

TEMA 1

MEDIDA DE LA TEMPERATURA I. GENERALIDADES

1. Introducción. Notas históricas
2. Concepto de temperatura
3. Concepto de termómetro y escala de temperatura
4. Termómetro de gas
5. Escala Internacional de Temperaturas (ITS 90)
6. Consideraciones prácticas

1. INTRODUCCIÓN. NOTAS HISTÓRICAS

Intuitivamente, si hablamos de TEMPERATURA, pensamos en que es una magnitud que nos da idea de cómo de "caliente" o "frío" está un cuerpo. Hablamos de temperatura cuando nos referimos a la fiebre de un ser humano o de la temperatura de un horno para cocinar o del tiempo que hace.

Por tanto, este concepto está íntimamente relacionado con la existencia humana, con el mundo de cada día. Esto también ocurre con otras magnitudes, como la masa, la longitud o el tiempo. Estas cuatro magnitudes son parte de las siete magnitudes fundamentales del SI. Sin embargo, no existió una buena comprensión de la temperatura hasta el siglo XVIII. Y esto es debido a que el establecimiento preciso del concepto de temperatura y su medida está íntimamente ligado con el desarrollo de la TERMODINÁMICA. De todas formas, a pesar de la existencia de primeras ideas sobre ésta, la cristalización de una apropiada definición y medida costó más de un siglo.

No es tan extraño si pensamos que el concepto intuitivo de temperatura es difícil. Se trata de una magnitud intensiva (es decir, que no depende de la masa), pero que no está directamente relacionada con ninguna magnitud extensiva fácil de percibir (contrariamente al caso de la presión y la fuerza).

Además, tenemos que tener en cuenta que la idea de temperatura nos viene a través del sentido del tacto y ya sabemos que no es muy "fiable".

Ej.- Todos hemos hecho la clásica experiencia de poner una mano en agua fría y otra en agua caliente. Si después ponemos las dos manos en agua tibia las sensaciones que recibimos son diferentes.

También, si tocamos un trozo de metal y otro de madera que nos encontremos juntos (y por tanto a la misma temperatura), no sentimos la misma sensación de frío y caliente.

Todo esto está relacionado con la manera de percibir del cuerpo humano y nos demuestra que el tacto no es un buen termómetro.

Por lo tanto, lo primero que tenemos que hacer es definir exactamente la magnitud temperatura, lo cual no da un punto de partida para medirla. Después necesitaremos aparatos que lo hagan, así como escalas y unidades.

En la vida cotidiana conocemos diferentes escalas, principalmente la Celsius y la Fahrenheit (*arbitrariedad*). Respecto a los aparatos, todos estamos familiarizados con los termómetros de mercurio y de alcohol. Sabemos que la longitud de la columna cambia con la temperatura y las relacionamos.

Por tanto, cualquier magnitud que varíe con la temperatura podría servir en principio para construir un termómetro si conocemos la relación (*más o menos fiabilidad*).

Ej.- Los ruidos que hacen los grillos los producen dándose golpes con las alas. El número de golpes con las alas es proporcional a la temperatura. Puede usarse para estimar la temperatura en el campo.

Existen joyas que cambian de color con la temperatura.

Los principios de la Termometría se establecieron en Europa en el siglo XVII (Esto no ocurrió por ejemplo en China, donde no hubo un desarrollo independiente de la Física).

Como curiosidad, diremos que antes del siglo XVII se sabía bien poco sobre el calor y la temperatura. Muchas opiniones en ese tiempo todavía se referían a los escritos médicos de Galeno (130-200 d. C.). Su termometría clínica estaba basada en las ideas de Aristóteles, que suponía que las personas diferían en sus proporciones de calor, frío, humedad y sequedad. Él proponía un estándar de temperatura "neutra", hecho con cuatro partes de agua hirviendo y cuatro de hielo (correspondiendo a cuatro grados de calor y cuatro de frío). Ahora sabemos que se obtiene una temperatura de 10°C y no sabemos el uso de ese estándar.

Más de un milenio después, otro escritor médico en 1578 (Hasler de Berne) adscribía diferentes grados de calor y frío a los medicamentos. Estableció una escala de temperatura con los cuatro grados de calor y frío de Galeno, con un cero en medio. Además, estableció una escala de latitudes, postulando que los habitantes de las regiones ecuatoriales tenían cuatro grados de calor y los de las regiones polares cuatro de frío. De manera que se podía calcular la cantidad adecuada de medicamento según el lugar donde el paciente vivía.



Respecto al uso de termómetros, la primera referencia nos lleva a Santorio Santorre (italiano) que inventó el termómetro de aire (1612), aunque normalmente se le atribuye a Galileo. Éste se utilizaba para medir temperaturas, tanto en medicina como en meteorología.

El aire en el bulbo B se contrae o se expande en proporción a la temperatura y mueve el menisco O del líquido (agua, alcohol o aceite). D es el depósito para el líquido.

Evidentemente no era muy preciso y además, la medida dependía de los cambios de presión y temperatura del aire local.

A mediados del siglo XVII empezaron a utilizarse los termómetros de vidrio con líquido en lugar de aire, al principio agua y alcohol ("termómetro de espíritu") y después mercurio (pero el mercurio no se consideró satisfactorio y fue desechado). En el desarrollo de estos termómetros fueron muy importantes los avances en el arte de soplar vidrio en la Italia del Norte. Estaban marcados en intervalos iguales de fracciones del volumen del bulbo, por tanto, para obtener medidas comparables, los termómetros debían ser absolutamente iguales. Eran bastante sensibles, pero todavía no existía una escala universal.

