

## La Nueva Definición para la Unidad de Temperatura

La unidad de temperatura, el kelvin, está definido actualmente en términos de la realización del "punto triple del agua" en una celda de vidrio sellada (ver la figura 1) . El punto triple del agua es la temperatura a la que el agua líquida, el hielo y el vapor de agua de muy alta pureza coexisten en equilibrio. Sin embargo, el agua en estas celdas puede contener aún muy pequeñas impurezas químicas que pueden desplazar muy ligeramente la temperatura del punto triple a valores levemente inexactos. Las mediciones de temperaturas más altas o más bajas que el punto triple de agua son intrínsecamente ligeramente menos precisas.



Fig. 1 Celda del Punto Triple del Agua

### El kelvin [1]

La temperatura es una de las magnitudes más importantes y frecuentes en la vida humana. Durante siglos, hemos mejorado continuamente los sistemas, las tecnologías, los métodos y las unidades utilizadas para cuantificar y expresar la temperatura. Ahora la próxima etapa de ese proceso está a punto de tener lugar, cuando el kelvin (símbolo: K) -la unidad base de la temperatura termodinámica en el Sistema Internacional - obtendrá una definición radicalmente nueva.

En la vida cotidiana, la escala de temperatura Kelvin, llamada así por el célebre físico británico Lord Kelvin (1824-1907), rara vez hace acto de presencia. Las personas están más familiarizadas con las escalas Celsius y Fahrenheit, que se utilizan para la mayoría de las mediciones de temperatura prácticas, en la fabricación, preparación de alimentos, pronósticos del tiempo e innumerables otros campos. Históricamente, ambos se basan en incrementos entre puntos definidos, como el punto de fusión del hielo ( $= 0^{\circ}\text{C}$  ; cero grados Celsius ), la temperatura del cuerpo humano o el punto de ebullición del agua ( $\approx 100^{\circ}\text{C}$  ; cien grados Celsius ) .



Fig. 2 Termómetro sencillo midiendo temperatura.

El kelvin tiene exactamente la misma magnitud que un grado Celsius, pero la escala Kelvin es "absoluta" en el sentido de que comienza en el cero absoluto, la temperatura más baja que puede existir en nuestro universo conocido ( $0 \text{ K} = -273,15 \text{ }^\circ\text{C}$ ). La temperatura ambiente es aproximadamente de  $21 \text{ }^\circ\text{C}$  o  $294 \text{ K}$ . La escala Kelvin se usa en la ciencia, particularmente en las ciencias físicas. En el comercio, se encuentra con mayor frecuencia lo que se llama la "temperatura de color" de una lámpara. Una bombilla incandescente antigua, que emite luz amarillenta, tiene una temperatura de color de aproximadamente  $3000 \text{ K}$ . Una lámpara con una temperatura de color de  $5000 \text{ K}$  a  $5600 \text{ K}$ , que contiene más luz azul, está etiquetada como "luz de día" porque la temperatura de la superficie del sol es de aproximadamente  $5800 \text{ K}$ .

Desde 1954, el kelvin se ha definido como "igual a la fracción  $1/273,16$  de la temperatura termodinámica del punto triple del agua", el punto en el que el agua existe simultáneamente como sólido, líquido y vapor en equilibrio térmico. Esa es una referencia común valiosa porque, para el agua de una composición isotópica muy específica a una presión específica, el punto triple siempre se produce exactamente a la misma temperatura:  $273,16 \text{ K}$ .

Sin embargo, extrapolar desde la temperatura del punto triple del agua a temperaturas muy altas o muy bajas es problemático; por lo tanto, según un acuerdo internacional, se especifican otros 21 puntos de definición, que van desde el punto de solidificación del helio de muy alta pureza hasta el punto de solidificación del cobre de muy alta pureza.

