

TEMA 2

MEDIDA DE LA TEMPERATURA II. TERMÓMETROS

1. Termómetros de dilatación

- De líquido en vidrio
- Bimetálicos

2. Termómetros de resistencia

- Termómetros metálicos
- Termistores

3. Termopares

4. Pirómetros de radiación

5. Otros termómetros (anexo)

La temperatura interviene en la mayor parte de los fenómenos físicos y por tanto es natural que exista un gran número de dispositivos que puedan usarse para la medida de la misma (<http://www.temperatures.com>). A continuación comentaremos los más comunes comercialmente y que se utilizarán en el laboratorio. Incluiremos también unos breves comentarios sobre los termómetros de radiación por su interés dado que son dispositivos estándar en la ITS (lo cual servirá para repasar algunas nociones sobre radiación térmica, que serán de utilidad en el laboratorio).

TERMÓMETROS DE DILATACIÓN

Podemos considerar tres tipos:

- Termómetros de dilatación de gas:

El sensor es un recipiente lleno de gas. La variación de temperatura produce una variación de la presión del gas (termómetros de gas a volumen constante) o de su volumen (termómetros de gas a presión constante).

- Termómetros de dilatación de líquido en vidrio:

Como ya comentamos son los termómetros más antiguos y los más comunes. Son muy prácticos por su fácil uso ya que una pequeña barra sirve como sensor e indicador visual.

Constan de un bulbo que es el depósito donde está contenido la mayoría del líquido y un tubo de vidrio que incluye un capilar por el que asciende el líquido al dilatarse. Normalmente el volumen del bulbo es 6000 veces mayor que el contenido en la longitud correspondiente a 1°C en el capilar.

El bulbo y el tubo pueden estar hechos del mismo tipo de vidrio o ser diferentes. La capa de vidrio que rodea al bulbo es mucho más fina para facilitar el contacto térmico.

En la actualidad pueden ser usados en un amplio intervalo de temperaturas. El límite inferior viene dado por la congelación de los líquidos y el límite superior por problemas con el vidrio. Usando líquidos orgánicos se puede llegar hasta -200°C (el mercurio solo llega hasta -35°C). El vidrio normal se utiliza hasta 400°C, pero existen tipos especiales de vidrio que permiten medir hasta 600°C.

Además de los componentes universales (bulbo, tubo, líquido, vacío o gas) pueden tener una cámara de expansión (reducir el incremento de presión al ascender el líquido), una escala auxiliar (calibrado en punto de hielo) o una cámara de contracción (figura).

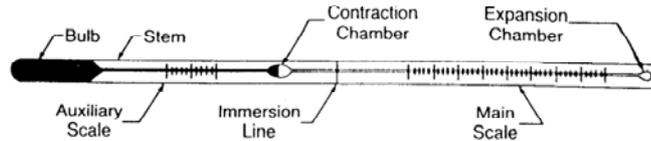


FIGURE 4. A typical liquid-in-glass thermometer of the partial immersion type. Adapted from Wisg.²

La sensibilidad depende del tamaño de las divisiones, y condiciona el intervalo de medida en el que se utiliza el termómetro (problemas de longitud del tubo).

El líquido más usado es el mercurio. Aunque el coeficiente de dilatación térmica es dependiente de la temperatura, la diferencia con el del vidrio, que comprime el líquido, da lugar a una gran linealidad en este tipo de termómetros¹.

- Termómetros de dilatación de sólido:

Se utiliza como variable termométrica la variación de longitud de una lámina metálica o la variación de longitud de dos láminas delgadas de materiales diferentes unidas entre sí. La diferente dilatación de los dos materiales unidos, hace que el conjunto se combe lateralmente y esta desviación se registra con una aguja indicadora calibrada (termómetros bimetalicos – figura-). No son muy precisos, pero son muy resistentes. Se suelen utilizar en termostatos.

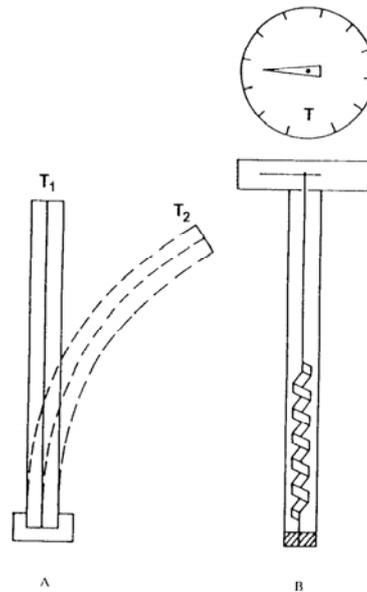


FIGURE 3. Schematic views of bimetallic thermometers. (A) The bonding of two strips with different thermal expansion characteristics produces bending as the temperature changes. (B) Forming the bimetallic strip into a helix provides a temperature-dependent rotation of an indicator needle.

TERMÓMETROS DE RESISTENCIA

Todo conductor eléctrico presenta una resistencia que depende de su temperatura, por tanto, se puede utilizar la resistencia eléctrica como variable termométrica. Hay dos tipos: los termómetros de resistencia metálica y los termistores.