En 1661 Robert Hooke modificó el diseño italiano y demostró que partiendo de los mismos principios, se podían construir termómetros comparables sin necesidad de tener las mismas dimensiones. Se trataba de considerar incrementos iguales de volumen partiendo del punto de congelación del agua.

Se introduce por primera vez la idea de un punto fijo, aunque Hooke planteaba dos puntos fijos para la congelación del agua (posiblemente debido a la dilatación anómala del agua a 4°C).

Estableció una escala de -7 grados a 13 grados que se utilizó como estándar en la Royal Society hasta 1709 y con la que se registraron muchos datos meteorológicos.

Hasta ahora tenemos el concepto de escala, pero no existe independencia de la escala con la magnitud termométrica, ya que no existe una apreciación de las diferencias entre las propiedades del fluido. Fue Reaumur (1739) quien indicó que las escalas de alcohol y mercurio son diferentes porque los dos líquidos no se dilatan de la misma forma con la temperatura.

A principios del siglo XVIII tenemos las contribuciones de Fahrenheit y Amontons, los cuales trabajaron en dos aspectos diferentes que ahora distinguimos como termometría primaria y secundaria.

- Fahrenheit:

Era un vidriero holandés. Fue la primera persona que hizo termómetros de mercurio fiables. Además, después de discusiones con el astrónomo Römer estableció una escala con dos puntos fijos y un conveniente número de divisiones. Él aceptó las calibraciones de Römer y estableció como puntos fijos una mezcla de agua con hielo (32 °F) y la temperatura del cuerpo humano sano a 96°F. (Dividió los grados de Römer en 4 para tener más precisión y aceptó como cero la temperatura del día más frío del año - 7 enero de 1709- en Copenhague).

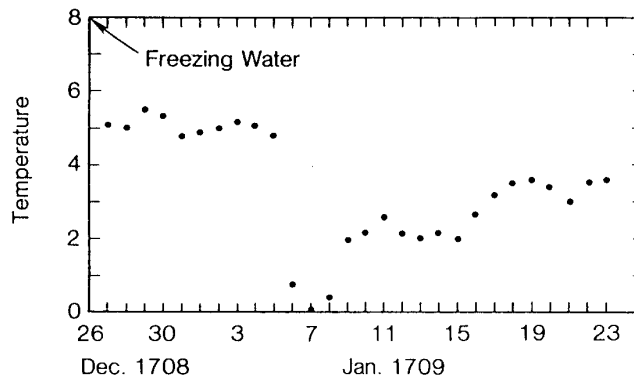


FIGURE 2. Air temperatures in Copenhagen as recorded by Römer during an exceptionally cold winter. These data probably provided part of the basis for the present-day Fahrenheit temperature scale.

- Amontons:

Desarrolló el termómetro de gas a volumen constante. Usó aire como medio termométrico y concluyó que la temperatura más baja posible era la correspondiente a presión cero de gas (primer paso en la comprensión de la temperatura). Indicó que la temperatura era proporcional a la presión y por tanto sólo era necesario un punto fijo para definir la escala. No fue tenido en cuenta porque a efectos prácticos era muy incómodo.

La historia de la termometría ha seguido desde ese momento dos caminos, que llevan a lo que hoy se considera como TERMOMETRÍA PRIMARIA y TERMOMETRÍA SECUNDARIA.

En el primer caso se desarrollan escalas prácticas basadas en puntos fijos arbitrarios y mejores termómetros prácticos. En este sentido, Celsius (1742) estableció una escala en un termómetro de mercurio con dos puntos fijos separados por 100 grados, el punto de hielo y el agua hirviendo. Pero él asignó los 100 grados al agua hirviendo y los 0 grados al vapor. Fue su discípulo, Strömer quien la invirtió.

Además de destacar esto, diremos que se introdujeron los termómetros de resistencia de platino y el termopar de platino/rodio al final del siglo XIX.

La culminación del trabajo en termometría práctica es la adopción de una escala internacional de temperaturas en 1927 (ITS-27).

En la segunda línea, se desarrolla el termómetro de gas y la Termodinámica. Tenemos los trabajos de Boyle, Dalton, Gay-Lussac, Charles, etc. sobre las propiedades de los gases, llegando a la conclusión de que todos los gases tenían casi el mismo coeficiente de dilatación. Esto hizo posible el hablar de una escala independiente de las propiedades del fluido y con un único punto fijo. Todo esto no se aceptó completamente hasta que en 1960 se redefinió el kelvin asignando un único punto fijo.

2. CONCEPTO DE TEMPERATURA

"Temperatura es una magnitud que toma el mismo valor en todos los sistemas que se encuentran en contacto térmico y han llegado al equilibrio térmico"

Esta idea de la existencia de un parámetro que caracteriza el estado interno del sistema proviene del Principio Cero de la Termodinámica, que dice: "Si dos sistemas están separadamente en equilibrio térmico con un tercero, entonces también están en equilibrio entre sí". O lo que es lo mismo: "Si tres o más sistemas están en contacto térmico entre sí y todos juntos en equilibrio, entonces si tomamos dos cualesquiera separadamente, también estarán en equilibrio entre sí".

