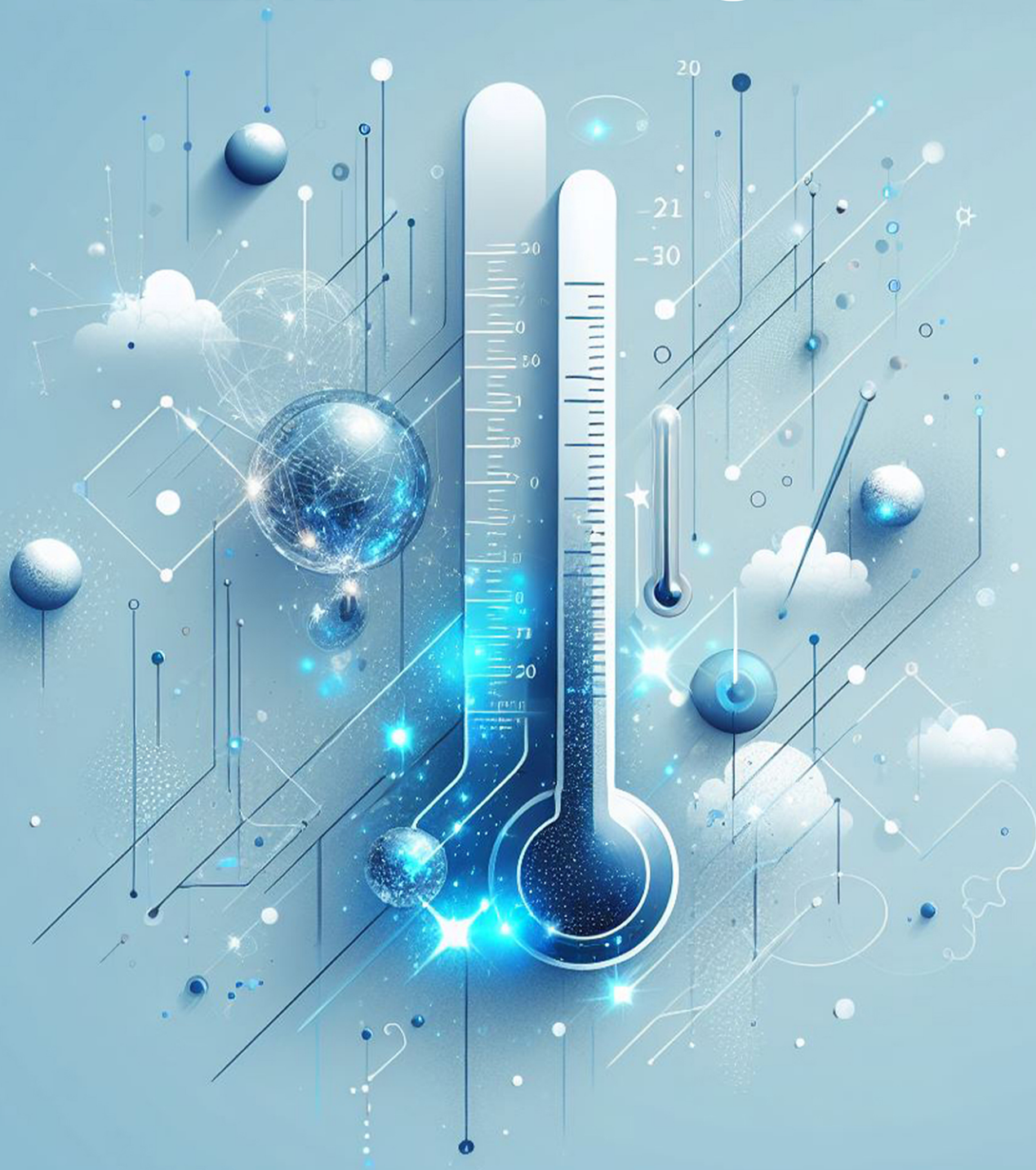


# MANUAL DE MEDICIONES DE TEMPERATURA



# Índice

Capitulo 1.....	4
RESEÑA HISTORICA.....	4
La Temperatura Y Sus Escalas .....	7
Definiciones De Temperatura Y De Su Unidad De Medida.....	7
Escalas De Temperatura.....	9
Escala Internacional De Temperatura De 1 990.....	10
Consideraciones Generales sobre Mediciones de Temperatura .....	11
Métodos Para El Contacto Térmico .....	11
Introducción De Termómetros En El Medio De Medición .....	11
Influencia De La Constante De Tiempo .....	11
Capitulo 2.....	13
CLASIFICACION DE LOS MEDIOS DE MEDICION DE TEMPERATURA .....	13
TERMOMETROS DE EXPANSION.....	13
Termómetros De Líquido En Vidrio.....	14
Partes De Un Termómetro De Líquido En Vidrio.....	15
Tipos De Termómetros De Líquido En Vidrio.....	17
Tipos De Líquidos Termométricos.....	18
Intervalo De Medición De Los Termómetros De Líquido En Vidrio.....	18
Errores Máximos Permitidos Para Termómetros De Líquido En Vidrio.....	19
Criterios Para La Selección De Termómetros De Líquido En Vidrio .....	19
Ventajas Y Desventajas De Los Termómetros De Líquido En Vidrio.....	20
Factores Que Deben Tomarse En Cuenta Al Usar Los Termómetros De Líquido En Vidrio .....	20
Lectura De Los Termómetros De Líquido En Vidrio.....	23
Calibración De Termómetros De Líquido En Vidrio .....	23
Termómetros Bimetálicos .....	26
Clasificación De Los Termómetros Bimetálicos .....	26
Errores Máximos Permisibles.....	27
Ventajas Y Desventajas De Los Termómetros Bimetálicos .....	27
Verificación De Termómetros Bimetálicos .....	28
Capitulo 3.....	29

TERMOMETROS DE RESISTENCIA .....	29
Teoría De Los Termómetros De Resistencia .....	29
Termómetro De Resistencia Patrón .....	30
Sensores De Resistencia Industriales .....	32
Materiales De Fabricación.....	32
Termistores .....	33
Elemento Primario Y Tubos Protectores .....	34
DISEÑO DE LOS ELEMENTOS PRIMARIOS CON TERMISTORES.....	35
VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS TERMOMETROS DE RESISTENCIA.....	36
MEDICION DE LA RESISTENCIA.....	37
Capitulo 4.....	39
TERMOMETROS TERMOELECTRICOS (TERMOPARES O TERMOCUPLAS).....	39
Teoría De Los Termómetros Termoeléctricos.....	39
Fuerzas Electromotrices Térmicas.....	39
Fuerza Electromotriz Thompson .....	40
Fuerza Electromotriz Peltier .....	41
Fuerza Electromotriz Seebeck .....	41
Características Que Deben Tener Los Materiales De Construcción De Los Termopares .....	43
Métodos De Medición De La F.E.M. Generada Por Los Termopares .....	45
Método De Desviación .....	45
Método De Compensación .....	45
Con Corriente Constante, De Balanceo Nulo o Método de Cero .....	46
Ventajas Y Desventajas De Los Termopares .....	47
Capitulo 5.....	48
PIROMETROS DE RADIACION .....	48
Leyes de la Radiación .....	49
ELEMENTOS RECEPTORES DE RADIACIÓN.....	50
Pirómetros de Radión Total .....	51
CORRECCIONES DE LAS LECTURAS EFECTUADAS CON LOS PIROMETROS DE RADIACION TOTAL....	52

CALIBRACION DE PIROMETROS DE RADIACION TOTAL .....	54
Pirómetro Optico o de Radiación Parcial.....	54
PIROMETRO DE RADIACIÓN PARCIAL A DESAPARICIÓN DE FILAMENTO .....	55
VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS PIROMETROS DE RADIACION.....	56
Capitulo 6.....	52
ESQUEMA DE TRANSMISION DE LA UNIDAD DE TEMPERATURA .....	52
Trazabilidad De La Unidad De Temperatura .....	52
Puntos Fijos .....	52
Termorresistencias de Platino.....	53
Indicadores De Temperatura .....	53
EQUIPOS AUXILIARES .....	53

## Capítulo 1

# Reseña histórica

La temperatura es la magnitud física fundamental para la caracterización de un gran número de procesos físicos, químicos y biológicos. En las técnicas actuales el control de la temperatura es requerido, frecuentemente con notable exactitud, en conversión de la energía, en los procesos siderúrgicos, en la producción de los compuestos químicos, en el control de las condiciones de vida desde los organismos más elementales hasta el hombre, en los pronósticos meteorológicos y en muchos otros casos.