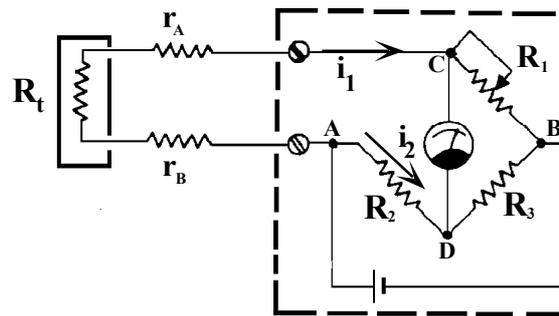
¹ Entre estos termómetros tenemos que destacar los termómetros Beckmann, por su capacidad de adaptación a la medida de la temperatura en intervalos diferentes de temperatura, con gran sensibilidad. Se trata de un termómetro que dispone de dos depósitos de mercurio, uno en la parte superior y otro en la inferior, pudiendo transvasarse mercurio de uno a otro. La capacidad del capilar es la suficiente para medir una diferencia de temperaturas de entre 3 y 5 grados con una sensibilidad de centésimas de grado.

La medida precisa de la temperatura mediante termómetros de resistencia empezó con los trabajos de Callendar y Siemens a finales del siglo XIX con termómetros de platino, calibrados con termómetros de gas.

Los termistores aparecieron comercialmente a finales de la Segunda Guerra Mundial, pero el principio básico es conocido desde 1833, en que Faraday observó el coeficiente negativo del sulfuro de plata. La palabra termistor proviene del inglés *Thermistor*, abreviatura de “Thermally Sensitive Resistor”.

Un termómetro de resistencia, además elemento sensible (resistencia), necesita un sistema de medida de la resistencia y de accesorios para el circuito eléctrico. La resistencia de las sondas se mide con un puente de Wheatstone dispuesto en montajes llamados de dos hilos, de tres hilos o con un circuito potenciométrico entre otros.

El dispositivo que forma el puente de Wheatstone de dos hilos se muestra en la figura adjunta.



Variando la resistencia R_1 hasta que por el galvanómetro no circule corriente, $V_C = V_D$, se establecen las siguientes relaciones:

$$V_A - V_C = i_1 (R_t + r_A + r_B) = V_A - V_D = i_2 R_2$$

$$V_C - V_B = i_1 R_1 = V_D - V_B = i_2 R_3$$

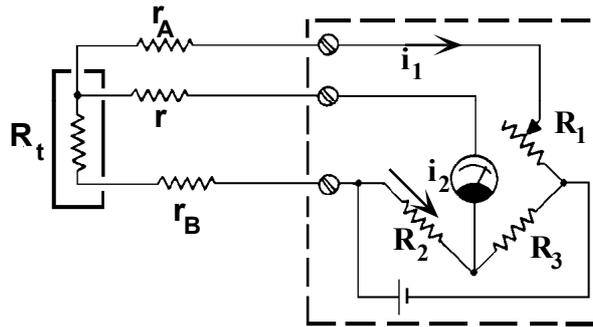
por lo que la resistencia desconocida será:

$$R_t = R_1 \frac{R_2}{R_3} - r_A - r_B$$

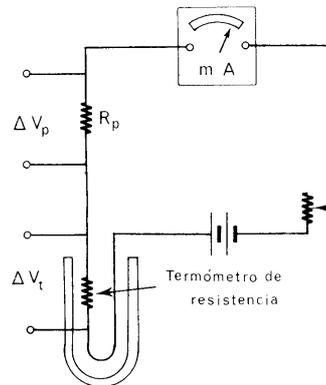
Cuando las resistencias de los cables de conexión de la sonda al instrumento de medida, r_A y r_B , son muy pequeñas en comparación con el valor de la resistencia de la sonda, estas resistencias se desprecian y obtenemos la expresión:

$$R_t = R_1 \frac{R_2}{R_3}$$

El error en la medida proviene fundamentalmente de la longitud de los cables que se utilizan para unir el sensor con el puente de Wheatstone. En un laboratorio este problema no suele ser importante, pero en algunas aplicaciones industriales la distancia entre el punto donde se encuentra el sensor y el puente de Wheatstone puede ser de varios cientos de metros e incluso mayor. Esto representa una resistencia añadida al sensor aunque los cables sean de baja resistencia, es decir de gran grosor, que puede llegar a ser del mismo orden o mayor que la resistencia que presenta éste, por lo que se pueden introducir graves errores en la medida de la temperatura. En estos casos, una de las maneras de eliminar la influencia de los cables de conexión es el montaje de tres hilos del puente de Wheatstone (figura adjunta). En este caso si la resistencia de los cables es r_A y r_B ($r_A \cong r_B$) la resistencia de los cables quedará compensada al estar, en el circuito, a ambos lados del galvanómetro.



Finalmente describiremos otra forma de medir la resistencia de un sensor mediante un circuito potenciométrico.