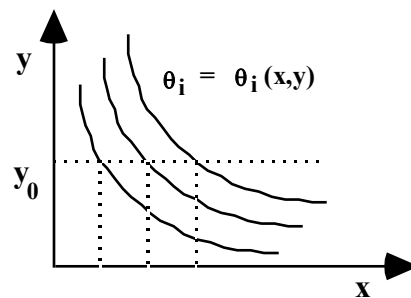
(Esto nos permite imaginar un sistema, llamado TERMÓMETRO, que se lleve al contacto térmico con otros sistemas para descubrir si están o no en diferentes estados térmicos).

Sabemos que el contacto térmico significa que están separados por paredes diatérmicas, es decir, que permiten el paso de energía característica (calor).

Este principio se llama también "segundo postulado de la Termodinámica" (el primero establecía la existencia del equilibrio). Se llamó Principio Cero porque su enunciado fue posterior al del primer principio, pero se consideraba más básico que éste, y por tanto, debía colocarse antes.

También se puede formular el Principio Cero diciendo que "El estado de equilibrio de un sistema queda perfectamente determinado mediante el conocimiento de los parámetros externos y la temperatura".

Partiendo de la idea de que existe un equilibrio térmico mutuo y por tanto una relación funcional entre las variables de estado de los sistemas, $\theta = \theta(x, y)$, se puede justificar matemáticamente la existencia de una función con el mismo valor en todos los sistemas en equilibrio térmico. El lugar geométrico de todos los puntos con el mismo valor de esa función es una isoterma (T constante).



Es interesante recordar que el primer principio nos da una idea de la ley de transformación de la energía

$$dU = \delta W + \delta Q$$

Por convención se establece que el calor se transfiere desde el sistema con temperatura más alta al sistema con temperatura más baja.

Además, el segundo principio permite la definición de otra magnitud muy importante en Termodinámica, la entropía, que está íntimamente ligada con la temperatura, ya que es el factor integrante del calor

$$\delta Q/T = dS \text{ (proceso reversible)}$$

Por otra parte, si analizamos el comportamiento microscópico de los sistemas, vemos que en el caso de un gas ideal clásico, la teoría cinética indica que para una molécula de masa m , el valor medio del cuadrado de la velocidad es

$$\langle v^2 \rangle = 3 k T/m$$

Por lo cual, se podría decir que la temperatura es una medida de la velocidad media de las moléculas de un gas ideal de masa molecular conocida (está relacionada con la energía cinética).

3. CONCEPTO DE TERMÓMETRO Y ESCALA DE TEMPERATURA

Habiendo introducido la temperatura, que es magnitud fundamental, nos interesamos en la forma de medirla.

Para medir la temperatura se utilizan los termómetros (**sistema de referencia**) y como tal se puede utilizar cualquier magnitud macroscópica de un sistema que varíe al cambiar la temperatura. A tal magnitud se le denomina **propiedad o variable termométrica**. Tales pueden ser, por ejemplo, la longitud de un alambre, la resistencia eléctrica de un conductor, la f.e.m. de un par termoeléctrico, el índice de refracción de una sustancia, etc.

En el diagrama anteriormente expuesto, veíamos que las isothermas dependían de los parámetros de estado de cada sistema. Para relacionar una propiedad termométrica con la temperatura, debemos mantener constantes el resto de los parámetros. En el diagrama, si fijamos un valor de y constante, sea y_0 , la temperatura es función solo del otro parámetro x . Así, tendremos que $t = f(x)$. A la función $f(x)$ se le denomina **función termométrica**. La temperatura así definida (ligada a una propiedad termométrica) constituye la llamada temperatura empírica.

En Termometría se suele distinguir entre *termómetros primarios* y *termómetros secundarios*
Termómetros primarios: Son aquéllos en los que la ecuación de estado se puede escribir explícitamente sin introducir constantes dependientes de la temperatura.

Ejemplos: Termómetro de gas, termómetro acústico, termómetro de ruido (eléctrico), termómetro de radiación total.

(En principio no se puede escribir la ecuación de estado y utilizarla como termómetro, confiando en que la temperatura obtenida esté en acuerdo termodinámico y numérico con otro sistema que tenga una ecuación de estado diferente).

La presencia de constantes independientes de la temperatura puede ser resuelta midiendo una temperatura de referencia, T_0 (caso de R en el termómetro de gas).

Termómetros secundarios: Aquéllos que no son primarios.

Ejemplos: Termómetro de resistencia de platino (no podemos utilizarlo como termómetro primario porque no somos capaces de escribir una ecuación explícita de estado).

Para utilizar este tipo de termómetros los tenemos que calibrar con un termómetro primario, directa o indirectamente, a tantas temperaturas como sea necesario para determinar la forma de los términos dependientes de la temperatura desconocidos.

No resulta siempre tan obvio distinguir si un termómetro es primario o secundario.

Ej.- Termómetro de gas: Realmente la ecuación de estado depende de los coeficientes del Virial (semi-primario). Termómetro magnético: Secundario, pero ligado con la termometría primaria.