### **La constante de Boltzmann [2]**

La constante de Boltzmann ( $k_B$  o solo  $k$ ) relaciona la energía de un objeto individual con su temperatura. Es una herramienta indispensable en termodinámica llamada así en honor del físico austríaco Ludwig Boltzmann (1844-1906), uno de los pioneros en el campo de la mecánica estadística (ver figura 3). Esa ciencia amplía la mecánica clásica newtoniana para describir cómo el comportamiento grupal de grandes colecciones de objetos se deriva de las propiedades microscópicas de cada objeto individual.



Fig. 3 Ludwig Boltzmann

Las leyes de Newton rigen fuerzas, masas y movimientos de objetos o sistemas a medida que interactúan. Se dice que esas interacciones son deterministas: es decir, alguien que tiene un conocimiento completo de las condiciones iniciales de todos los objetos en un sistema puede predecir el futuro del sistema con precisión. Así es como las misiones espaciales pueden colocar los módulos de aterrizaje de los robots en lugares específicos deseados a cientos de millones de kilómetros de la Tierra. El mismo principio permite a los jugadores expertos de billar ganar juegos.

Pero para un gran conjunto de objetos, como los billones de trillones de moléculas calientes que propulsan un pistón en una máquina de vapor (la tecnología dominante de la era de Boltzmann), no hay forma posible de determinar el estado de cada molécula independiente: se están moviendo a diferentes velocidades con un rango de energías diferentes.

Por ejemplo, las moléculas de aire a una temperatura ambiente de 25 °C (300 K) viajan a una velocidad promedio de aproximadamente 500 m/s . Pero algunas se están moviendo a 223 m/s, algunas a 717 m/s, y así sucesivamente, y todos se están moviendo en direcciones diferentes. Cada propiedad individual no puede ser conocida.

No obstante, comprender la física de los motores térmicos y sistemas análogos exige de alguna manera hacer afirmaciones matemáticamente útiles sobre agregaciones de enormes cantidades de objetos. Boltzmann y otros científicos demostraron que se puede hacer en términos de estadísticas y probabilidades, de ahí el término de mecánica estadística. Las propiedades termodinámicas colectivas de los conjuntos derivan de la suma de las energías de cada elemento componente individual e independiente. Curiosamente, los diferentes valores de energía tienen diferentes probabilidades de ocurrir.

Entonces, ¿cómo se puede calcular el contenido de energía promedio de un gas? Su energía es proporcional a su temperatura termodinámica, y la constante de Boltzmann define cuál es esa proporción: La energía total  $E$  en joules está relacionada con la temperatura  $T$  en kelvins de acuerdo con la ecuación  $E = k_B T$  . El joule en el SI es la unidad de energía. Para la escala, 1 joule es la cantidad de energía consumida por una lámpara incandescente de 100 watts en 0,01 segundos, o una bombilla de 1 watt en 1 segundo.

La constante de Boltzmann se expresa así en joules por kelvin. El valor aceptado actual, que combina mediciones de laboratorios de todo el mundo, es de  $1,380\ 648\ 52(79) \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ , donde "(79)"

representa la incertidumbre estándar a la que se refieren los dos últimos dígitos 52. El 2018, está programado como el año para la redefinición del kelvin, la constante de Boltzmann recibirá un valor fijo exacto basado en los mejores datos disponibles en el momento, siempre que: (1) el valor obtenido por al menos un método de medición tenga una incertidumbre mejor que 1 parte en  $10^6$ , que ya se ha logrado; y (2) que al menos un tipo de medición fundamentalmente diferente produzca valores similares con incertidumbres inferiores a 3 partes en  $10^6$ .

Hasta la fecha, los valores más precisos de  $k_B$  se han obtenido mediante termometría acústica, que se basa en el hecho de que la velocidad del sonido en un gas depende directamente de su temperatura. El NIST y otros institutos de metrología también están empleando varios métodos físicos alternativos, como la Johnson Noise Thermometry - JNT, para ver qué tan bien esos valores medidos concuerdan con los datos acústicos. Experimentos recientes de la JNT en el NIST han arrojado un valor para  $k_B$  con una incertidumbre de aproximadamente 5 partes en  $10^6$ . [3]