Se trata de mantener una corriente constante que pase por la resistencia a determinar y medir la diferencia de potencial que se establece entre sus extremos. Para mantener una corriente constante basta intercalar en serie con nuestra sonda una batería, una resistencia variable (reostato) y una resistencia patrón. El reostato puede modificarse de forma que la diferencia de potencial en los extremos de la resistencia patrón sea constante. Como el valor de la resistencia patrón es conocido, el valor de la resistencia de la sonda vendrá dado por la ley de Ohm:

$$I = \frac{\Delta V_p}{R_p} = \frac{\Delta V_t}{R_t} \quad \Rightarrow \quad R_t = R_p \frac{\Delta V_t}{\Delta V_p}$$

Para cualquier sonda de resistencia, sea metálica o de semiconductores, se define un coeficiente de temperatura, α , que nos da idea de la variación de resistencia que experimenta la misma por unidad de resistencia y de temperatura, lo que se relaciona con la sensibilidad del termómetro de resistencia:

$$\alpha = \frac{1}{R} \left(\frac{dR}{dT} \right)$$

Podemos expresar el coeficiente de temperatura de una sonda de resistencia metálica como:

$$\alpha = \frac{1}{R} \left(\frac{dR}{dT} \right) \cong \frac{1}{R_0} \left(\frac{R_t - R_0}{T - T_0} \right)$$

lo que nos lleva a la expresión:

$$\frac{R_T}{R_0} = 1 + \alpha(T - T_0)$$

que relaciona el coeficiente de temperatura, α , con el cociente, $\frac{R_T}{R_0}$, que caracteriza estas sondas en la bibliografía habitual. Cuando mayor es el valor de dicho cociente mayor es la sensibilidad del termómetro.

Termómetros de resistencia metálicos

Se trata de conductores metálicos que cambian su resistencia de forma creciente con la temperatura. La curva de respuesta de la resistencia frente a la temperatura, $R = f(t)$, aunque puede aproximarse por una parábola por encima de 0°C y por una cúbica para temperaturas inferiores a cero grados, se aparta poco de la linealidad en un intervalo de temperaturas que depende de la naturaleza del sensor. En general para una sonda de resistencia metálica:

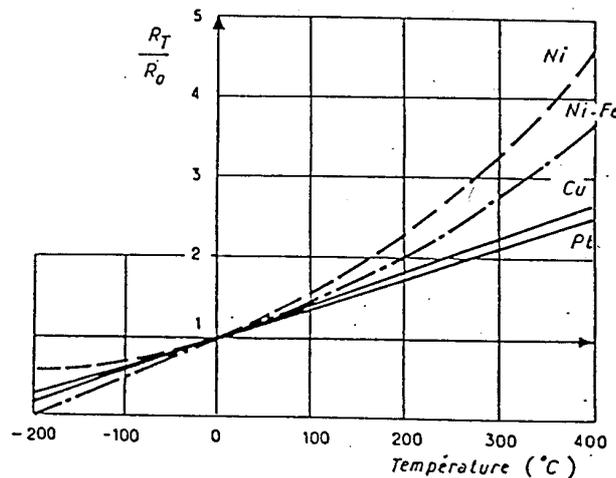
$$R(t) = R_0 (1 + A T + B T^2 + C T^3)$$

donde A , B y C pueden tener distintos valores según la temperatura.

El termómetro de resistencia de platino es el sensor recomendado por la ITS'90 entre el punto triple del hidrógeno ($-259,35^\circ\text{C}$) y el punto de congelación de la plata ($961,78^\circ\text{C}$). El platino es el mejor material por ser fácil de obtener de forma pura, ser químicamente inerte, ser un material dúctil, con un punto de fusión alto y por su alta linealidad. La sonda de platino más usada comercialmente es la que tiene una resistencia de 100Ω para 0°C , que suele llamarse *Pt100*.

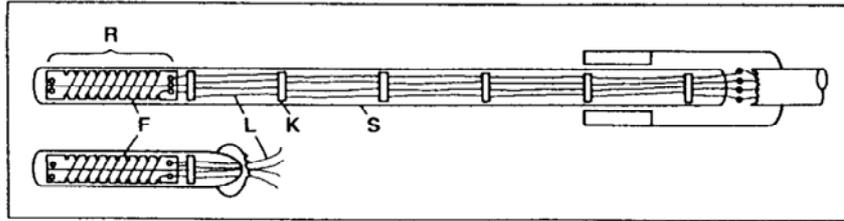
Si se compara con otros metales usados, como el níquel, el cobre o el hierro, se observa que:

- El níquel no se suele utilizar por encima de los 300°C . Tiene un coeficiente R_{100}/R_0 muy grande, lo que proporciona una gran sensibilidad. Sin embargo, presenta una curva $R = f(T)$ que se aparta mucho de una ley lineal sobre todo entre 250 y 300°C .
- El cobre se utiliza cada vez menos a causa de su rápida oxidación con la temperatura. Sin embargo presenta una curva $R = f(t)$ que es prácticamente una línea recta.
- También se fabrican sondas a base de una aleación de hierro y níquel que presentan la ventaja de desviar la curva del níquel hacia la linealidad a costa de disminuir la relación R_{100}/R_0 que presenta el níquel.