TERMOMETRÍA PRIMARIA $\Rightarrow$ TEMPERATURA TERMODINÁMICA

(Directamente una variable de la función de estado)

TERMOMETRÍA SECUNDARIA $\Rightarrow$ TEMPERATURA EMPÍRICA

(Ligada a una propiedad termométrica, que varía con la temperatura)

Siguiendo con la idea de medir la temperatura debemos establecer una **escala termométrica** y de entre las muchas formas de la función $t = f(x)$, escogeremos por simplicidad y siguiendo un camino histórico, una relación lineal del tipo $t = ax + b$.

Para poder conocer el valor de la temperatura cuando la magnitud termodinámica toma un valor determinado, es preciso conocer el valor de las constantes a y b . Para ello no queda más remedio que asignar valores determinados a la temperatura a la que se encuentra un sistema en sendos estados de referencia, caracterizados porque son fácilmente reproducibles y porque la

propiedad termodinámica elegida toma en ellos valores sencillos. Pues bien, dichos estados de referencia se denominan **puntos fijos**.

Este tipo de función es la que siguen las escalas Celsius y Fahrenheit. Si se eligen como puntos fijos los puntos del hielo y del vapor, y llamamos x_h y x_v al valor de la variable termométrica en dichos puntos, se tendría:

$$t = \frac{t_v - t_h}{x_v - x_h} x + \frac{x_v t_h - x_h t_v}{x_v - x_h}$$

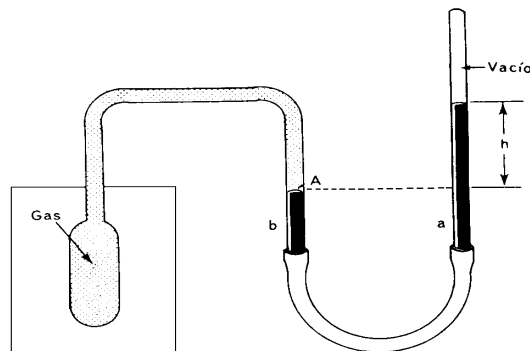
En el caso de una función del tipo $t = a x$, solo sería necesario un punto fijo de referencia para poder determinar a . Éste es el caso de la escala del gas ideal (que coincide con la escala Termodinámica) y el punto fijo utilizado normalmente es el punto triple del agua¹.

4. TERMÓMETRO DE GAS

El termómetro de gas ($V = \text{cte}$) se basa en la proporcionalidad entre la temperatura del gas y la presión que ejerce cuando tenemos un volumen de gas fijo, lo que se cumple en mayor medida cuando tenemos poco gas, es decir, a bajas presiones cuando podemos decir que el gas se acerca a la idealidad.

Dado que la escala del gas ideal se ha visto detalladamente en las clases de Termodinámica, aquí nos centraremos en consideraciones prácticas respecto a la medida experimental (Interesantes los comentarios históricos sobre el tema que aparecen en el artículo de Pellicer y Gilabert- “Revista Española de Física”, repartido en clase).

El dispositivo experimental simplificado sería de la forma:



Moviendo la columna de la derecha de manera que el mercurio alcance siempre el mismo nivel en la columna de la izquierda (punto A), la presión que el gas ejerce será siempre proporcional a la diferencia de alturas del mercurio en ambas ramas (h).

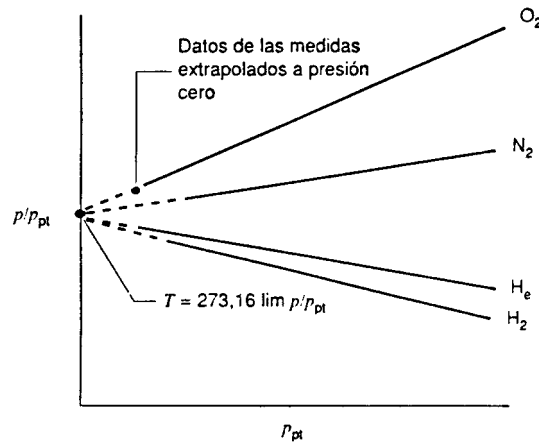
Si el gas fuese ideal, tendríamos que $pV = nRT$, por lo tanto, manteniendo el volumen constante, se cumpliría que

$$T = a p$$

Donde a podría obtenerse a partir de un valor de referencia, como puede ser el punto triple del agua, de manera que $a = T_{pt}/p_{pt}$, siendo T_{pt} la temperatura del gas en equilibrio térmico con la celda del punto triple (273,16 K) y p_{pt} la presión del gas correspondiente a esa temperatura (¡que no es la presión del agua en la celda del punto triple!).

¹ Una forma de obtenerlo es la siguiente: En un vaso de doble pared se introduce entre ambas paredes agua destilada de la máxima pureza y se extrae todo el aire contenido entre ellas sellándolas a continuación. Al cabo de un tiempo se habrá formado vapor que estará en equilibrio con el agua. Con una mezcla frigorífica se consigue que se forma una capa de hielo junto a la pared interior del vaso. Al retirar la mezcla frigorífica y poner el termómetro se funde una delgada capa de hielo junto a la pared y así tenemos un sistema en el que coexisten las tres fases: sólido, líquido y vapor.

