



Unidad Orientativa

(Instrumentación)

1

“Teoría Temperatura”

(1era Parte)



La **temperatura** es una magnitud referida a las nociones comunes de calor o frío. Por lo general, un objeto más "caliente" tendrá una temperatura mayor. Físicamente es una magnitud escalar relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico. Más específicamente, está relacionada directamente con la parte de la energía interna conocida como "energía sensible", que es la energía asociada a los movimientos de las partículas del sistema, sea en un sentido traslacional, rotacional, o en forma de vibraciones. A medida que es mayor la energía sensible de un sistema se observa que esta más "caliente" es decir, que su temperatura es mayor.

En el caso de un sólido, los movimientos en cuestión resultan ser las vibraciones de las partículas en sus sitios dentro del sólido. En el caso de un gas ideal monoatómico se trata de los movimientos traslacionales de sus partículas (para los gases multiatómicos los movimientos rotacional y vibracional deben tomarse en cuenta también).

El desarrollo de técnicas para la medición de la temperatura ha pasado por un largo proceso histórico, ya que es necesario darle un valor numérico a una idea intuitiva como es lo frío o lo caliente.

Multitud de propiedades fisicoquímicas de los materiales o las sustancias varían en función de la temperatura a la que se encuentren, como por ejemplo su estado (sólido, líquido, gaseoso, plasma...), su volumen, la solubilidad, la presión de vapor, su color o la conductividad eléctrica. Así mismo es uno de los factores que influyen en la velocidad a la que tienen lugar las reacciones químicas.

La temperatura se mide con termómetros, los cuales pueden ser calibrados de acuerdo a una multitud de escalas que dan lugar a las unidades de medición de la temperatura. En el Sistema Internacional de Unidades, la unidad de temperatura es el kelvin. Sin embargo, fuera del ámbito científico el uso de otras escalas de temperatura es común el uso de la escala Celsius (antes llamada centígrada) y en los países anglosajones, la escala Fahrenheit. También existe la escala Rankine ($^{\circ}\text{R}$) que establece su punto de referencia en el mismo punto de la escala Kelvin.

Nociones generales

La temperatura es una propiedad física que se refiere a las nociones comunes de frío o calor, sin embargo su significado formal en termodinámica es más complejo, a menudo el calor o el frío percibido por las personas tiene más que ver con la sensación térmica (ver más abajo), que con la temperatura real. Fundamentalmente, la temperatura es una propiedad que poseen los sistemas físicos a nivel macroscópico, la cual tiene una causa a nivel microscópico, que es la energía promedio por partícula.

Al contrario de otras cantidades termodinámicas como el calor o la entropía, cuyas definiciones microscópicas son válidas muy lejos del equilibrio térmico, la temperatura sólo puede ser medida en el equilibrio, precisamente porque se define como un promedio.

La temperatura está íntimamente relacionada con la energía interna y con la entalpía de un sistema: a mayor temperatura mayores serán la energía interna y la entalpía del sistema.

La temperatura es una propiedad intensiva, es decir que no depende del tamaño del sistema, sino que es una propiedad que le es inherente y no depende ni de la cantidad de sustancia ni del material del que este compuesto.

Ley cero de la Termodinámica

Un termómetro debe alcanzar el equilibrio térmico antes de que su medición sea correcta.

Antes de dar una definición formal de temperatura, es necesario entender el concepto de equilibrio térmico. Si dos partes de un sistema entran en contacto térmico es probable que ocurran cambios en las propiedades de ambas. Estos cambios se deben a la transferencia de calor entre las partes. Para que un sistema esté en equilibrio térmico debe llegar al punto en que ya no hay intercambio de calor entre sus partes, además ninguna de las propiedades que dependen de la temperatura debe variar.

Una definición de temperatura se puede obtener de la Ley cero de la termodinámica, que establece que si dos sistemas A y B están en equilibrio térmico, con un tercer sistema C, entonces los sistemas A y B estarán en equilibrio térmico entre sí. Este es un hecho empírico más que un resultado teórico. Ya que tanto los sistemas A, B, y C están todos en equilibrio térmico, es razonable decir que comparten un valor común de alguna propiedad física. Llamamos a esta propiedad temperatura.