Las formas que adoptan las sondas de resistencia industriales más frecuentes son:

- Elementos de forma cilíndrica: El hilo metálico se arrolla sobre un material que puede ser vidrio o mica para temperaturas hasta 500°C , cerámica hasta 800°C y aluminio hasta 1100°C . Después se recubren con unas cánulas de protección de material adecuado al sistema cuya temperatura se mide. En la figura se observa un diseño estándar.



- Elementos planos: el hilo metálico se inserta entre dos láminas metálicas. Se utilizan sobre todo para la medida de temperaturas de superficies.

Termistores

Se trata de elementos semiconductores o diferentes compuestos químicos (p. ej. óxidos metálicos a base de manganeso, níquel, hierro y cobalto) cuya resistencia varía sensiblemente con la temperatura. Se llaman termistores PTC (*positive temperature coefficient*) aquellos que aumentan su resistencia con la temperatura y NTC (*negative temperature coefficient*) los que disminuyen la resistencia con la temperatura. Los más conocidos son los NTC.

Para los termistores NTC, la ley de variación de la resistencia con la temperatura suele ser de tipo exponencial y tiene la forma:

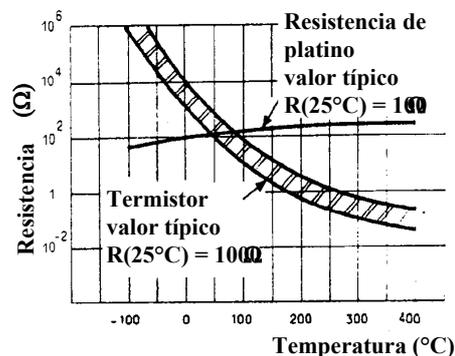
$$R = A e^{\frac{B}{T}}$$

donde A y B son dos constantes características del termistor que dependen de su forma y del material de que esté hecho y T es la temperatura absoluta. Su coeficiente de temperatura, α , se puede expresar como:

$$\alpha = \frac{1}{R} \left(\frac{dR}{dT} \right) = \frac{d \ln R}{dT} = -\frac{B}{T^2}$$

Los termistores debido a que no están fabricados con elementos puros no son fácilmente intercambiables ni entre los del mismo tipo, ya que no presentan la misma respuesta entre sí frente a la temperatura. Envejecen fácilmente y hay que someterlos a calibrados periódicos. Poseen una gran sensibilidad y la gran ventaja de su tamaño que puede llegar a ser muy pequeño (existen termistores, llamados de perla, de tamaño inferior a 1 mm de diámetro). Se utilizan para temperaturas entre -100 y 400 °C. Deben usarse, para la medida de su resistencia, intensidades de corriente muy pequeñas para evitar el efecto de autocaldeo. Suelen ser más baratos que los termómetros de resistencia de Pt.

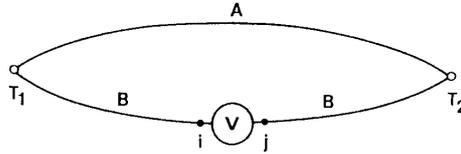
En la figura adjunta mostramos la diferente respuesta de un termómetro de resistencia de platino y de un termistor típicos.



TERMOPARES

Los termopares se basan en un efecto termoeléctrico, el efecto Seebeck. Los principios de la Termoelectricidad se descubrieron en el siglo XIX, casi al mismo tiempo que los voltímetros de alta impedancia. Comentaremos los efectos Seebeck y Peltier por su relación con los termopares y con prácticas del laboratorio.

Efecto Seebeck: Se trata de dos conductores metálicos diferentes unidos por sus extremos mediante soldaduras, formando un circuito. Si las uniones de ambos conductores están a temperatura diferente se produce una f.e.m. observándose la aparición de una corriente eléctrica en el circuito. La f.e.m. generada depende de la naturaleza de los materiales que forman el circuito y de la diferencia de temperaturas entre las dos uniones



Se utiliza este efecto para fabricar los termopares, en los cuales la variable termométrica es la f.e.m. generada.

Efecto Peltier: se produce cuando por el circuito formado por dos conductores metálicos diferentes unidos entre sí en sus extremos por soldaduras, se hace pasar una corriente eléctrica. Se observa entonces que se produce un bombeo de calor de una de las uniones a la otra de forma que una de ellas se calienta y la otra se enfría. Se observa también que este efecto es invertible de forma que si invertimos el sentido de la corriente que pasa por el circuito descrito, los flujos de calor se invierten y la unión que antes se calentaba se enfría y la que antes se enfriaba se calienta. La magnitud del bombeo de calor depende de la intensidad de la corriente eléctrica y de la naturaleza de los materiales que componen el circuito citado.

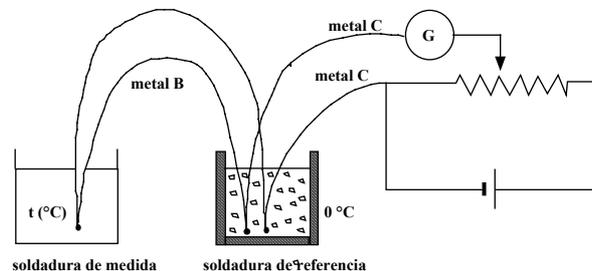
Se utiliza para sistemas de calefacción y control de temperatura, principalmente en instrumentos controlados electrónicamente. En los termopares interesa tener circuitos de gran impedancia para evitar este efecto y no falsear la medida.