Así pues, en el caso de un gas ideal, una sola medida sería suficiente, pero al utilizar el dispositivo con gases reales, se observa que el valor del cociente p/p_{pt} no se mantiene constante al cambiar el tipo de gas, ni al realizar la medidas con distintas cantidades de gas, sino que se obtienen distintas líneas rectas como las que aparecen en la figura siguiente:



La extrapolación de todas estas rectas para presión cero coincide (aproximación de gas ideal), con lo que se considera que (ver ejercicio I.3)

$$T = 273,16 \lim_{p_{pt} \rightarrow 0} \frac{p}{p_{pt}}$$

5. ESCALA INTERNACIONAL DE TEMPERATURAS

La Escala Internacional de Temperaturas de 1990 (<http://www.its-90.com/its-90.html>) fue adoptada por el Comité Internacional de Pesas y Medidas en su reunión de 1989, de acuerdo con la resolución de la Conferencia General de 1987. Esta escala reemplaza la Escala Práctica Internacional de Temperatura de 1968 (edición revisada en 1975) y la Escala Provisional de 1976 entre 0,5 y 30 K.

Unidades de Temperatura

La unidad de la magnitud física fundamental conocida como *temperatura termodinámica*, cuyo símbolo es T , es el **kelvin**, K, definido como la fracción $1/273,16$ de la temperatura termodinámica del punto triple del agua.

Debido a la forma en que se definieron las escalas anteriores, es común expresar la temperatura a partir de su diferencia respecto al punto de hielo, 273,15 K. Una temperatura termodinámica, T , expresada de esta forma se conoce como temperatura Celsius, cuyo símbolo es t , definida por:

$$t (^{\circ}C) = T(K) - 273,15$$

La unidad de la temperatura Celsius es el **grado Celsius**, cuyo símbolo es $^{\circ}C$, el cual tiene el mismo tamaño por definición. Una diferencia de temperatura se puede expresar en kelvins o en grados Celsius.

La Escala Internacional de Temperaturas de 1990 (ITS-90) define tanto las Temperaturas Kelvin Internacionales, T_{90} , como las Temperaturas Celsius Internacionales, t_{90} ².

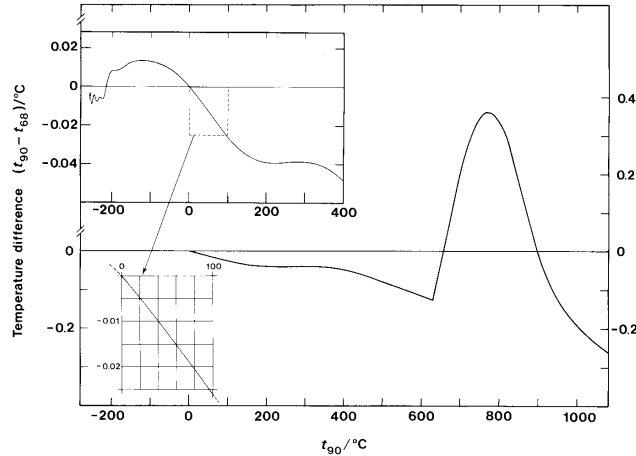
Principios de la ITS

El propósito de la Escala Internacional de Temperaturas es definir procedimientos por los cuales unos determinados termómetros prácticos de la calidad requerida puedan ser calibrados

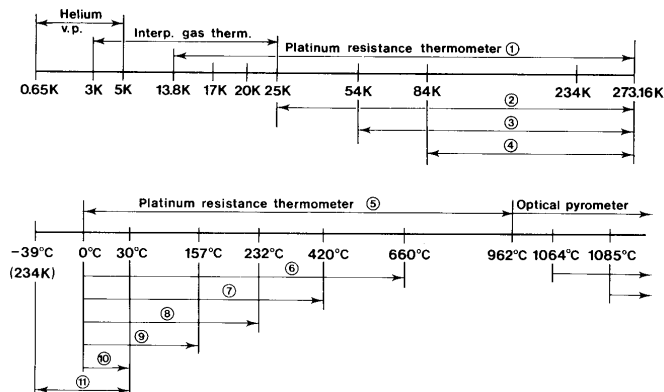
² Las escalas correspondientes a las temperaturas Celsius y Kelvin en el sistema métrico anglosajón son las Fahrenheit y Rankine respectivamente. En ellas entre el punto del hielo y el del vapor hay 180 grados de manera que: $180 R = 100 K \Rightarrow 1R = 5/9 K$. Así, la temperatura del hielo en la escala Rankine será: $T_h = 273,15 K = 273,15 K (9R/5K) = 491,67 R$. Además, se ha de saber que $0^{\circ}C = 32^{\circ}F$.

de tal manera que los valores de la temperatura obtenidos de ellos sean precisos y reproducibles, y a la vez se aproximen a los correspondientes valores termodinámicos tanto como la tecnología existente lo permita.

Existen diferencias numéricas significativas entre los valores de T_{90} y los correspondientes de T_{68} medidos en la Escala Práctica Internacional de 1968 (ITS-68)



La ITS 90 abarca desde 0,65 K hasta la temperatura más alta mensurable a partir de la ley de radiación de Planck usando radiación monocromática. La ITS-90 comprende un número de intervalos y subintervalos a partir de los cuales se define la T_{90} . Algunos de estos intervalos y subintervalos se solapan y donde se produce este solapamiento, existen diferentes definiciones de T_{90} igualmente válidas.



Para medidas de muy alta precisión puede haber errores numéricos detectables entre medidas realizadas a la misma temperatura, pero con diferentes definiciones. Del mismo modo, incluso usando una única definición, a una temperatura entre dos puntos fijos dos instrumentos de interpolación aceptables (ej. termómetros de resistencia) pueden proporcionar diferentes valores numéricos de T_{90} . En todo caso, estas diferencias tienen una importancia práctica despreciable.