Sin embargo, para que esta definición sea útil es necesario desarrollar un instrumento capaz de dar un significado cuantitativo a la noción cualitativa de esa propiedad que presuponemos comparten los sistemas A y B. A lo largo de

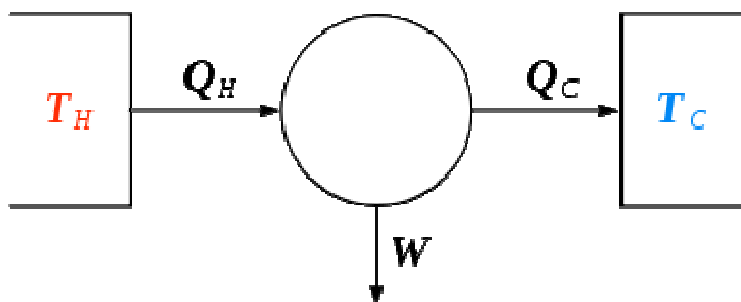
la historia se han hecho numerosos intentos, sin embargo en la actualidad predominan el sistema inventado por Anders Celsius en 1742 y el inventado por William Thomson (mejor conocido como lord Kelvin) en 1848.

Segunda ley de la Termodinámica

También es posible definir la temperatura en términos de la segunda ley de la termodinámica, la cual dice que la entropía de todos los sistemas, o bien permanece igual o bien aumenta con el tiempo, esto se aplica al Universo entero como sistema termodinámico. La entropía es una medida del desorden que hay en un sistema. Este concepto puede ser entendido en términos estadísticos, considere una serie de tiros de monedas. Un sistema perfectamente ordenado para la serie, sería aquel en que solo cae cara o solo cae cruz. Sin embargo, existen múltiples combinaciones por las cuales el resultado es un desorden en el sistema, es decir que haya una fracción de caras y otra de cruces. Un sistema desordenado podría ser aquel en el que hay 90% de caras y 10% de cruces, o 60% de caras y 40% de cruces. Sin embargo es claro que a medida que se hacen más tiros, el número de combinaciones posibles por las cuales el sistema se desordena es mayor; en otras palabras el sistema evoluciona naturalmente hacia un estado de desorden máximo es decir 50% caras 50% cruces de tal manera que cualquier variación fuera de ese estado es altamente improbable.

3

Para dar la definición de temperatura en base a la segunda ley, habrá que introducir el concepto de máquina térmica la cual es cualquier dispositivo capaz de transformar calor en trabajo mecánico. En particular interesa conocer el planteamiento teórico de la máquina de Carnot, que es una máquina térmica de construcción teórica, que establece los límites teóricos para la eficiencia de cualquier máquina térmica real.



Aquí se muestra la máquina térmica descrita por Carnot, el calor entra al sistema a través de una temperatura inicial (aquí se muestra como T_H) y fluye a través del mismo obligando al sistema a ejercer un trabajo sobre sus alrededores, y luego pasa al medio frío, el cual tiene una temperatura final (T_C).

En una máquina térmica cualquiera, el trabajo que esta realiza corresponde a la diferencia entre el calor que se le suministra y el calor que sale de ella. Por lo tanto, la eficiencia es el trabajo que realiza la máquina dividido entre el calor que se le suministra:

$$\eta = \frac{W_{ci}}{Q_i} = \frac{Q_i - Q_f}{Q_i} = 1 - \frac{Q_f}{Q_i} \quad (1)$$