Por muy familiar que sea al hombre moderno el termómetro y la medición de la temperatura, no es siempre conocida la definición de esta magnitud ni los principios de funcionamiento de los instrumentos capaces de medirla. Además, puede a veces sorprender ¡a considerable cantidad de métodos y principios físicos a que se debe hacer recurso para obtener mediciones prácticas en un rango que se extiende desde temperaturas inferiores a aquella del Helio líquido hasta aquella de los gases a altísimas temperaturas o del plasma.

El término histórico temperatura se remonta a la física antigua, la cual desconocía los termómetros. Los términos latinos, *temperies*, temperatura (lo mismo que la palabra griega Crasis significan mezcla, mezclanza, es decir, una u otra combinación de cualidades contrapuestas, de frío y calor, de sequedad y humedad (de ahí, temperamento, es la combinación de los cuatro humores primarios del organismo en una u otra proporción). Estas concepciones relativas a la combinación de cualidades de intensidad diferente, llevaron a la idea de la escala de intensidades, la cual, sin embargo, no se plasmó en ningún instrumento de medición.

En la actualidad la temperatura es uno de los más importantes parámetros en los procesos tecnológicos. Posee ciertas particularidades fundamentales, lo cual determina la necesidad de emplear gran cantidad de métodos y medios técnicos para medirla, en dependencia del intervalo de medición, de la exactitud que se requiera en la medición a efectuar y de otros parámetros.

En el siglo XVIII para interpretar teóricamente los hechos registrados, se partía de la ley de conservación, respecto a la cual se pusieron de manifiesto dos puntos de vista. Según uno de ellos, el calor es un fluido indestructible. Por consiguiente, se puede hablar de la cantidad de ese fluido contenido en un cuerpo y se puede plantear el problema de la dependencia en que se halla tal magnitud respecto a la estructura del cuerpo, de la masa y otras condiciones del mismo. Este punto de vista dio un gran impulso a la fundación de la calorimetría. El otro punto de vista entroncaba con las ideas expuestas por Bacon y Newton ya que se concebía al calor como una especie de movimiento.

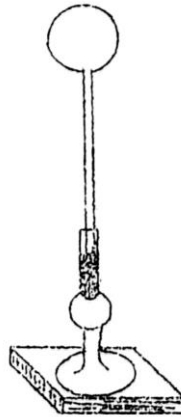
En el trabajo "Reflexiones sobre las causas del calor y del frío", publicado en 1750, se formula la tesis de que el calor estriba en el movimiento interno de la materia.

Como podemos comprender, existían diversas ideas y puntos de vista sobre el calor que trataban de explicar los fenómenos ocurridos, con los medios y desarrollo alcanzado hasta aquel momento, llegándose a una fase del conocimiento de los fenómenos térmicos, enmarcado en aquella época.

La historia de como se aprendió a medir la temperatura es interesante. Los termómetros fueron inventados mucho antes de que se supiera lo que realmente se medía con ellos.

Al medir ángulos en el cielo o distancias en la tierra el hombre sabía lo que hacía; pero sobre la temperatura no se puede decir lo mismo. La temperatura está ligada a conceptos bastante indefinidos como los de calor y frío, que en la conciencia del hombre se encuentran situados, más o menos, junto a los conceptos de olor y sabor. Por otro lado, los cuerpos calientes y fríos siempre se han podido ordenar, determinando al tacto cuál de los cuerpos es más caliente. Además, el hombre sabía desde tiempos inmemoriales que cuando dos cuerpos están en estrecho contacto, entre ellos se establece lo que hoy llamamos equilibrio térmico; que la estufa calienta el aire de la habitación y que una barra metálica calentada por uno de sus extremos, en poco tiempo se calienta totalmente.

El estudio de los fenómenos térmicos fue abordado por Galileo. Ante todo se ocupó del problema de cómo medir la temperatura de los cuerpos. Los termómetros construidos por él consistían en un balón de cristal lleno de aire, de cuya parte inferior descendía un tubo parcialmente lleno de agua que terminaba en un recipiente lleno también de agua. Cuando el aire del balón se dilataba o comprimía, el nivel de agua en el tubo variaba, lo cual indicaba la temperatura, por ejemplo, de las manos que tocaban el balón.



*Figura 1. 1. Termómetro de Galileo*

Sin embargo, la altura de la columna de agua dependía tanto de la temperatura como de la presión atmosférica. Efectuar mediciones algo precisas con este termómetro era imposible. Por eso, el termómetro de Galileo medía una magnitud bastante indefinida; pero tal termómetro permitía comparar la temperatura de diferentes cuerpos en el mismo momento y lugar.

El primer termómetro moderno fue descrito en 1724 por el vidriero holandés Daniel Fahrenheit. Los contemporáneos de Fahrenheit se sorprendían de que los termómetros de alcohol preparados por él registrasen todos la misma temperatura. El secreto consistía simplemente en que él marcaba las divisiones de la escala muy cuidadosamente con la ayuda de varios puntos fijos o constantes. Fahrenheit imitó la temperatura más baja del severo invierno de 1709 con ayuda de una mezcla de hielo, sal común y cloruro de amonio, al que él le hizo corresponder el punto cero grado de su escala. El segundo punto lo fijó introduciendo el termómetro en una mezcla de agua y hielo. La distancia entre estos dos puntos la dividió en 32 partes. Fahrenheit comprobaba sus termómetros midiendo la temperatura del cuerpo humano, este tercer punto correspondía a la

temperatura de 98 grados. Más tarde introdujo un cuarto punto fijo, el punto de ebullición del agua que se encontraba a los 212 grados. Los distintos termómetros de Fahrenheit se podían comprobar entre sí, comparando sus registros en los distintos puntos antes mencionados.

### ***La Temperatura Y Sus Escalas***

#### Definiciones De Temperatura Y De Su Unidad De Medida

La introducción de la temperatura como magnitud física ha sido progresiva, siguiendo esencialmente la evolución de los conceptos que han conducido a la formulación de la teoría de la Termodinámica.

La temperatura puede ser definida como una magnitud física determinada que caracteriza el estado térmico de la materia o del cuerpo, que será igual en dos cuerpos cualesquiera que se hallen en equilibrio térmico entre sí. Su valor depende de la energía cinética media del movimiento de traslación de las moléculas del cuerpo dado.

Por eso, está claro que esta energía es la que tiene, precisamente, un sentido físico. Por lo que la temperatura es una magnitud en cierta medida convencional, que es sólo el reflejo de aquellos procesos cinemáticas que ocurren en la materia.

La posibilidad de medir la temperatura se desprende del hecho experimental conocido, de que si ponemos en contacto dos cuerpos calentados distintamente, entonces el cuerpo más caliente se enfría y el menos caliente se calienta, y este proceso se prolonga hasta que ambos cuerpos se encuentran en un mismo estado térmico, es decir, igualmente calientes. En este caso se dice, que ellos se encuentran en equilibrio térmico y poseerán el mismo valor de temperatura. Este hecho por sí mismo, aún no permite medir la temperatura, pero permite constatar la igualdad de las temperaturas de dos cuerpos. Si uno de estos cuerpos puede servir como aparato para la medición de la temperatura, es decir, de termómetro, entonces, se puede considerar que después de establecerse el equilibrio térmico la temperatura correspondiente a dicho equilibrio térmico es la que indique dicho termómetro.