Dispositivos estándar e intervalos de medida

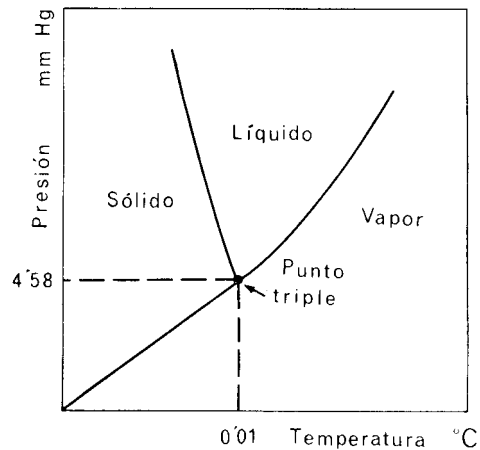
- Entre 0,65 K y 5,0 K, T_{90} se define en términos de las relaciones presión de vapor-temperatura del ^3He y ^4He .
- Entre 3.0 K y el punto triple del neón (24.5561 K) T_{90} se define por medio de un termómetro de gas de helio calibrado a tres temperaturas experimentalmente asequibles a las que se les ha asignado valores numéricos (puntos fijos definidos) y usando procedimientos de interpolación específicos.
- Entre el punto triple del hidrógeno (13.8033 K) y el punto de congelación de la plata (961.78°C) T_{90} se define por medio de termómetros de resistencia de platino calibrados con determinados conjuntos de puntos fijos y utilizando unos procedimientos de interpolación específicos.

- Por encima del punto de congelación de la plata ($961,78^{\circ}\text{C}$), T_{90} se define en función de uno de los puntos fijos adoptados y la ley de radiación de Planck.

Puntos fijos utilizados

Históricamente, en las distintas escalas internacionales aceptadas, se han utilizado distintos puntos de cambio de fase como puntos fijos.

- Puntos triples: Única combinación de presión y temperatura en la cual coexisten las tres fases (sólida, líquida y vapor) de una sustancia pura (Ver diagrama: ejemplo para el agua)



- Puntos de congelación: Temperatura a la cual se empieza a formar el sólido a partir del líquido a 1 atm.
- Puntos de fusión: Temperatura a la cual se funde el sólido a 1 atm.
- Puntos de ebullición: La presión de vapor de una sustancia pura es únicamente función de la temperatura. Se suelen considerar los puntos de ebullición normales, que es la temperatura a la cual la presión de vapor es 1 atm.
- Puntos de transición a superconductor (en la Escala Provisional del 76, para temperaturas muy bajas $< 10\text{ K}$)

Point	NHS ^a	ITS-27	ITS-48(60)	IPTS-68(75)	EPT-76
Au fp ^b	—	1336.15	1336.15	1337.58	—
Ag fp	—	1233.65	1233.95	1235.08	—
S bp ^c	—	717.75	717.75	—	—
Zn fp	—	—	(692.655)	692.73	—
Sn fp	—	—	—	(505.1181)	—
H ₂ O bp	373	373.15	373.15	373.15	—
H ₂ O tp ^d	—	—	(273.16)	273.16	—
H ₂ O fp	273	273.15	273.15	—	—
O ₂ bp ^e	—	90.18	90.18	90.188	—
Ar tp	—	—	—	(83.798)	—
O ₂ tp	—	—	—	54.361	—
Ne bp	—	—	—	27.102	27.102
Ne tp	—	—	—	—	24.5591
H ₂ bp	—	—	—	20.28	20.2734
H ₂ bp ^f	—	—	—	17.042	17.0373
H ₂ tp	—	—	—	13.81	13.8044
Pb st ^g	—	—	—	—	7.1999
⁴ He bp	—	—	—	—	4.2221
In st	—	—	—	—	3.4145
Al st	—	—	—	—	1.1796
Zn st	—	—	—	—	0.851
Cd st	—	—	—	—	0.519

^a NHS = normal hydrogen scale.

^b fp = Freezing point.

^c bp = Boiling point at 101,325 Pa.

^d tp = Triple point.

^e Changed in 1975 to the condensation point.

^f Reduced-pressure boiling point, at $P = 33\,330.6\text{ Pa}$.

^g st = Superconducting transition point.

Dada la dificultad de los puntos de ebullición por su gran sensibilidad a los cambios de presión, en la ITS-90 se han eliminado todos los puntos de ebullición de escalas anteriores, y han sido sustituidos por puntos triples. La lista de puntos fijos se adjuntó en las fotocopias entregadas en clase. Es interesante resaltar que no se han recogido los puntos de transición a superconductor de 1976, y que en líneas generales, se podría decir que por debajo de 0°C se tiene principalmente puntos triples, mientras que por encima de 0°C son puntos de congelación.