Donde W_{ci} es el trabajo hecho por la máquina en cada ciclo. Se ve que la eficiencia depende sólo de Q_i y de Q_f . Ya que Q_i y Q_f corresponden al calor transferido a las temperaturas T_i y T_f , es razonable asumir que ambas son funciones de la temperatura:

$$\frac{q_C}{q_H} = \frac{f(T_f)}{f(T_i)} = g(T_i, T_f) \quad (2)$$

Sin embargo, es posible utilizar a conveniencia, una escala de temperatura tal que

$$\frac{Q_f}{Q_i} = \frac{T_f}{T_i} \quad (3)$$

Sustituyendo la ecuación (3) en la (1) relaciona la eficiencia de la máquina con la temperatura:

$$\eta = 1 - \frac{Q_f}{q_i} = 1 - \frac{T_f}{T_i} \quad (4)$$

Hay que notar que para $T_f = 0$ K la eficiencia se hace del 100%, temperaturas inferiores producen una eficiencia aún mayor que 100%. Ya que la primera ley de la termodinámica prohíbe que la eficiencia sea mayor que el 100%, esto implica que la mínima temperatura que se puede obtener en un sistema microscópico es de 0 K. Reordenando la ecuación (4) se obtiene:

$$\frac{Q_i}{T_i} - \frac{Q_f}{T_f} = 0 \quad (5)$$

Aquí el signo negativo indica la salida de calor del sistema. Esta relación sugiere la existencia de una función de estado S definida por:

$$dS = \frac{dQ_{rev}}{T} \quad (6)$$

Donde el subíndice indica un proceso reversible. El cambio de esta función de estado en cualquier ciclo es cero, tal como es necesario para cualquier función de estado. Esta función corresponde a la entropía del sistema, que fue descrita anteriormente. Reordenando la ecuación siguiente para obtener una definición de temperatura en términos de la entropía y el calor:

$$T = \frac{dQ_{rev}}{dS} \quad (7)$$

Para un sistema en que la entropía sea una función de su energía interna E , su temperatura esta dada por:

$$\frac{1}{T} = \frac{dS}{dE} \quad (8)$$

Esto es, el recíproco de la temperatura del sistema es la razón de cambio de su entropía con respecto a su energía.

Unidades de temperatura

Se comparan las escalas Celsius y Kelvin mostrando los puntos de referencia anteriores a 1954 y los posteriores para mostrar como ambas convenciones coinciden. De color **negro** aparecen el punto triple del agua (0.01 °C, 273.16 K) y el cero absoluto (-273.15 °C, 0 K). De color **gris** los puntos de congelamiento (0.00 °C, 273.15 K) y ebullición del agua (100 °C, 373.15 K).

Las escalas de medición de la temperatura se dividen fundamentalmente en dos tipos, las relativas y las absolutas. Ya que los valores que puede adoptar la temperatura de los sistemas, aún que no tienen un máximo, sí tienen un

nivel mínimo, el cero absoluto. Mientras que las escalas absolutas se basan en el cero absoluto, las relativas tienen otras formas de definirse.

Relativas

Unidades derivadas del SI

- Grado Celsius ($^{\circ}\text{C}$). Para establecer una base de medida de la temperatura Anders Celsius utilizó (en 1742) los puntos de fusión y ebullición del agua. Se considera que una mezcla de hielo y agua que se encuentra en equilibrio con aire saturado a 1 atm está en el punto de fusión. Una mezcla de agua y vapor de agua (sin aire) en equilibrio a 1 atm de presión se considera que está en el punto de ebullición. Celsius dividió el intervalo de temperatura que existe entre éstos dos puntos en 100 partes iguales a las que llamó grados centígrados $^{\circ}\text{C}$. Sin embargo en 1948 fueron renombrados grados Celsius en su honor, así mismo se comenzó a utilizar la letra mayúscula para denominarlos.

En 1954 la escala Celsius fue redefinida en la Décima Conferencia de Pesos y Medidas en términos de un solo punto fijo y de la temperatura absoluta del cero absoluto. El punto escogido fue el punto triple del agua que es el estado en el que las tres fases del agua coexisten en equilibrio, al cual se le asignó un valor de $0,01^{\circ}\text{C}$. La magnitud del nuevo grado Celsius se define a partir del cero absoluto como la fracción $1/273,16$ del intervalo de temperatura entre el punto triple del agua y el cero absoluto. Como en la nueva escala los puntos de fusión y ebullición del agua son $0,00^{\circ}\text{C}$ y $100,00^{\circ}\text{C}$ respectivamente, resulta idéntica a la escala con la definición anterior con la ventaja de tener una definición termodinámica.