La unidad de medida de la cantidad física fundamental conocida como Temperatura



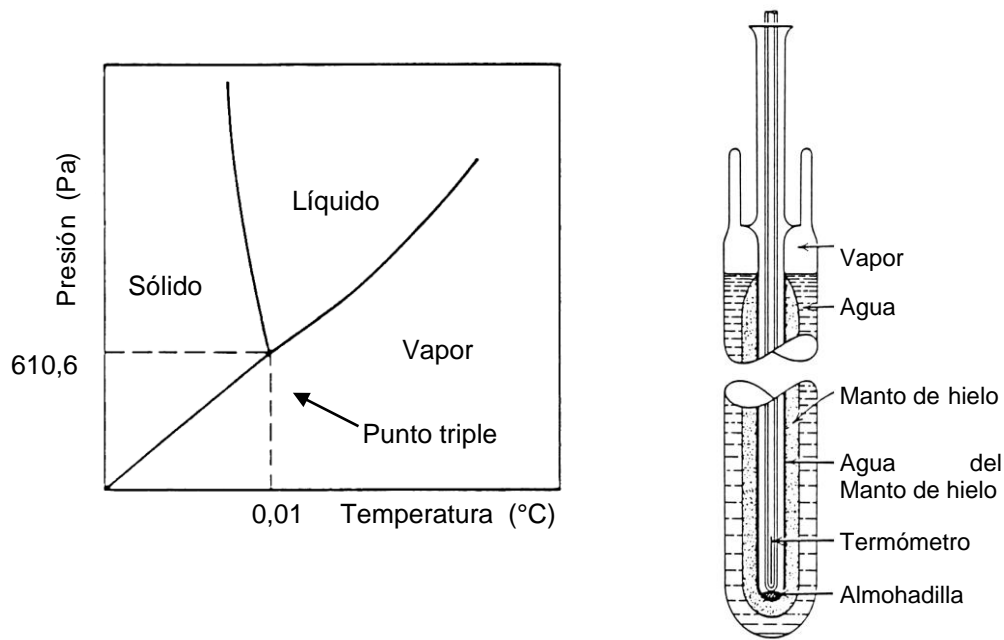
Termodinámica  $T$  es el kelvin, y esta definida como la fracción  $1/273,16$  de la temperatura termodinámica del punto triple del agua. Siendo el símbolo de esta unidad de medida **K**

Se llama temperatura termodinámica, a la que se determina, partiendo de la ecuación diferencial siguiente:

$$\eta_T = \frac{dQ}{Q} \equiv f(T) dT \quad (1.1)$$

por el valor de  $\eta_T$  (rendimiento térmico) del ciclo reversible de Carnot, que relaciona unívocamente entre si a los valores del rendimiento térmico y de la temperatura ( $T$ ).

Como el rendimiento térmico en este ciclo no depende de las propiedades del agente de transformación, la temperatura termodinámica determinada por el valor de  $\eta_T$  tampoco depende de las propiedades de dicho agente, es decir, de la sustancia termométrica, siendo esta su característica fundamental.



*Figura 1. 2. Diagrama de Equilibrio de Fases del Agua(Izquierda). Celda del Punto Triple de Agua (Derecha)*

Un sistema para una sustancia pura donde existan sus tres fases (sistema trifásico le un solo componente, cuyo número de grados de libertad de este sistema es nulo) sólo puede estar en equilibrio a una temperatura y presión completamente determinadas, características de la sustancia concreta dada. En el diagrama presión-temperatura ( $P, T$ ), el estado en que existen las tres fases se representa por un punto, llamado punto triple.

El punto triple del agua, es el estado donde el agua el hielo y su vapor están en equilibrio. A este punto le corresponde la temperatura de  $0,01^{\circ}\text{C}$  y la presión de  $610,8 \text{ Pa}$  ( $0006228 \text{ Kgf/cm}$ ).

Este estado de equilibrio se realizará en una celda sellada de vidrio con agua de alta pureza de una determinada composición isotópica.

Por convención la temperatura de este punto se fijó en  $T = 273,16 \text{ K}$  exactamente.

Para asegurar la exactitud de la escala Celsius se acordó fijar a  $0^{\circ}\text{C}$  el valor de  $T = 273,15 \text{ K}$  de la escala absoluta. La relación entre la escala Celsius (simbolizada por  $t$ ) y la escala Kelvin (simbolizada por  $T$ ) es:

$$T[\text{K}] = t[{}^{\circ}\text{C}] + 273,15 \quad (2.1)$$

una diferencia de temperatura tiene el mismo valor en ambas escalas y puede expresarse tanto en  $\text{K}$  como en  ${}^{\circ}\text{C}$ .

### **Escalas De Temperatura**

Si cierto cuerpo  $A$  se encuentra en equilibrio térmico por separado con dos cuerpos  $B$  y  $C$ , entonces  $B$  y  $C$  también se encontrarán entre sí en equilibrio térmico. Esto significa, que para establecer el hecho de la igualdad de temperatura de dos cuerpos, no hay necesidad de ponerlos en contacto uno con el otro. Para esto se puede utilizar un tercer cuerpo (en nuestro caso el cuerpo  $A$ ) que puede servir como aparato para la medición de a temperatura, es decir, de termómetro. Después de establecerse el equilibrio térmico, se puede considerar que la temperatura a medir es igual a la temperatura del termómetro. Por lo que solo es necesario

convenir sobre la forma de yuxtaponer a la temperatura unos números determinados, es decir, establecer una escala de temperaturas.

Para crear una escala de temperaturas es necesario elegir un cuerpo determinado, el cuerpo termométrico, y una magnitud determinada que caracterice alguna propiedad dependiente de la temperatura del cuerpo, la magnitud termométrica. Por ejemplo, en el termómetro de mercurio en vidrio conocido, la columna de mercurio sirve de cuerpo termométrico y la longitud de esta columna, de magnitud termométrica. Después de elegir cualquier rango de temperatura, que pueda fácilmente reproducirse, se lleva el cuerpo termométrico a los estados térmicos, correspondientes a los extremos del intervalo y se determina el valor de la magnitud termométrica en estos estados.

### ***Escala Internacional De Temperatura De 1 990***

Esta escala esta constituida por una serie de sustancias puras que se encuentran en equilibrio termodinámico y de una serie de dispositivos para medir el valor establecido de temperatura. Esta se divide en diferentes intervalos. A cada uno le corresponden una cantidad de puntos fijos y sus termómetros respectivos, además de una ecuación de interpolación.

En el intervalo de temperaturas de  $0,65\text{ K}$  a  $5,0\text{ K}$ ;  $T_{90}$  está definida usando ecuaciones que relacionan las presiones de vapor de  $^3\text{He}$  y  $^4\text{He}$  con la temperatura.

Entre  $3,0\text{ K}$  y el punto triple del neón ( $24,556\text{ 1 K}$ ),  $T_{90}$  está definida por medio de un termómetro de gas de helio calibrado en tres temperaturas realizables experimentalmente habiéndose asignado valores numéricos (puntos fijos definidos) y un procedimiento de interpolación específico.

Entre el punto triple del hidrógeno ( $13,803\text{ 3 K}$ ) y el punto de solidificación de la plata ( $961,78\text{ °C}$ ),  $T_{90}$  está definida por medio de termómetros de resistencia de platino calibrados en conjuntos de puntos fijos definidos y usando un proceder de interpolación especificado.

Por arriba del punto de solidificación de la plata ( $961,78\text{ °C}$ ),  $T_{90}$  está definida en función de un

punto fijo definido y la Ley de Radiación de Planck.

## **Consideraciones Generales sobre Mediciones de Temperatura**

### ***Métodos Para El Contacto Térmico***

Las mediciones de temperatura frecuentemente son influidas por efectos parásitos, que pueden ser considerablemente mayores que los errores de calibración del instrumento usado. Las mediciones casi siempre se llevan a cabo en un punto o lugar particular en el medio al cual se le quiere hacer la determinación de temperatura. Ese punto debe estar localizado, de manera que represente desde el punto de vista geométrico la media de la temperatura.

El instrumento localizado en este punto, no debe cambiar el valor indicado cuando se realice la medida, es decir, debe haber sólo incrementos o decrementos muy pequeños de la temperatura.

### ***Introducción De Termómetros En El Medio De Medición***

Los termómetros deberán siempre que fuere posible ser introducidos en el medio de medición. El uso de cavidades especiales influye considerablemente la precisión y la constante de tiempo de respuesta. Si estas cavidades son necesarias por razones de protección, presiones altas, etc. deberán ser hechas de materiales de baja conductividad térmica. Estas cavidades no se deben llenar con ningún líquido, esto para impedir el mal contacto térmico, pero su diámetro interno debería ser ajustado de manera de fijar el sensor del termómetro. Pequeños tubos de cobre o plata deberán usarse para estos propósitos de adaptación. Esos tubos deben ser cortos y restringidos a cubrir la parte sensible solamente.

### ***Influencia De La Constante De Tiempo***

La Temperatura a ser medida varía con el tiempo en la mayoría de los casos, y es necesario tomar en cuenta la constante de tiempo del sistema de medición. Esa constante de tiempo en muchos casos es proporcional a  $RC$ , donde  $C$  es la capacidad térmica del sensor y  $R$  es la resistencia térmica del termómetro (sensor mas tubo protector). Como  $R$  depende mucho de la resistencia de transferencia térmica entre el tubo de protección y el medio circundante, la constante de tiempo dependerá de la composición del medio medido (gas o líquido) y de la rapidez de flujo.