Los puntos fijos adoptados son:

ESTADO DE EQUILIBRIO	T ₉₀ /K	t ₉₀ /°C
Punto triple del hidrógeno	13,8033	- 259,3467
Punto de ebullición del hidrógeno a p=33321,3 Pa	17,035	- 256,115
Punto de ebullición del hidrógeno a p=101292 Pa	20,27	- 252,88
Punto triple del neón	24,5561	- 248,5939
Punto triple del oxígeno	54,3584	- 218,7916
Punto triple del argón	83,8058	- 189,3442
Punto triple del mercurio	234,3156	- 38,8344
Punto triple del agua	273,16	0,01
Punto de fusión del galio	302,9146	29,7646
Punto de congelación del indio	429,7485	156,5985
Punto de congelación del estaño	505,078	231,928
Punto de congelación del zinc	692,677	419,527
Punto de congelación del aluminio	933,473	660,323
Punto de congelación de la plata	1234,93	961,78
Punto de congelación del oro	1337,33	1064,18
Punto de congelación del cobre	1357,77	1084,62

7. CONSIDERACIONES PRÁCTICAS

Es interesante tener en cuenta que a efectos prácticos, nos vamos a mover en un intervalo de temperaturas muy reducido, un sólo orden de magnitud, entre 10² K y 10³ K y la escala internacional de temperaturas abarca sólo un orden de magnitud más. La temperatura más baja medida en el laboratorio, en 1998 era de 0,000000002 K. La temperatura tiene una gran importancia en las reacciones químicas y biológicas, y pequeños cambios afectan profundamente a la existencia de la vida en la Tierra. Como curiosidad, la tabla siguiente indica el orden de magnitud de algunas temperaturas con interés físico

Temperatura (K)	Fenómeno físico
10 ³⁹	Universo después del Big Bang
10 ⁸	Máxima temperatura de laboratorio
10 ⁴	Superficie del Sol
10 ²	Agua congela
10 ⁰	Universo hoy
10 ⁻¹	Ebullición del He-3
10 ⁻⁸	Enfriamiento del spin nuclear

Características básicas de los termómetros

La utilidad de cualquier termómetro viene determinada por una serie de características que hay que considerar al escogerlo, como son:

- Debe existir una relación biunívoca entre la variable termométrica medida y el valor asignado de temperatura.

- Pequeñas variaciones de temperatura deben dar lugar a grandes variaciones de la propiedad termométrica. Conseguimos así una elevada sensibilidad para el termómetro.
- Es importante que el termómetro elegido sea adecuado al intervalo de temperaturas que se desea medir (precisión).
- Diferentes termómetros usando la misma magnitud termométrica deben indicar la misma temperatura en los mismos estados.
- Debe ser de tamaño reducido para no producir perturbaciones en el sistema cuya temperatura se desea medir.

Además, se debe considerar:

- La constante de tiempo: nos da idea del tiempo que tarda el sensor en acercarse a la temperatura del sistema cuya temperatura mide.
- La constante de disipación: En termómetros que utilizan la resistencia como variable termométrica, nos permite estimar la temperatura de autocaldeo del sensor por efecto Joule.

La constante de tiempo y el coeficiente de Newton

El proceso de enfriamiento de un cuerpo con el tiempo, τ , desde una temperatura inicial T_0 hasta la temperatura ambiente T_a (si la diferencia de temperaturas no es muy grande) puede representarse por la llamada ley de enfriamiento de Newton:

$$-\frac{\delta Q}{dt} = N S (T - T_a)$$

donde N es el coeficiente de Newton, S la superficie del cuerpo, m su masa y c su calor específico (suponiendo no depende de la temperatura en el intervalo considerado) y T es la temperatura del cuerpo al cabo de un tiempo t de comenzado el enfriamiento..

Considerando que $T_0 < T_a$, entonces $(T - T_a) < 0$ y $\delta Q > 0$, es decir, se absorbe calor del ambiente. Sabemos que este calor, cedido o absorbido por el sensor, se relaciona con su masa y su calor específico de la forma

$$\frac{\delta Q}{dt} = m c \frac{dT}{dt}$$

Por lo tanto

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{NS}{mc} (T - T_a) = -\frac{1}{\tau} (T - T_a) \quad (1)$$

la constante τ recibe el nombre de **constante de tiempo** del cuerpo y depende de su forma, de su tamaño y del material de que esté construido, siendo la dependencia de la forma:

$$\tau = \frac{mc}{NS} \quad (2)$$

Para entender el significado de esta constante de tiempo consideraremos como afecta a la temperatura del sensor en el caso más común y más sencillo, que es que la temperatura a medir, en este caso T_a , sea constante.

En este caso, la ecuación (1) puede resolverse separando variables, de manera que

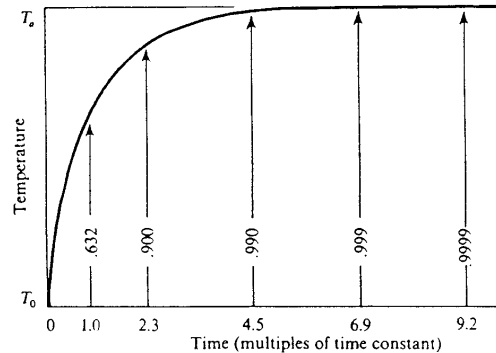
$$\frac{dT}{T - T_a} = -\frac{1}{\tau} dt$$

Integrando entre $t = 0$ y t

$$\ln(T - T_a) - \ln(T_0 - T_a) = -\frac{t}{\tau}$$

$$T = T_a + (T_0 - T_a) \exp(-t / \tau)$$

Tenemos una función exponencial decreciente con una asíntota en T_a , de manera que para tiempo infinito, la temperatura del sensor T tiende a la temperatura T_a . Evidentemente para $t=0$, $T=T_0$ (ver figura).