- Grado Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$). Toma divisiones entre los puntos de congelación y evaporación de disoluciones de cloruro amónico. Es una unidad típicamente usada en los países anglosajones.
- Grado Réaumur ($^{\circ}\text{Ré}$, $^{\circ}\text{Re}$, $^{\circ}\text{R}$). Usada para procesos industriales específicos, como el almíbar.
- Grado Rømer o Roemer. En desuso.
- Grado Newton ($^{\circ}\text{N}$). En desuso.
- Grado Leiden. Usada para calibrar indirectamente bajas temperaturas. En desuso.
- Grado Delisle. En desuso.

Absolutas

Las escalas que asignan los valores de la temperatura en dos puntos diferentes se conocen como *escalas a dos puntos*. Sin embargo en el estudio de la termodinámica es necesario tener una escala de medición que no dependa de las propiedades de las sustancias. Las escalas de éste tipo se conocen como escalas absolutas o escalas de temperatura termodinámicas.

Sistema Internacional de Unidades (SI)

- Kelvin (K) El Kelvin es la unidad de medida del SI, y siendo la escala Kelvin absoluta parte del cero absoluto y define la magnitud de sus unidades de tal forma que el punto triple del agua este exactamente a $273,16\text{ K}$.

Sistema Anglosajón de Unidades:

- Grado Rankine ($^{\circ}\text{R}$ o $^{\circ}\text{Ra}$). Escala con intervalos de grado equivalentes a la escala fahrenheit. Con el origen en $-459,67^{\circ}\text{F}$ (aproximadamente)

Conversión de temperaturas

Las siguientes fórmulas asocian con precisión las diferentes escalas de temperatura:

	Kelvin	Grado Celsius	Grado Fahrenheit	Grado Rankine	Grado Réaumur	Grado Rømer	Grado Newton	Grado Delisle
Kelvin	$K = K$	$K = C + 273.15$	$K = (F + \frac{5}{9} \cdot 459.67)$	$K = Ra \cdot \frac{5}{9}$	$K = Re \cdot \frac{5}{4} + 273.13$	$K = (\frac{Ro - 40}{7.5} + 273.13)$	$K = N \cdot \frac{100}{33} + 273.13$	$K = 373.15 - \frac{2}{3} \cdot De$
Grado Celsius	$C = K - 273.15$	$C = C$	$C = (F - 32) \cdot \frac{5}{9}$	$C = (Ra - 491.67) \cdot \frac{5}{9}$	$C = Re \cdot \frac{5}{4}$	$C = (\frac{Ro - 40}{7.5} + 21)$	$C = N \cdot \frac{100}{33}$	$C = 100 - \frac{2}{3} \cdot De$
Grado Fahrenheit	$F = K \cdot \frac{9}{5} - 459.67$	$F = C \cdot \frac{9}{5} + 32$	$F = F$	$F = Ra - 459.67$	$F = Re \cdot \frac{9}{4} + 32$	$F = (\frac{Ro - 24}{7.5} + 32)$	$F = N \cdot \frac{60}{11} + 32$	$F = 121 - \frac{6}{5} \cdot De$
Grado Rankine	$Ra = K \cdot \frac{9}{5}$	$Ra = (C + 273.15) \cdot \frac{9}{5}$	$Ra = F + 459.67$	$Ra = Ra$	$Ra = Re \cdot \frac{9}{4} + 491.67$	$Ra = (\frac{Ro - 24}{7.5} + 491.67)$	$Ra = N \cdot \frac{60}{11} + 491.67$	$Ra = 171.67 - \frac{5}{6} \cdot De$
Grado Réaumur	$Re = (K - 273.15) \cdot \frac{4}{5}$	$Re = C \cdot \frac{4}{5}$	$Re = (F - 32) \cdot \frac{4}{9}$	$Re = (Ra - 491.67) \cdot \frac{4}{9}$	$Re = Re$	$Re = (\frac{Ro - 32}{7.5} + 21)$	$Re = N \cdot \frac{80}{33}$	$Re = 80 - \frac{8}{15} \cdot De$
Grado Rømer	$Ro = (K - 273.15) \cdot \frac{21}{40} + 7.5$	$Ro = C \cdot \frac{21}{40} + 7.5$	$Ro = (F - 32) \cdot \frac{7}{24} + 7.5$	$Ro = (Ra - 491.67) \cdot \frac{7}{24} + 7.5$	$Ro = Re \cdot \frac{21}{32} + 7.5$	$Ro = Ro$	$Ro = N \cdot \frac{35}{22} + 7.5$	$Ro = 60 - \frac{7}{20} \cdot De$
Grado Newton	$N = (K - 273.15) \cdot \frac{33}{100}$	$N = C \cdot \frac{22}{100}$	$N = (F - 32) \cdot \frac{11}{60}$	$N = (Ra - 491.67) \cdot \frac{11}{60}$	$N = Re \cdot \frac{33}{80}$	$N = (\frac{Ro - 22}{7.5} + 35)$	$N = N$	$N = 33 - \frac{11}{50} \cdot De$
Grado Delisle	$De = (373.15 - K) \cdot \frac{3}{2}$	$De = (100 - C) \cdot \frac{5}{6}$	$De = (121 - F) \cdot \frac{3}{2}$	$De = (671.67 - Ra) \cdot \frac{6}{5}$	$De = (80 - Re) \cdot \frac{8}{15}$	$De = (60 - Ro) \cdot \frac{20}{7}$	$De = (33 - N) \cdot \frac{50}{11}$	$De = De$