Un termopar, está formado, por tanto, por dos conductores metálicos diferentes unidos por sus extremos formando un circuito eléctrico. La f.e.m. generada depende de la naturaleza de los conductores y de la diferencia de temperaturas entre sus uniones. La ley de variación de la f.e.m. con la diferencia de temperatura es una ley cuadrática de la forma:

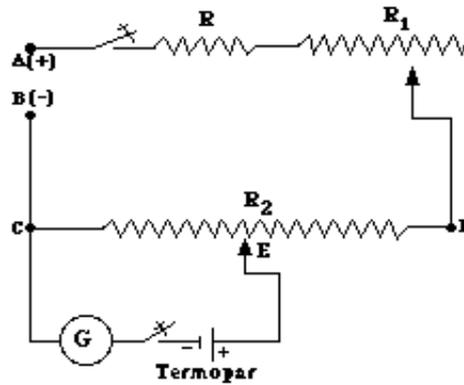
$$\varepsilon = a + b \Delta T + c \Delta T^2$$

donde Δt representa la diferencia de temperaturas entre las dos uniones y a , b y c son constantes que deben obtenerse a partir de la calibración con puntos fijos (termómetro secundario). Aunque naturalmente son termómetros diferenciales (miden la diferencia de temperaturas entre las dos uniones o soldaduras) pueden usarse para medir la temperatura de un sistema si una de las uniones se coloca en contacto con un sistema a 0°C (hielo fundente: vaso Dewar con hielo y agua en equilibrio, por ejemplo). Entonces la f.e.m. generada es función de la temperatura a que se encuentra la otra unión. A la unión situada en contacto con un sistema a 0°C se le llama unión o soldadura de referencia o fría (negativa) y a la otra se le llama unión o soldadura de medida o caliente (positiva).

El esquema de montaje de un termopar sería el siguiente (laboratorio):



Uno de los circuitos potenciométricos utilizados para la medida de la f.e.m. es el siguiente:



Ajustando la resistencia variable R_1 , se fija la diferencia de potencial entre C y D en un valor fijo, V_0 . Moviendo el cursor de la resistencia variable R_2 , conseguimos que la diferencia de potencial entre C y E iguale la fuerza electromotriz que presenta el termopar, lo que ocurrirá cuando por la rama del circuito en que se encuentra éste, el galvanómetro nos indique que no pasa intensidad de corriente. Si N es el número de divisiones en que está dividido el cursor de la resistencia variable R_2 , la diferencia de potencial en los extremos de la resistencia equivalente a una división del cursor, será V_0/N y si hemos necesitado Z divisiones del cursor para equilibrar el circuito, la f.e.m. medida, ε , será:

$$\varepsilon = Z \frac{V_0}{N}$$

El termopar de platino- platino/rodio (10% de rodio) servía hasta 1990 como sensor de temperatura de la EPIT entre las temperaturas de congelación del antimonio ($630,74^\circ\text{C}$) y la temperatura de congelación del oro ($1064,43^\circ\text{C}$). La ITS-90 lo eliminó sustituyéndolo por el termómetro de resistencia de platino.

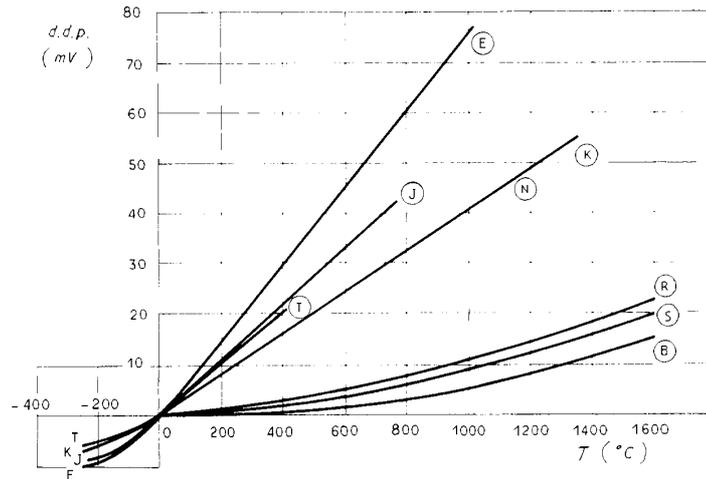
Además de éste, existen otras combinaciones de metales y aleaciones usadas en los termopares estándar a los que se asignan diferentes letras. En la figura adjunta mostramos las leyes de variación f.e.m. – temperatura².

ISA STANDARD THERMOCOUPLES

ISA designation	Approximate composition* (positive leg listed first)	Useful temperature range (°C)
Noble metal types		
Type S	(Pt + 10% Rh) vs. Pt	- 50 to 1767
Type R	(Pt + 13% Rh) vs. Pt	- 50 to 1767
Type B	(Pt + 30% Rh) vs. (Pt + 6% Rh)	0 to 1820
Base metal types		
Type E	(Ni + 10% Cr) vs. (Cu + 43% Ni)	- 270 to 1000
Type T	Cu vs. (Cu + 43% Ni)	- 270 to 400
Type J	Fe vs. (Cu + 43% Ni)	- 210 to 1200
Type K	(Ni + 10% Cr) vs. (Ni + 2% Al + 2% Mn + 1% Si)	- 270 to 1372

* All compositions are given in weight percent.