La constante de tiempo es el tiempo necesario para que un sistema, sometido a una variación de temperatura, indique un 63,2% de esa variación. El tiempo requerido para llegar hasta:

99,9 % del valor de la variación es  $6,6 \tau$

99,0 % del valor de la variación es  $4,6 \tau$

50,0 % del valor de la variación es  $0,7 \tau$

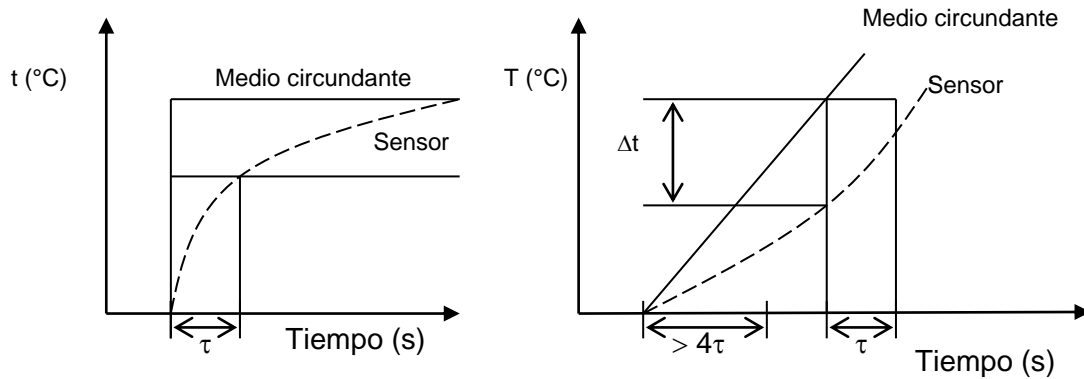


Figura 1. 3. Características Dinámicas de los Sensores.

Si la temperatura se varía lenta y linealmente se encontrará que la constante de tiempo corresponde con el tiempo de retardo de las indicaciones del valor verdadero.

La constante de tiempo para varios medios se indica en la información del equipo y de los sensores. Para termómetros industriales y sus sensores la constante de tiempo debe ser tomada en cuenta al momento de determina el valor verdadero de la temperatura.

## Capítulo 2

# Clasificación de los Medios de Medición de Temperatura

El campo de las mediciones de temperatura es extenso, tanto por el intervalo de temperatura empleado y los requisitos para la precisión, como por la variedad de modelos y tipos de medios técnicos utilizados para su medición.

Los termómetros más utilizados son clasificados de acuerdo con sus principios físicos de funcionamiento, de la siguiente manera:

<b>Tipos de Termómetros</b>	<b>Intervalo de Medición (°C)</b>	<b>Principio Físico</b>
De líquido en vidrio	-200 a 750	Diferencia de dilatación entre el vidrio y el líquido
Bimetálicos	-50 a 500	Dilatación de los metales que constituyen el sensor bimetálico
Manométricos (líquido)	-150 a 500	Cambio en la presión del líquido
Manométricos (vapor y líquido)	-50 a 300	Cambio en la presión de vapor
De resistencia	-260 a 750	Cambio en la resistencia eléctrica
Termistores (resistencia)	-50 a 350	Cambio en la resistencia eléctrica
Termoeléctricos	-200 a 2 500	Fuerza electromotriz producida por una junta de dos metales distintos
Pirómetros Ópticos	700 a 8 000	Color y Brillo de los materiales incandescentes (650 nm)
Pirómetros de Radiación	150 a 3 500	Radiación total emitida

Tabla 2.1 Clasificación de Termómetros.

### TERMÓMETROS DE EXPANSIÓN

Los termómetros de expansión son ampliamente utilizados en diferentes medios en donde se desea determinar la temperatura. Desde hace cientos de años fueron estos los únicos que se usaban, tanto en los laboratorios como en los procesos industriales.

Están basados en la relación que existe entre un cambio de temperatura y la expansión correspondiente de un sólido, de un líquido o de un gas.

Para tratar de dar una idea lo más amplia posible sobre las particularidades y posibilidades de aplicación de estos instrumentos, se describe a continuación el funcionamiento y la construcción de los siguientes termómetros de expansión: termómetros de líquido en vidrio, termómetros a presión de fluidos (manométricos) y termómetros bimetálicos.

### ***Termómetros De Líquido En Vidrio***

Los termómetros de líquido en vidrio son los que mayor aplicación han adquirido, tanto en los laboratorios como en la práctica industrial, debido a su sencillez, su alta exactitud en la medición y precio relativamente bajo.

Existen muchos tipos de termómetros de líquido en vidrio dependiendo del uso que se les dé. El sensor o bulbo hecho de un vidrio especial como el cuarzo, se usa para altas temperaturas.

El líquido termométrico más común a temperaturas medias es el mercurio. Este mismo sirve para altas temperaturas cuando se le inyecta un gas adecuado a alta presión. Para bajas temperaturas se usan líquidos orgánicos como el alcohol, tolueno y pentano. Si se utiliza una mezcla eutéctica de mercurio-talio se puede medir temperaturas por debajo de  $-56\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Los termómetros que contienen líquidos orgánicos tienen usualmente una baja exactitud debido principalmente a la forma como el líquido humectante humedece las paredes internas del tubo capilar.

El funcionamiento de los termómetros de líquido en vidrio se basa en la dilatación térmica de un líquido termométrico introducido en un recipiente de vidrio de paredes delgadas (recipiente termométrico o bulbo) que se comunica con un capilar. Al capilar del termómetro se le ha construido una escala. El líquido termométrico que se encuentra en el capilar se denomina columna y su menisco (menisco de la columna) sirve como indicación de lectura.

La dilatación aparente del líquido con respecto al vidrio, proporciona un parámetro conveniente para indicar una temperatura a lo largo de la escala asociada con el capilar. Esta expansividad, definida en función del coeficiente térmico de dilatación cúbica aparente del líquido termométrico, que se simboliza por  $k$ , está dado por la siguiente ecuación:

$$k = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} \quad (2.1)$$

donde:

$V$  volumen del líquido,

$dV/dt$  es la rapidez del cambio del volumen con la temperatura.

Así la longitud de la escala  $L$ , equivale a un intervalo de temperatura  $t$  para un capilar y volumen de líquidos dado, se expresa por la ecuación:

$$L = \frac{V \cdot t \cdot k}{A} \quad (2.2)$$

Donde:  $A$  es el área de la sección transversal del capilar. Si  $A$  y  $h$  son constantes, entonces  $L$ , para un primer orden de precisión, depende linealmente de la temperatura.

### Partes De Un Termómetro De Líquido En Vidrio

#### Bulbo

Es un dispositivo de vidrio que contiene un volumen de líquido termométrico equivalente a un determinado número de grados muy grande en comparación con la escala del termómetro.

#### Columna

Es un tubo capilar por el cual el líquido termométrico se dilata o se contrae de acuerdo con los cambios de temperatura que se producen sobre el termómetro.

#### Escala Principal

Es una escala graduada en grados y también en múltiplos y submúltiplos de grado.