6

Temperatura en distintos medios

La temperatura en los gases

Para un gas ideal, la teoría cinética de gases utiliza mecánica estadística para relacionar la temperatura con el promedio de la energía total de los átomos en el sistema. Este promedio de la energía es independiente de la masa de las partículas, lo cual podría parecer contra intuitivo para muchos. El promedio de la energía está relacionado exclusivamente con la temperatura del sistema, sin embargo, cada partícula tiene su propia energía la cual puede o no corresponder con el promedio; la distribución de la energía, (y por lo tanto de las velocidades de las partículas) está dada por la distribución de Maxwell-Boltzmann. La energía de los gases ideales monoatómicos se relaciona con su temperatura por medio de la siguiente expresión:

$$\bar{E}_t = \frac{3}{2}nRT, \text{ donde (n= número de moles, R= constante de los gases ideales).}$$



En un gas diatómico, la relación es:

$$\bar{E}_t = \frac{5}{2}nRT$$

El cálculo de la energía cinética de objetos más complicados como las moléculas, es más difícil. Se involucran grados de libertad adicionales los cuales deben ser considerados. La segunda ley de la termodinámica establece sin embargo, que dos sistemas al interactuar el uno con el otro adquirirán la misma energía promedio por partícula, y por lo tanto la misma temperatura.

En una mezcla de partículas de varias masas distintas, las partículas más masivas se moverán más lentamente que las otras, pero aun así tendrán la misma energía promedio. Un átomo de Neón se mueve relativamente más lento que una molécula de hidrógeno que tenga la misma energía cinética. Una manera análoga de entender esto es notar que por ejemplo, las partículas de polvo suspendidas en un flujo de agua se mueven más lentamente que las partículas de agua. Para ver una ilustración visual de éste hecho vea este enlace. La ley que regula la diferencia en las distribuciones de velocidad de las partículas con respecto a su masa es la ley de los gases ideales.

En el caso particular de la atmósfera, los meteorólogos han definido las temperaturas virtual y potencial, para facilitar algunos cálculos.

7

Sensación térmica

Es importante destacar que la Sensación térmica es algo distinto de la temperatura tal como se define en termodinámica. La sensación térmica es el resultado de la forma en que el cuerpo humano percibe la temperatura de los objetos y del entorno, y no un reflejo fiel de la temperatura real de las cosas. La sensación térmica es un poco compleja de medir, por distintos motivos:

- El cuerpo humano mide la temperatura a pesar de que su propia temperatura se mantiene aproximadamente constante (alrededor de 37 °C), por lo tanto no alcanza el equilibrio térmico con el ambiente o con los objetos que toca.
- Los aumentos o incrementos de calor producidos en el cuerpo humano desvían la sensación térmica del valor real de la temperatura, lo cual produce unas sensaciones de temperatura exageradamente alta o baja.