El significado físico de la constante de tiempo se puede deducir de la siguiente forma: si consideramos que ha transcurrido un tiempo igual al valor de la constante de tiempo, es decir $t = \tau$, la ecuación que nos proporciona la temperatura del cuerpo se transforma en:

$$T - T_a = \frac{1}{e}(T_0 - T_a) \approx \frac{1}{3}(T_0 - T_a)$$

Es decir, cuando ha transcurrido un tiempo igual al valor de la constante de tiempo, la diferencia entre la temperatura del cuerpo y la que pretende alcanzar es igual a la tercera parte de la diferencia inicial de temperaturas. De esta forma, podemos estimar el tiempo que debemos esperar para llegar a una temperatura determinada según la precisión requerida.

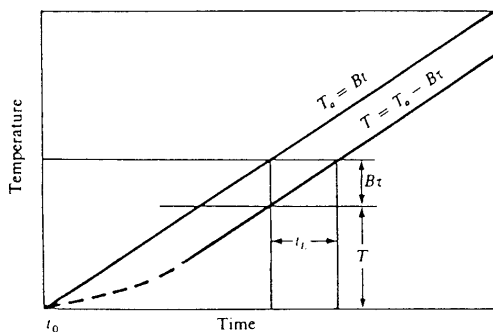
Teniendo en cuenta la expresión (2), deducimos fácilmente que un sensor con una forma tal que presente una gran superficie de contacto con el medio, aproximará su temperatura a la de éste antes que otro que con la misma masa y calor específico presente una superficie menor.

La constante de tiempo puede alterarse fácilmente, por ejemplo recubriendo el sensor con una capa de un material adecuado, de forma que podemos modificar su masa, su calor específico o la superficie según nuestras necesidades.

Es posible que necesitemos medir temperaturas que van variando con el tiempo. En estos casos, la existencia de esa inercia térmica en el sensor afecta profundamente a la medida, ya que ahora no es solo cuestión de esperar más o menos tiempo hasta llegar a la diferencia de temperatura deseada, porque la temperatura va cambiando. A continuación pueden verse dos ejemplos para los casos de una variación lineal y periódica de la temperatura.

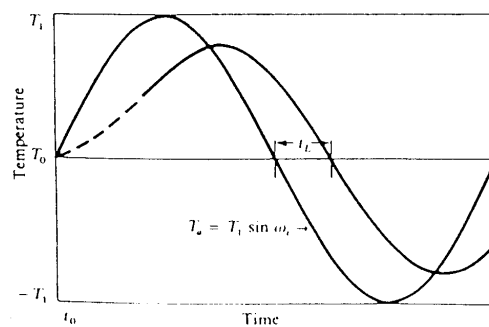
$$T_a = Bt \Rightarrow \frac{dT}{dt} + \frac{T}{\tau} = \frac{Bt}{\tau}$$

$$T - T_a = -B\tau [1 - \exp(-t/\tau)] \xrightarrow{t \gg \tau} T - T_a = -B\tau$$



$$T_a = T_1 \sin \omega t$$

$$\frac{dT}{dt} + \frac{T}{\tau} = \left(\frac{T_1}{\tau}\right) \sin \omega t$$



Al cabo de un tiempo suficientemente largo, se observa que la respuesta del sensor es similar a la de la temperatura que se desea medir, pero con un retraso temporal que depende de esa constante de tiempo.

La constante de disipación

Si escogemos un sensor de resistencia, deberemos medir ésta para determinar la temperatura deseada. Para medir la resistencia de un conductor se hace pasar una corriente eléctrica por él y se mide la diferencia de potencial que presenta en sus extremos. Pero el paso de la corriente eléctrica por el conductor produce en éste un calentamiento por efecto Joule. El coeficiente de disipación o autocalentamiento nos da idea de la influencia de la corriente de medida sobre la propia medida indicándonos la potencia eléctrica necesaria para elevar la temperatura del sensor un grado. Generalmente se mide en mW grado^{-1} . La utilización de este coeficiente nos permite determinar en qué condiciones debemos realizar la medida de la resistencia del sensor para que el efecto de autocaldeo sea despreciable. Pondremos un ejemplo para ilustrar el valor de este dato.

El fabricante de una sonda de resistencia que pensamos utilizar en una experiencia nos indica que su coeficiente de autocaldeo es de 10 mW grado^{-1} . A la temperatura ambiente de 20°C dicha sonda presenta una resistencia de $25 \text{ k}\Omega$. Para medir dicha resistencia hacemos pasar por la sonda una intensidad de corriente de 2 mA . La potencia eléctrica disipada en la resistencia de la sonda será:

$$P = I^2 R \Rightarrow P = (4 \times 10^{-6} \text{ A}^2) (25 \times 10^3 \Omega) = 0,1 \text{ W} = 100 \text{ mW}$$

Si nuestra sonda sufre un calentamiento de un grado con una potencia eléctrica de 10 mW , si le suministramos 100 mW se calentará 10 grados, lo que representa un error del 50% sobre la temperatura que queremos medir. En cambio, si le hubiésemos hecho pasar una intensidad de corriente de $20 \mu\text{A}$, la potencia disipada hubiera sido de $0,01 \text{ mW}$ y el autocalentamiento de $0,001^\circ\text{C}$, completamente despreciable frente a los 20°C que debíamos medir.