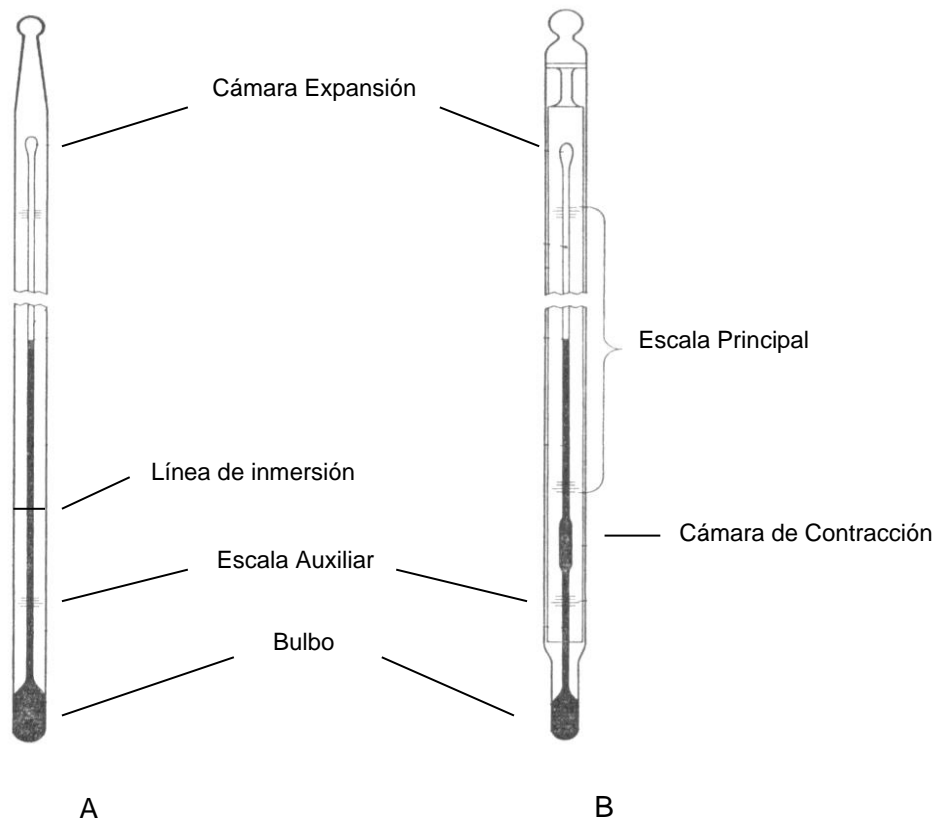


### Escala Auxiliar

Es una pequeña escala que contiene esencialmente una temperatura de referencia, tal como el punto  $0^{\circ}\text{C}$  y que sirve para verificar el comportamiento del termómetro a través del tiempo.

### Cámara de Expansión

Es un pequeño ensanchamiento del tubo capilar situado en su extremo superior y que contiene una capacidad para alojar una determinada cantidad de líquido termométrico. Su existencia previene contra un exceso de presión que podría producirse en el gas contenido en el termómetro.



*Figura 1. 4. Partes de un Termómetro de Vidrio. (A) Termómetro de Vástago. (B) De Escala Introducida.*

### Cámara de Contracción

Está situada por debajo de la escala principal o entre ésta y la escala auxiliar. Sirve para reducir la longitud del termómetro y también para prevenir la contracción de la columna de líquido termométrico dentro del bulbo.

## Tipos De Termómetros De Líquido En Vidrio

Los termómetros de líquido en vidrio pueden ser clasificados basándose en la forma de uso y según el tipo, en tres formas posibles. De acuerdo con este punto de vista se les designa con los siguientes nombres.

### Termómetros de Inmersión Total:

Son diseñados para indicar temperaturas correctas únicamente cuando el bulbo y la totalidad de la columna del líquido termométrico son expuestos a la misma temperatura.

### Termómetros de Inmersión Parcial:

Son diseñados para indicar temperaturas correctas cuando el bulbo y una parte específica de la columna que se señala mediante una línea denominada línea de inmersión se encuentran expuestos a la temperatura que se quiere determinar. La columna emergente permanece a una temperatura ambiente normalizada para cada clase de termómetro.

### Termómetros de Inmersión Completa:

Indican temperaturas correctas cuando todo el termómetro, incluyendo la cámara de expansión, se encuentra expuesto a la misma temperatura.

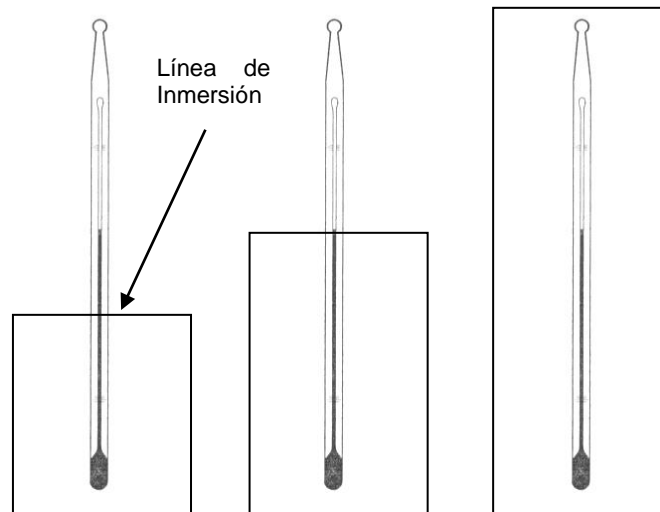
Teniendo en cuenta; la posición de la escala con respecto al tubo capilar, los termómetros pueden dividirse en dos clases:

### Termómetros con Escala Externa:

Es decir, termómetros cuya escala se encuentra grabada directamente sobre la superficie externa del vástago que contiene al tubo capilar.

### Termómetros con Escala Interna:

En estos termómetros el tubo capilar que es de paredes finas, se encuentra sujeto a una lámina de un material adecuado, sobre la cual se encuentra la escala. El conjunto a su vez se encuentra en el interior de un tubo de vidrio.



*Figura 1. 5. Tipos de Inmersión de los Termómetros de líquido en Vidrio. (A) Parcial. (B) Total. (C) Completa*

### Tipos De Líquidos Termométricos

Los líquidos termométricos más importantes son los líquidos No humectantes o metálicos de los cuales el principal es el mercurio. A continuación alguna ventajas de estos líquidos:

1. No humecta las paredes del capilar, por lo que cuando se produce un descenso de temperatura, toda la columna de mercurio desciende.
2. No requiere ningún colorante para ser visualizado.
3. Puede ser utilizado en un amplio rango de temperatura.

Otros tipos de líquidos termométricos son los Humectantes u Orgánicos, estos líquidos presentan algunas ventajas y desventajas:

1. Necesitan de colorantes para ser visualizados.
2. Humectan las paredes del capilar.
3. Se pueden medir temperaturas bajas.

### Intervalo De Medición De Los Termómetros De Líquido En Vidrio

Según el tipo de líquido termométrico, el rango de los termómetros de líquido en vidrio se encuentra limitado. Los márgenes de trabajo de los fluidos empleados son:

1. Mercurio -35 a 280 °C.
2. Mercurio con tubo capilar relleno de gas -35 a 450 °C.
3. Pentano -200 a 20 °C.
4. Alcohol -110 a 0 °C.
5. Tolueno -70 a 100 °C.

### Errores Máximos Permitidos Para Termómetros De Líquido En Vidrio

#### Tolerancia para Termómetros llenos con Líquidos Humectantes

Intervalo (°C)	0,2	0,5	1	2	5	10
-200 a -58	--	--	3	4	5	10
-58 a -5	1	1	2	4	5	10
-5 a 110	1	2	2	3	5	10
110 a 210	--	3	3	4	5	10

#### Tolerancia para Termómetros llenos con Líquidos No Humectantes

Intervalo (°C)	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	1	2	5 a 10
-200 a -58	--	0,10	0,2	0,3	0,4	0,5	1	2	3
-58 a -5	0,02	0,04	0,1	0,15	0,2	0,5	0,7	1	2,5
-5 a 110	--	0,04	0,15	0,25	0,3	0,5	1	1,5	3
110 a 210	--	0,10	0,2	0,3	0,5	1	1,5	2	4
210 a 310	--	--	--	0,5	0,5	1,5	2	3	5
310 a 410	--	--	--	1,0	1,0	2	2,5	4	7
410 a 625	--	--	--	--	--	--	3	6	10
625 a t	--	--	--	--	--	--	--	6	10

### Criterios Para La Selección De Termómetros De Líquido En Vidrio

Existen tres factores que predominan al momento de seleccionar un termómetro de líquido en vidrio adecuado para la medición en un sistema o proceso. Estos factores podemos resumirlos en tres:

- a) Intervalo de temperatura requerido.
- b) Profundidad de trabajo o de inmersión, y por lo tanto, la longitud permisible del

termómetro a seleccionar.

- c) Precisión deseada.

### Ventajas Y Desventajas De Los Termómetros De Líquido En Vidrio

1. Son de alta precisión.
2. Fácil de tomar las lecturas.
3. Se utilizan en laboratorios.
4. Son muy frágiles.
5. El intervalo de medición está limitado según el tipo de líquido termométrico.
6. No pueden ser manipulados con rudeza.

### Factores Que Deben Tomarse En Cuenta Al Usar Los Termómetros De Líquido En Vidrio

#### Punto de Referencia

Para mediciones de temperaturas precisas de 0,1 K o mejores, el termómetro debe escogerse de manera tal, que tenga por lo menos un punto de referencia, usualmente el punto de fusión del hielo, es decir, 0 °C.