² Cromel: Ni + 10% Cr; Constantán: Cu + 43% Ni; Alumel: Ni + 2% Al + 2% MN + 1% Si



Para los termopares se cumple la llamada *ley de los metales intermedios*:

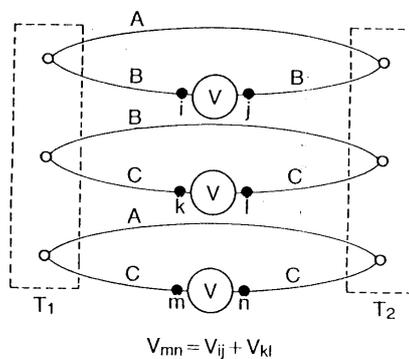
"Si se inserta un tercer metal C al termopar formado por los metales A y B y las uniones de A con C y B con C se encuentran a la misma temperatura, no se genera ninguna f.e.m. adicional".

Este comportamiento es muy importante, ya que permite utilizar cables de conexión con los instrumentos de medida de la f.e.m, distintos de los que constituyen el termopar sin perturbar la medida. En un montaje industrial la distancia puede ser bastante grande y los cables de conexión suponen un encarecimiento adicional considerable para la instalación de medida de temperatura.

Además, es interesante tener en cuenta que:

- "La suma de la f.e.m. producida por dos metales A-B y B-C es la misma que la f.e.m. de un circuito de metales A-C si las temperaturas de unión son las mismas"

Esto permite la asociación de termopares en serie para amplificar la señal y aumentar la sensibilidad. Se puede construir lo que se llama una termopila.



- " Si un circuito produce una f.e.m V_1 entre T_1 y T_2 y produce una f.e.m V_2 entre T_2 y T_3 , entonces produce una f.e.m $V = V_1 + V_2$ entre T_1 y T_3 ."

Este comportamiento permite el cambio de temperatura de referencia para los termopares.

ADJUSTING TYPE E THERMOCOUPLE EMF-TEMPERATURE VALUES FOR A DIFFERENT REFERENCE TEMPERATURE

$t(^{\circ}\text{C})$	emf(t) (mV) ($t_r = 0^{\circ}\text{C}$)	emf At $t = 100^{\circ}\text{C}$ (mV) ($t_r = 0^{\circ}\text{C}$)	$t(^{\circ}\text{C})$	Adjusted emf(t)(mV) ($t_r = 100^{\circ}\text{C}$)
-50	-2.787	+ 6.317	-50	-9.104
0	0		0	-6.317
75	+4.655		75	-1.662
150	+9.787		150	+3.470
350	+24.961		350	+18.644
700	+53.110		700	+46.793

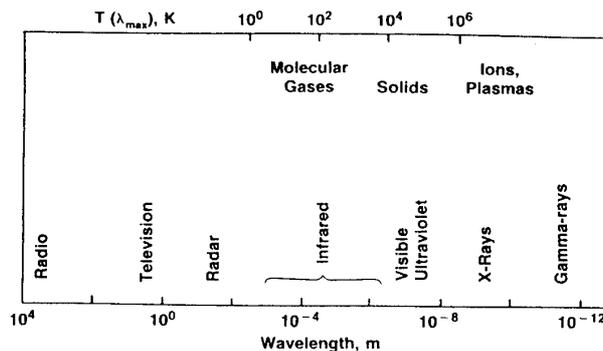
Los termopares presentan algunas ventajas sobre los termómetros de resistencia:

- Su capacidad calorífica es muy pequeña y su constante de tiempo también (el elemento sensible es un punto de soldadura) por lo que resultan muy apropiados para medir fluctuaciones de temperatura y temperaturas de sistemas de reducidas dimensiones.
- No necesitan una fuente de energía como los termómetros de resistencia por los que hay que hacer pasar una corriente eléctrica para determinar la resistencia, ya que engendran su propia señal (f.e.m. generada por el termopar).
- Pueden usarse como instrumentos diferenciales directamente, ya que su respuesta es proporcional a la diferencia de temperaturas entre las dos uniones del termopar.

PIRÓMETROS DE RADIACIÓN

Utilizan la ley de Planck, que relaciona la radiación emitida por un cuerpo con su temperatura. Se utilizan para medir la temperatura por encima del punto de congelación de la plata (961,78 °C), según recomendación de la ITS-90. La característica más importante de estos termómetros es que no hay contacto físico entre el sensor y el sistema cuya temperatura se desea medir. Reciben el nombre genérico de pirómetros.

Sabemos que la superficie de un cuerpo emite radiación electromagnética y que ésta depende de la temperatura. A temperaturas ordinarias la emisión se produce principalmente en el infrarrojo y al aumentar la temperatura la máxima radiación térmica se desplaza hacia longitudes de onda más cortas, de manera que entramos en el visible a partir de los 700 °C.