#### La Nueva Definición para la Unidad de Temperatura [4]

Según el Draft of the Ninth SI Brochure, 10 November 2016 del Bureau International des Poids et Mesures – BIPM. Sèvres Cedex France la nueva definición que se espera aparezca en el 2018 es la siguiente:

**El kelvin, símbolo K, es la unidad de la temperatura termodinámica en el SI. Se define asignando a la constante de Boltzmann  $k$  el valor numérico fijo  $1,380\ 648\ 52 \times 10^{-23}$  cuando se expresa en la unidad  $\text{JK}^{-1}$ , la cual es igual a  $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$ , donde el kilogramo, metro y segundo se definen en términos de  $h$ ,  $c$  y  $\Delta\nu_{Cs}$ .**

Esta definición implica la relación exacta  $k = 1,380\ 648\ 52 \times 10^{-23} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1}$ .

Invirtiendo esta relación se tiene una expresión exacta para el kelvin en términos de las constantes  $k$ ;  $h$ ;  $\Delta\nu_{Cs}$ :

$$1 \text{ K} = (1,380\ 648\ 52 \times 10^{-23} / k) 10^{-23} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2} = 2,266\ 665 \dots \Delta\nu_{Cs} \ h / k$$

El efecto de esta definición es que un kelvin es igual al cambio de temperatura termodinámica que resulta en un cambio de energía térmica  $kT$  de  $1,380\ 648\ 52 \times 10^{-23} \text{ J}$ .

La definición anterior del kelvin se basaba en un valor numérico exacto asignado a la temperatura del punto triple del agua  $T_{\text{TPW}}$ , concretamente 273,16 K. Debido a que la definición actual de kelvin define el valor numérico de  $k$  en lugar de  $T_{\text{TPW}}$ , esta última debe ahora determinarse experimentalmente. En el momento de adoptar la presente definición,  $T_{\text{TPW}}$  era igual a 273,16 K con una incertidumbre estándar relativa de menos de  $1 \times 10^{-6}$  basada en las mejores mediciones de  $k$  realizadas antes de la redefinición.

Debido a la forma en que las escalas de temperatura solían definirse, sigue siendo una práctica común expresar una temperatura termodinámica, símbolo  $T$ , en términos de su diferencia respecto de la temperatura de referencia  $T_0 = 273,15 \text{ K}$ ; cercana al punto del hielo. Esta diferencia se denomina temperatura Celsius, símbolo  $t$ , que se define mediante la ecuación de magnitudes:

$$t = T - T_0.$$

La unidad de la temperatura Celsius es el grado Celsius, símbolo °C , el cual por definición es igual en magnitud al kelvin. Una diferencia o intervalo de temperatura puede expresarse en kelvins o en grados Celsius, siendo el valor numérico de la diferencia de temperatura el mismo en ambos casos. Sin embargo, el valor numérico de una temperatura Celsius expresada en grados Celsius se relaciona con el valor numérico de la temperatura termodinámica expresada en kelvins por la relación:

$$t/^\circ\text{C} = T/\text{K} - 273,15$$

El kelvin y el grado Celsius también son unidades de la Escala Internacional de Temperatura de 1990 (ITS-90) adoptada por el CIPM en 1989 en su Recomendación 5 (CI-1989, PV, 57, 115). Nótese que la ITS-90 define dos magnitudes  $T_{90}$  y  $t_{90}$  que son aproximaciones muy cercanas a las correspondientes temperaturas termodinámicas  $T$  y  $t$ .

Nótese también que con la presente definición, las realizaciones primarias del kelvin pueden establecerse, en principio, en cualquier punto de la escala de temperatura.

## REFERENCIAS

- [1] Redefining the kelvin, <https://www.nist.gov/pml/redefining-kelvin>
- [2] Redefining the kelvin: Boltzmann Constant, <https://www.nist.gov/pml/redefining-kelvin-boltzmann-constant>
- [3] Noise, Temperature, and the New SI, <https://www.nist.gov/news-events/news/2016/11/noise-temperature-and-new-si>
- [4] Draft of the Ninth SI Brochure, 10 November 2016. Bureau International des Poids et Mesures – BIPM. Sèvres Cedex France