Sin embargo, existen varias formas de simular en un termómetro la sensación térmica tal y como la percibe el cuerpo humano:

Temperatura seca

Se llama **Temperatura seca del aire** de un entorno, o más sencillamente, *temperatura seca*, a la del aire, prescindiendo de la radiación calorífica de los objetos que rodean ese ambiente concreto y de los efectos de la humedad relativa y de los movimientos de aire.

Se puede obtener con el termómetro de mercurio, cuyo bulbo, reflectante y de color blanco brillante, se puede suponer razonablemente que no absorbe radiación.

Temperatura radiante

La **temperatura radiante** tiene en cuenta el calor emitido por radiación de los elementos del entorno.

Se toma con un termómetro de bulbo, que tiene el depósito de mercurio encerrado en una esfera o *bulbo* metálico de color negro, para asemejarlo lo más posible a un cuerpo negro y absorba la máxima radiación. Para anular en lo posible el efecto de la temperatura del aire, el bulbo negro se aísla mediante otro bulbo en el que se ha hecho al vacío.

Las medidas se pueden tomar bajo el sol o a la sombra. En el primer caso tendrá en cuenta la radiación solar y dará una temperatura bastante más elevada.

También sirve para dar una idea de la sensación térmica.

La temperatura de bulbo negro hace una función parecida, dando la combinación de la temperatura radiante y la ambiental

Temperatura húmeda

Temperatura de bulbo húmedo o *Temperatura húmeda* es la temperatura que da un termómetro a la sombra con el bulbo envuelto en una mecha de algodón húmedo bajo una corriente de aire.

La corriente de aire se produce mediante un pequeño ventilador o poniendo el termómetro en un molinete y haciéndolo girar.

Al evaporarse el agua, absorbe calor, rebajando la temperatura, efecto que reflejará el termómetro. Cuanto menor sea la humedad relativa ambiente, más rápidamente se evapora el agua que empapa el paño.

Se utiliza para dar una idea de la sensación térmica o en los psicrómetros para calcular la humedad relativa.

Coeficiente de dilatación térmica

Durante una transferencia de calor, la energía que está almacenada en los enlaces intermoleculares entre 2 átomos cambia. Cuando la energía almacenada aumenta, también lo hace la longitud de estos enlaces.

Así, los sólidos normalmente* se expanden al calentarse y se contraen al enfriarse; este comportamiento de respuesta ante la temperatura se expresa mediante el coeficiente de dilatación térmica (unidades: °C⁻¹):

$$\alpha = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)$$

- esto no ocurre para todos los sólidos: el ejemplo más típico que no lo cumple es el hielo.

Para sólidos, el tipo de coeficiente de dilatación más comúnmente usado es el coeficiente de dilatación lineal α_L . Para una dimensión lineal cualquiera, se puede medir experimentalmente comparando el valor de dicha magnitud antes y después de cierto cambio de temperatura, como:

$$\alpha_L \approx \frac{1}{L} \frac{\Delta L}{\Delta T} = \frac{d \ln L}{dT}$$

Puede ser usada para abreviar este coeficiente, tanto la letra griega alfa α como la letra lambda λ .

En gases y líquidos es más común usar el coeficiente de dilatación volumétrico α_V , que viene dado por la expresión:

$$\alpha_V \approx \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta T} = \frac{d \ln V}{dT}$$

Para sólidos, también puede medirse la dilatación térmica, aunque resulta menos importante en la mayoría de aplicaciones técnicas. Para la mayoría de sólidos en las situaciones prácticas de interés, el coeficiente de dilatación volumétrico resulta ser más o menos el triple del coeficiente de dilatación lineal:

$$\alpha_{V \text{ sólidos}} \approx 3\alpha_L$$