Conociendo la relación entre esa energía radiada y la temperatura, se puede construir un termómetro. Estos se basan en las **leyes de radiación del cuerpo negro**. Un cuerpo negro es aquel que absorbe toda la energía incidente, absorptividad = $\alpha = 1$. No existe ningún cuerpo real que cumpla esto, pero puede reproducirse con un cuerpo hueco con un pequeño agujero, del cual no puede salir la radiación.

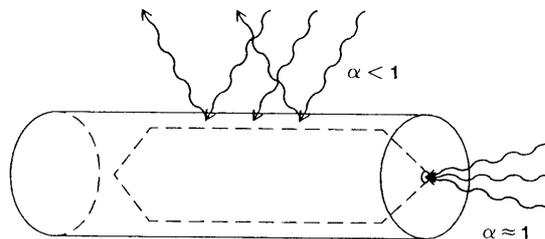


FIGURE 30. Construction of a black body from nonblack materials.

Si el cuerpo emisor no es un cuerpo negro es necesario conocer su coeficiente de emisividad, $\epsilon < 1$, que es el cociente entre la energía emitida por un cuerpo a una determinada λ y T y la emitida por un cuerpo negro a esa misma λ y T (depende del material y del tipo de superficie, como se ve en la tabla siguiente).

NORMAL TOTAL EMISSIVITIES OF SOLID SUBSTANCES¹⁶⁵

Metal	T(K)	ϵ_n	Wavelength (μm)
Metal			
Aluminum, polished	800	0.05	
Aluminum, oxidized	800	0.33	
Brass, polished	600	0.03	
Brass, oxidized	600	0.6	
Copper, polished	300	0.02	
Copper, black oxidized	300	0.78	
Iron, polished	600	0.12	
Iron, cast rough, oxidized	600	0.95	
Steel, polished	300	0.09	
Steel, rough oxidized	300	0.81	
Tungsten, filament	300	0.03	
Nonmetal			
Alumina	800	0.65	
Brick, white refractory	1300	0.29	
Brick, rough red	300	0.93	
Carbon, lampblack	300	0.95	
Ice	273	0.97	
Paint, oil	373	0.94	
Paint, flat black	373	0.98	
Water, ocean	300	0.96	

- *Ley de Planck*: La potencia emitida depende de la temperatura y de la longitud de onda considerada. Se utiliza en los pirómetros de radiación espectral (termómetros primarios), de forma que se compara la radiancia (emitancia/ángulo sólido) espectral, L_{λ} , a una λ determinada con la correspondiente a la temperatura de referencia a esa misma λ .

$$\text{Emitancia monocromática (W/m}^3\text{)} = E^0(\lambda, T) = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1}$$

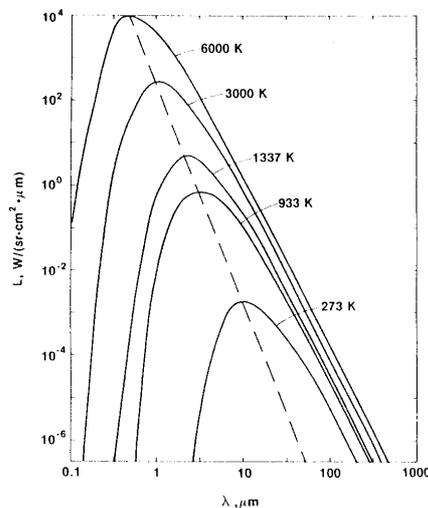
$$C_1 = 2 \pi h c^2; \quad C_2 = \frac{hc}{k}$$

- *Ley de Stefan-Boltzmann*: La emitancia total, integrada para todas las longitudes de onda es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura. Se utiliza en los pirómetros de radiación total, que comparan la radiancia total (termómetro primario) con la emitida por un sistema de referencia.

$$E^0(T) = \int_0^{\infty} E^0(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 = 5,67 \times 10^{-8} T^4 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

- *Ley de Wien*. Relaciona la longitud de onda a la que se produce el máximo de radiación con la temperatura.

$$\lambda_{\text{máx}} T = 2898 \mu\text{m K}$$



Estos aparatos determinan la temperatura analizando la radiación emitida. Para ello son necesarios una serie de dispositivos ópticos y electrónicos. En el esquema simplificado que se muestra a continuación pueden verse los distintos tipos:

- Dispositivos para seleccionar la radiación (lentes, filtros, sectores de disco, etc...)
- Dispositivos para enfocar la radiación (espejos, lentes, prismas, rendijas...)
- Detectores (fotoconductores, fotodiodos, sensores térmicos, ...)
- Fuentes de referencia para calibrar

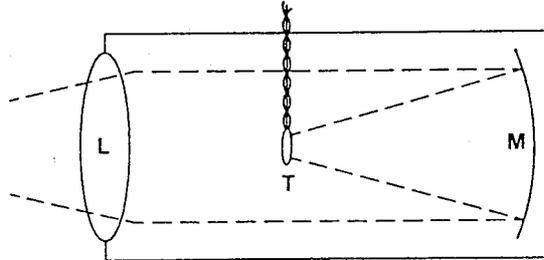


FIGURE 32. Schematic view of a simple radiometer incorporating an entrance lens L, a focusing mirror M, and a thermopile detector T.