El bulbo tiene la tendencia a cambiar su volumen con el tiempo (envejecimiento), así todos los valores de la escala se corren hasta 0,1 K y a veces más. Haciendo la determinación, es posible aplicar una corrección sin necesidad de hacer una recalibración total de las otras divisiones.

Sin embargo, los termómetros para altas temperaturas que son utilizados por encima de 350 °C, pueden mostrar cambios también en la capilaridad lo cual requiere la recalibración de toda la escala.

#### Depresión del Cero o Histéresis

Si se deben hacer medidas de mucha precisión con termómetros de mercurio, es necesario tomar en cuenta las histéresis que tienen lugar en el vidrio entre un calentamiento y un enfriamiento. La histéresis depende del tipo de uso y generalmente llega a un máximo de 0,001 K, por cada grado que el termómetro se haya calentado. La influencia de la histéresis es nula si las mediciones se hacen incrementando continuamente la temperatura.

### Influencia del Calibre del Capilar

Los termómetros de precisión de mercurio no deberían estar divididos en divisiones menores de 0,1 K. Si se disminuye el diámetro del capilar, para incrementar la sensibilidad, existe el riesgo de que la precisión se pierda por efectos de las fuerzas capilares internas. La columna en estos casos, al indicar una temperatura, se desplaza por pequeños saltos. En la calibración o en las mediciones precisas de termómetros muy sensibles, es necesario, dar pequeños golpes a la varilla, con un bolígrafo o algo parecido para que la columna de mercurio vaya a la posición del valor medio.

### Influencia de la Presión

La influencia de la presión externa de los termómetros de precisión de mercurio es del orden de 0,1 K por atmósfera. La influencia de la presión interna es del mismo orden. El efecto de esta última, es tal que las lecturas entre la posición horizontal y vertical del termómetro difieren en algo así como 0,01 K.

### Influencia de la Profundidad de Inmersión:

En mediciones de precisión con termómetros de mercurio, es necesario tomar en cuenta la temperatura de la columna de mercurio que está fuera del medio al cual se le está determinando la temperatura.

Si el termómetro se sumerge completamente en el baño líquido, se utiliza el término de Inmersión Completa. Desde el punto de vista de la calibración, la anterior (aparte de los efectos de la temperatura), es equivalente a la inmersión total.

La profundidad de inmersión en los termómetros de Inmersión Parcial está indicada usualmente a 76 ó 100 mm. Esto supone que la parte libre de la varilla del termómetro, está a cierta temperatura media que podría ser indicada como 20 ó 25°C.

Si la temperatura externa es diferente a las condiciones de calibración, las indicaciones de un termómetro de inmersión parcial pueden ser erróneas en una cantidad apreciable. Para un termómetro de inmersión total calibrado es posible determinar la corrección que hay que hacerle al valor indicado, cuando el termómetro es usado como uno de inmersión parcial, en la siguiente forma:

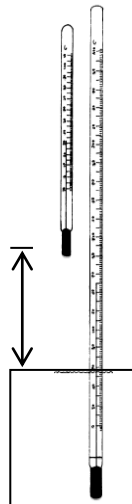
$K_i$  (corrección por Inmersión) =  $k \cdot n \cdot (t - t_v)$  donde

- $k$  (coeficiente de dilatación cúbica aparente del líquido) depende del tipo de vidrio del termómetro y es aproximadamente 0,000 16 para termómetros de mercurio calibrados en grados Celsius y aproximadamente de 0,001 para termómetros de vidrio que usan líquidos orgánicos como alcohol, pentano, etc.
- $n$  es el número de grados de la columna de mercurio por encima del nivel del medio medido.
- $t$  temperatura del bulbo.
- $t_v$  temperatura media de la columna externa del mercurio o del líquido orgánico.

Esta última temperatura debe ser medida con otro termómetro en el vástago del termómetro principal. De acuerdo con la fórmula anterior, podemos calcular la corrección de un termómetro de inmersión total, que indica 100 °C cuando sólo está sumergido hasta la marca de 20 °C, la cual es:

$$k_i = 0,000\ 16 \cdot (100 - 20) \cdot (100 - 50) = 0,64\ ^\circ\text{C}$$

Es de hacer notar que los termómetros que comienzan sus indicaciones a altas temperaturas (mayores que la temperatura ambiente), casi siempre poseen una cámara de contracción. Con estos termómetros se corre un importante riesgo si la profundidad de inmersión durante la medición, es diferente de la inmersión de la calibración.



*Figura 1. 6. Corrección por la profundidad de Inmersión*

### Lectura De Los Termómetros De Líquido En Vidrio

Para obtener buenos resultados en las mediciones con termómetros de líquido en vidrio, es usual que el observador las ejecute haciendo una estimación de una resolución de  $1/10$  del valor de división del termómetro.

La subdivisión del valor de división de la escala puede ser estimada por el ojo con la ayuda de un dispositivo óptico simple.

Para los termómetros con líquidos termométricos no humectantes, la lectura se toma en el punto más alto del menisco y en los no humectantes en el punto más bajo del menisco.

### Paralaje

Las lecturas deben ejecutarse en dirección perpendicular al extremo de la columna líquida. El error de paralaje es causado por el cambio del punto de observación.

### Calibración De Termómetros De Líquido En Vidrio

#### Examen Exterior del Termómetro

1. La columna del líquido termométrico no debe presentar separaciones, ni rastros del mismo en las paredes del tubo capilar.
2. El tubo protector no debe presentar ralladuras ni otros defectos que dificulten su uso o la lectura de los trazos de la escala. Los trazos de la escala deben ser nítidos, claros e indelebles.
3. En los termómetros de escala introducida no deben presentarse movimiento de ésta con respecto al tubo capilar.

#### Comprobación de los Parámetros Metrológicos.

1. La calibración de los termómetros se ejecuta desde las temperaturas más bajas a las más altas comenzando por el primer trazo de la escala. Los trazos de la escala que se comprueban,



dependiendo del valor de la división, se seleccionan de acuerdo a lo establecido en la siguiente tabla:

<b>Valor de división mínimo de división de la Escala</b>	<b>Los Trazos a Calibrar deben ser múltiplos de</b>
<b>0,01</b>	<b>1</b>
<b>0,02</b>	<b>2</b>
<b>0,05</b>	<b>5</b>
<b>0,1</b>	<b>10</b>
<b>0,2</b>	<b>10</b>
<b>0,5</b>	<b>50</b>
<b>1, 2, 5, 10</b>	<b>100</b>

Si la escala del termómetro que se calibra dispone de menos de tres trazos seleccionados mediante la tabla anterior, la calibración se realiza, en cualquier caso, en tres trazos (al inicio, al final y al medio de la escala).

2. En el caso que se emplee un termómetro patrón de líquido en vidrio, el valor de división de su escala no debe ser mayor que el valor de división de la escala del termómetro que se verifica.
3. La posición del trazo cero de la escala de los termómetros, se verifica antes y después de la calibración a la temperatura del punto de fusión del hielo. Los demás trazos se comprueban en baños termostáticos con un termómetro patrón previamente certificado.
4. La lectura del termómetro que se verifica se realiza cuando la temperatura en el termostato varía muy lentamente a un ritmo constante. La velocidad de aumento de la temperatura en los termómetros con valor de división menor que 0,5 °C. no debe exceder del valor de una división de la escala del termómetro por minuto. Para aquellos termómetros con valores de divisiones mayores que 0,5 °C, no excederá de dos (02) veces el valor de división de la escala por minuto.

5. Para la calibración de termómetros con valor de división menor o igual a 0,05 °C, se utilizan dos termómetros patrones. Los otros termómetros se calibrarán con la ayuda de un solo patrón.

Las lecturas se realizarán en el siguiente orden:

1. Lectura: tp1; t1; t2.....tn; tp2
2. Lectura: tp2; tn; .....t1;tp1
3. Lectura: tp2; tn; .....t1;tp1
4. Lectura: tp1; t1; t2.....tn; tp2

donde: tp es la temperatura de los termómetros patrones.

ti.....tn = temperatura de los termómetros a calibrar.

6. Se define el error absoluto de las indicaciones del termómetro a calibrar como la diferencia existente entre el valor promedio de las temperaturas indicadas por éste y la temperatura indicada por los termómetros patrones:

$$Ea = LI - LP$$

Los valores obtenidos para cada punto son comparados con los valores dados en las tablas anteriores, para determinar si el instrumento está dentro o fuera de las tolerancias.

