valores medios para esta cantidad en el intervalo de temperaturas de ΔT . Note que para el caso del agua, de acuerdo a la definición de caloría, $c_{AGUA} = 1[cal/gr \cdot ^\circ C]$.

La definición de caloría tiene su origen en la época en la que la teoría del calórico estaba en plena vigencia. Una vez identificado el calor como una forma de energía y no como un fluido singular, la

distinción entre unidades de calor y unidades de energía perdió significado. Así, la unidad de calor en el SI coincide con la de energía y es el joule (J), habiendo quedado la caloría reducida a una unidad práctica que se ha mantenido por razones históricas, pero que va siendo progresivamente desplazada por el joule. Fue precisamente Joule quién por primera vez midió cuidadosamente el equivalente de energía mecánica a energía calorífica, este es el número de [J] equivalentes a 1 [cal], encontrando:

$$1[cal] = 4,186[J] \quad (7.8)$$

Esto es, cuándo se convierten 4,186[J] de energía mecánica en calor, se eleva 1 [°C] la temperatura de 1 [gr] de agua. Por consiguiente, la energía de cualquier índole ya sea esta potencial gravitatoria, potencial elástica, cinética o alguna otra, puede ser expresada en unidades de [cal] lo mismo que en unidades de [J].

Intercambio de calor, mezclas:

Cuando dos cuerpos, 1 y 2, están aislados de los demás y están a diferentes temperaturas, el calor perdido ($-Q_2$) por el mas caliente, es igual al calor ganado ($+Q_1$) por el más frío. O sea

$$Q_1 = -Q_2, \quad (7.9)$$

o también:

$$Q_1 + Q_2 = 0.$$

Generalizando, se tiene la ley de conservación de la energía para el calor:

En un sistema cerrado, la suma algebraica de las cantidades de calor intercambiadas entre los cuerpos que forman un sistema es igual a cero.

Recurriendo a la ecuación calorimétrica (7.6), la igualdad (7.9) puede escribirse en la forma:

$$m_1 \cdot c_1 \cdot (T_e - T_1) = -m_2 \cdot c_2 \cdot (T_e - T_2), \quad (7.10)$$

donde, al igual que en (7.9), el subíndice 1 hace referencia al cuerpo frío y el subíndice 2 al caliente. La temperatura T_e en el equilibrio será superior a T_1 e inferior a T_2 .

La anterior ecuación indica que si se conocen los valores del calor específico, midiendo temperaturas y masas, es posible determinar cantidades de calor. El aparato que se utiliza para ello se denomina *calorímetro*. Un calorímetro es un sistema formado por dos vasos de paredes plateadas, separados por una capa de aire. El vaso mayor lleva una tapa de madera con dos perforaciones: una para insertar un termómetro y otra para dejar pasar un agitador. El aire y la madera son malos conductores del calor (buenos aislantes), mientras que la radiación es reflejada por las paredes especulares de los dos recipientes. Así queda térmicamente aislado el vaso interior y aquello que en él se coloque. Este aparato es muy utilizado en el cálculo de calores específicos de algunos materiales. El material a cierta temperatura es introducido al calorímetro el cual contiene un líquido calorimétrico, que es generalmente agua.