- Pirómetro de desaparición de filamento

El esquema de funcionamiento de un pirómetro de radiación visible, también llamado de desaparición de filamento, se recoge en la figura adjunta.

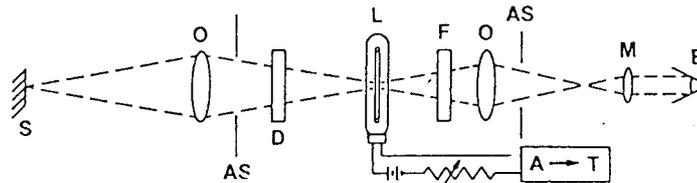


FIGURE 33. The disappearing-filament optical pyrometer. The components are: S, source; O, objective lenses; AS, aperture stops; D, optional gray-wedge or sectored disc; L, reference lamp; F, filter; M, microscope objective; E, observer's eye. The ammeter current A generally is calibrated to read in terms of the temperature T.

Este tipo de pirómetros está basado en la ley de distribución de la radiación térmica de Wien ($\lambda_{\text{máx}} T = \text{cte}$). Dadas las altas temperaturas de los hornos en los que se suele utilizar este pirómetro, la longitud de onda de la máxima emisión de radiación se centra en las longitudes de onda del rojo.

La imagen del foco calorífico es enfocada mediante una lente objetivo sobre el filamento de una lámpara eléctrica, la cual se observa a través de un filtro rojo mediante el ocular. El observador varía la corriente que atraviesa la lámpara hasta que su filamento se hace indistinguible sobre el fondo de la imagen del foco calorífico. Si la corriente es excesiva, el filamento aparece más brillante que el foco y si es demasiado pequeña, aparece oscuro. El filtro rojo permite que la comparación se realice dentro de un pequeño intervalo de longitudes de onda y el instrumento se calibra registrando las lecturas que realiza el amperímetro de la corriente eléctrica que atraviesa el filamento cuando se observan distintos focos de temperatura conocida.

OTROS TERMÓMETROS (ANEXO)

Existen muchos más tipos de termómetros. A continuación, a modo de ejemplo, se comentan algunos de ellos:

Los termómetros piezoeléctricos

El elemento sensible está constituido por una lámina de cuarzo de tamaño tal que sufra deformación con la temperatura. Al situar la lámina en un circuito oscilante se obtiene una frecuencia propia de vibración del cuarzo que es función de la temperatura. Es posible apreciar variaciones de 0,001 °C en un intervalo de temperaturas comprendido entre -40 y 230 °C gracias a la gran variación de frecuencia que experimentan por grado de temperatura (2000 Hz/°C).

Los termómetros de cambio de estado

El equilibrio entre un líquido y su vapor se da a una temperatura y presión de vapor saturante fijas. Midiendo la presión a la que comienza la ebullición del líquido conoceremos la temperatura a que se encuentra (termómetros de presión de vapor).

Los termómetros magnéticos

Se utilizan para la medida de bajas temperaturas, próximas al cero absoluto. Están basados en la relación que hay entre la susceptibilidad magnética de una sal paramagnética y la temperatura. Según la ley de Curie, el producto de la susceptibilidad magnética, χ , de una sal paramagnética por la temperatura absoluta a que se encuentra, T , es constante. Por lo tanto, para medir la temperatura de un sistema, basta determinar la susceptibilidad de una sal paramagnética en contacto con él, lo que se realiza midiendo la autoinducción de un arrollamiento que rodea la muestra.

Los termómetros acústicos

Es uno de los tipos de termómetros primarios que pueden medir temperaturas termodinámicas. En ellos se utiliza el hecho de que la velocidad del sonido en un gas es una función de la temperatura termodinámica. Para un gas ideal:

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}}$$

Los termómetros de ruido

Son termómetros primarios que miden la temperatura termodinámica a partir del ruido electrónico, basándose en la relación

$$\overline{V^2} \approx 4kTR\Delta\nu$$

donde $\overline{V^2}$ es el valor medio del cuadrado del voltaje y ν es la frecuencia. Tienen gran interés tanto a temperaturas muy bajas como a las muy altas.

Medida de altas temperaturas por efecto Doppler

La radiación emitida por un átomo depende de su estado de excitación y del salto energético que experimenta. Sin embargo, un átomo que se aleja del observador emite, aparentemente, radiación de longitud de onda mayor que un átomo estacionario y si se acerca parece que emita radiación de longitud de onda menor que la del átomo estacionario. Este es el llamado efecto Doppler y se utiliza para determinar temperaturas extremadamente altas como son las de las estrellas. Cuanto mayor es la temperatura del gas (estrella) mayor es la anchura de la banda y puede demostrarse que se cumple la siguiente relación:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{2}{c} \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} = 9,7 \cdot 10^{-7} \sqrt{\frac{T}{M}}$$

donde $\Delta\lambda$ es el ensanchamiento Doppler, λ_0 es la longitud de onda en el centro de la línea, M la masa molecular del gas, c la velocidad de la luz y T la temperatura..