En dichas tablas se establecen las tolerancias aceptadas. Para esto, se define la tolerancia de un termómetro como el máximo valor que podrá desviarse la indicación del mismo con respecto a la temperatura verdadera.

7. Se define la corrección de la escala del termómetro **C** como la diferencia que existe entre la temperatura del medio dentro del cual está sumergido el termómetro y la temperatura indicada por dicho termómetro.

$$C = LP - LI - Ea$$

En general, el valor de C resulta ser diferente para cada división de la escala del termómetro. Debido a ello, durante el proceso de calibración se determinan valores de C en varios puntos

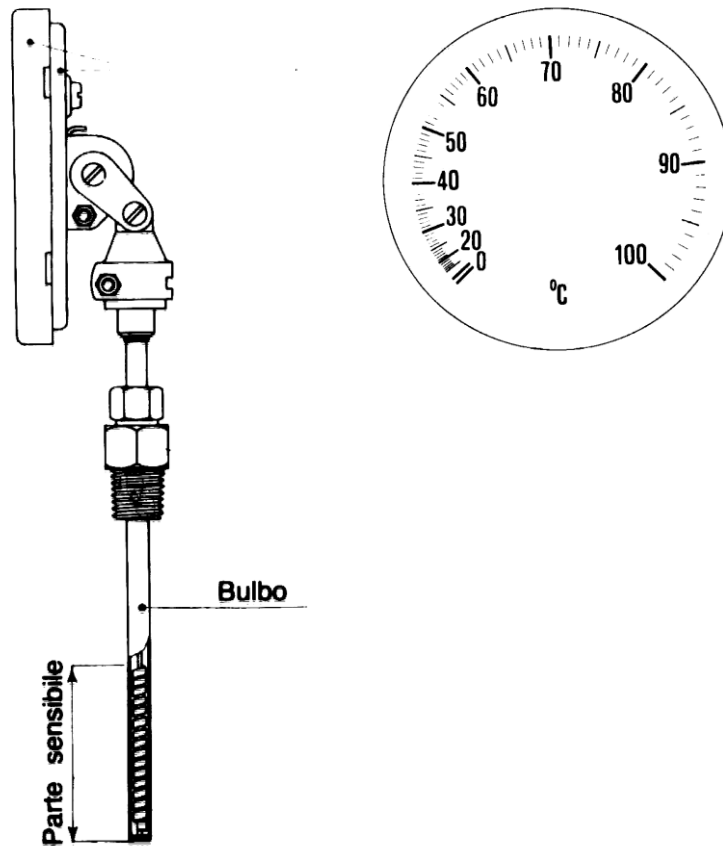
uniformemente distribuidos a lo largo de la misma, pudiéndose obtener los valores de C correspondientes a las restantes divisiones, mediante una adecuada interpolación. Una vez determinados los valores de C para los trazos seleccionados se obtiene entonces la tabla de calibración del termómetro. Además, deben hacerse las correcciones por otros parámetros establecidas en los puntos anteriores, estas son: corrección por inmersión, corrección por desviación del patrón, etc.

### ***Termómetros Bimetálicos***

El funcionamiento de estos termómetros se basa en la acción resultante de la dilatación, debida a la variación de temperatura, de dos metales diferentes unidos de forma conveniente para constituir el elemento primario del termómetro.

#### Clasificación De Los Termómetros Bimetálicos

Los termómetros bimetálicos se clasifican en.



*Figura 1. 7. Termómetro Bimetálico*

**Termómetros Bimetálicos de Tiras Soldadas:** Cuando dos tiras soldadas de distintos coeficientes de dilatación térmica y de igual longitud se fijan rígidamente entre sí mediante soldaduras, de manera que sus extremos coincidan, y la tira bimetálica resultante se mantiene fija en uno de sus extremos, resultará que cuando la temperatura varíe, el extremo libre de la tira bimetálica se deflexionará de acuerdo con la relación muy cercanamente lineal entre deflexión y temperatura.

Las variaciones de temperatura provocan variaciones de la curvatura de la tira bimetálica, de ahí que si uno de los extremos de dicha tira se mantiene fijo, el otro se desviará un cierto ángulo con respecto a su posición original. En este fenómeno se basa la construcción de los termómetros bimetálicos de tiras soldadas.

El invar es empleado universalmente como el metal de baja expansión térmica. Como metales de alta expansión térmica se usa el bronce en bajas temperaturas y aleaciones de níquel a altas temperaturas

Para proteger el elemento primario y la varilla de la corrosión y la ruptura se usa un tubo protector. El material del tubo de protección puede ser de bronce acero inoxidable u otras aleaciones dependiendo de los requerimientos de la instalación.

El intervalo de temperatura cubierto por los termómetros bimetálicos industriales es de -40 a 450 °C.

#### Errores Máximos Permisibles

La tolerancia de estos termómetros es de 1 % en toda la extensión de la escala.

#### Ventajas Y Desventajas De Los Termómetros Bimetálicos

1. Son fáciles de tomar las lecturas.
2. Son muy económicos.
3. No necesitan mantenimiento.
4. Son de baja precisión.
5. El rango de medición es limitado.

6. Requieren de un chequeo relativamente continuo por su poca capacidad para repetir las medidas.

**Verificación de Termómetros Bimetálicos:** Se calibran de la misma manera que los termómetros de líquido en vidrio, manteniendo el termómetro en la misma posición en la cual vaya a ser instalado. Se utiliza un patrón de vidrio que sea cinco veces más preciso que el termómetro a calibrar.

## Capítulo 3

## Termómetros de resistencia

***Teoría De Los Termómetros De Resistencia***

El termómetro de resistencia opera mediante el cambio de resistencia eléctrica de una sustancia con la temperatura. Generalmente dicha sustancia es un metal o materiales semiconductores pero también podrían usarse electrolitos. Por lo general la resistencia eléctrica de los metales aumenta con la temperatura, caso contrario al de los semiconductores y electrolitos los cuales experimentan una disminución fuerte.

El material utilizado como elemento primario (elemento sensor) del termómetro de resistencia debe tener una relación continua y muy estable entre la resistencia eléctrica y la temperatura. Además, el coeficiente térmico promedio debe ser relativamente alto. Esto se cumple en metales de alta pureza que tengan una conductividad eléctrica baja.

Los coeficientes de resistencia pueden variar considerablemente con la pureza del metal y con el tratamiento térmico que se le haya dado de hecho, la resistividad ha sido usada como una prueba para determinar impurezas. El elemento primario de los termómetros de resistencia es sensible a la contaminación y a la oxidación y, por tanto, requiere protección para evitar la variación de los coeficientes de resistencia.

La termometría de resistencia es la técnica más exacta en un amplio intervalo para la medición de temperatura. El éxito del termómetro de resistencia se debe primeramente a Calendar quien en 1886, rescato este método de medición de temperatura, de las dificultades ocasionadas por elementos que contaminaban al material.

Los sensores usados son hechos de platino, cobre, níquel, germanio o mezclas de óxidos metálicos (termistores). Para metales, la variación de la resistencia con la temperatura sigue en muchos casos una ley, que dentro de un intervalo limitado, se puede expresar aproximadamente como:

$$R_t = R_0 \left( 1 + A \cdot t + B \cdot t^2 \right) \quad \text{para } t \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.1)$$

$$R_t = R_0 \left[ 1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot (t - 100) \cdot t^3 \right] \quad \text{para } t < 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.2)$$

donde  $R_0$  es la resistencia en el punto de fusión del hielo, es decir, la resistencia del material a  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ .  $A$ ,  $B$  y  $C$  son coeficientes que dependen del metal. Para el platino, los coeficientes son aproximadamente:

$$A = 3,97 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$B = -5,87 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$$

$$C = -4,14 \cdot 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$$

Para el cobre, el coeficiente  $B$  puede despreciarse y la resistencia sigue aproximadamente una ley lineal

$$\frac{R_t}{R_0} = 1 + A \cdot t \quad \text{donde } A = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad (3.3)$$

Para el níquel, el coeficiente  $B$  es positivo y el coeficiente  $A$  es alto alrededor de  $5,6 \cdot 10^{-2}$ , pero el comportamiento de este metal es muy irregular sobre los  $200 \text{ } ^\circ\text{C}$ . La exacta dependencia de la resistencia eléctrica con la temperatura, deberá determinarse individualmente, ya que depende de la composición (pureza) del metal, del esfuerzo mecánico del cable, del tipo de soporte, etc.

### **Termómetro De Resistencia Patrón:**

Estos instrumentos son los medios básicos para la interpolación entre los puntos de la Escala Internacional de Temperatura de 1990 entre  $13,81 \text{ K}$  y  $961,78 \text{ } ^\circ\text{C}$ . El más común es del tipo de varilla larga que tiene una resistencia en el punto de fusión del hielo  $R_0 = 25$  (o  $25,5$ )  $\Omega$ , con una sensibilidad de  $0,1 \text{ } \Omega/\text{K}$ , construido con un alambre de  $110 \text{ cm}$  y  $0,075 \text{ mm}$  de diámetro.

El sensor tiene cuatro conductores y se disponen de manera tal que eliminen en lo posible las

inductancias, sobre todo si se van a colocar en un sistema de medición de corriente alterna. El aislamiento entre los conductores de un termómetro de  $25 \Omega$  debe ser mayor de  $70 M\Omega$  a  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ , si se quiere mantener esta contribución de error en menos de  $1 \text{ mK}$ .

Se puede usar entre los límites desde  $-200$  a  $+650 \text{ }^\circ\text{C}$  para trabajos criogénicos debajo de la temperatura del punto triple del hidrógeno. El termómetro de resistencia de platino se hace en forma de una cápsula corta.

La temperatura hasta los  $1\ 000 \text{ }^\circ\text{C}$  puede medirse con termómetros especiales que tienen una resistencia en el punto de fusión del hielo muy pequeña (de  $0,25$  hasta  $2 \Omega$ ), de manera de disminuir problemas con el aislamiento de alta temperatura. La pureza del platino de los termómetros patrones, debe ser tal, que el cociente entre la resistencia en el punto de ebullición del agua y la resistencia en el punto de fusión del hielo,  $R_{100}/R_0$  sea mayor que  $1,392\ 50$ .

Las fórmulas de interpolación entre los puntos fijos y las correcciones a ser usadas con este tipo de termómetros han sido publicadas por el BIPM.

Tales instrumentos casi siempre están acompañados por una tabla de cálculo donde se dan los valores de  $R_t/R_0$  como una función de la temperatura establecida de la calibración en puntos fijos seleccionados. La interpolación de estos valores en estas tablas permite la evaluación directa de la temperatura.

La estabilidad de los valores de  $R_t/R_0$  para los mejores termómetros patrones de platino es de aproximadamente  $0,001 \text{ K}$  por año a temperatura ambiente. Pero la resistencia debe determinarse con mucha frecuencia usando la celda del punto triple del agua.

Los termómetros patrones de platino, generalmente tienen una envoltura de sílice fundido (cuarzo), aunque algunos (patrones de referencia) tienen una envoltura de acero inoxidable. Debido a que los termómetros de resistencia de platino están hechos de un alambre libremente montado en pequeños tramos para prevenir tensiones, estos deben manipularse con mucho cuidado y prácticamente solo se usan para la calibración de otros termómetros o para medidas de gran exactitud de materiales de referencia.



### **Sensores de Resistencia Industriales**

Estos tienen una constitución mucho más robusta. El alambre le da vuelta a un núcleo que tiene aproximadamente el mismo coeficiente de expansión térmica que el platino; o de otra manera cada espira del alambre de platino es fijado con un material protector (vidrio) de una parte de diámetro, de manera tal que, el alambre puede expandirse libremente a lo largo de su diámetro.

Esos sensores a veces son protegidos del ambiente por un sellado hermético, con vidrio o con un esmalte de vidrio. El valor más frecuente de la resistencia en el punto de fusión del hielo, es de  $R_0 = 100 \Omega$ . Existe uno de construcción doble, compuesto de dos sensores de  $100 \Omega$ , colocados en el mismo envoltorio de manera tal que uno de los sensores sirva para medir y el otro para controlar la temperatura de un proceso dado.

### **Materiales de Fabricación**

Los materiales que se usan normalmente en las sondas de resistencia son el platino, el níquel y el cobre.

**Platino:** Los sensores de resistencia de platino permiten realizar medidas por debajo de  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ , con mayor exactitud que los termopares. Además, no tienen el problema con la junta de referencia, pero el valor de  $R_0$  debe ser revisado con frecuencia. Para mediciones de exactitud media y baja se cuenta con tablas de calibraciones normalizadas suministradas por el fabricante donde se da  $R_t = f(t)$  con tolerancias para valores de resistencia.

Se debe resaltar que las tablas normalizadas dadas por las organizaciones de Metrología internacionales para los sensores de resistencia de platino, no siempre presentan una ajustada compatibilidad con los sensores reales, ya que los fabricantes pueden usar materiales diferentes tanto en los cables como en el soporte. Esto trae como consecuencia que el resultado del cociente  $R_t / R_0$ , puede variar de valores de  $1,385$  (aleaciones de platino) hasta  $1,392$  (platino puro).

Para mayor exactitud es conveniente utilizar alguna forma de baños de calibración y un termómetro patrón de resistencia de platino para establecer de manera individual las tablas de  $R_t / R_0 = f(t)$ .

Si se adopta este procedimiento con algunos tipos de sensores de platino industriales, se obtiene una exactitud muy alta ( $0,01 K$  a temperatura ambiente). Los sensores, preferiblemente, deben calentarse y enfriarse hasta temperaturas extremas que establecerán el intervalo de uso: todo esto antes de usarlo normalmente.

La resistividad del platino a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  es de  $9,83\ \mu\Omega/\text{cm}$ . Su punto de fusión es de  $1\ 773\text{ }^{\circ}\text{C}$ . El límite superior de medición es de  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$  aproximadamente.

**Cobre:** Tiene una desventaja: a temperatura altas se cubre de oxido y por esta razón se usa solamente para temperaturas bajas (no mayores de  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Muchas veces se construyen resistencias de cobre para compensar las influencias de la temperatura variable en distintos circuitos eléctricos. Su resistividad a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  es de  $1,56\ \mu\Omega/\text{cm}$ . Su punto de fusión es de  $1\ 083\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**Níquel:** Su resistividad a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  es de  $6,38\ \mu\Omega/\text{cm}$ . Su punto de fusión es de  $1\ 455\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Se usa también para temperaturas bajas, que no sobrepasan a  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , en vista de que la relación resistencia versus temperatura del níquel tiene algunas irregularidades a temperaturas altas.

### Termistores

Los termistores son resistencias termosensibles, hechas de materiales semiconductores, generalmente óxidos metálicos. Su resistencia, en la mayoría de los casos decrece con la temperatura siguiendo la ley exponencial:

$$R = R_0 \cdot e^{-\beta \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

Donde:

$R_0$  resistencia a la temperatura de referencia

$T_0$  temperatura de referencia (frecuentemente  $298\text{ K}$ )

$B$  constante de ajuste, usualmente  $R$  cambia un  $4\%$  por kelvin.

Es importante resaltar que, a temperatura ambiente, el coeficiente de temperatura es negativo y muchas veces,  $10$  veces mayor que el del platino.

Estos sensores generalmente no son normalizados a la temperatura de fusión del hielo, su intervalo normal de temperatura se extiende desde -50 hasta +150 °C, y se puede alcanzar una estabilidad del orden de 0,01 K/año, si se tiene el cuidado de mantenerlo a temperatura ambiente. Los mismos son utilizados como dispositivos de control de temperatura.

Los termistores tienen una gran resistencia específica, entonces se pueden construir cuerpos sensibles de tamaños muy pequeños, con resistencia ohmica bastante grande. Esto es ventajoso por las siguientes razones:

- Tamaños pequeños significan reacción rápida del termómetro.
- Dada la gran resistencia ohmica de los termistores, la de los conductores que unen al termistor con el resto del circuito, así como sus cambios respectivos, se pueden despreciar.

### Elemento Primario Y Tubos Protectores

El elemento primario de los termómetros de resistencia se conoce también como bulbo de los termómetros de resistencia, o simplemente bulbo de resistencia.

Las conexiones de los alambres del bulbo resistencia se hacen cuidadosamente para evitar la resistencia de contacto y los efectos termoeléctricos.

La resistencia de contacto se evita mediante una soldadura adecuada. La aparición de fuerzas electromotrices de origen termoeléctrico puede evitarse asegurando el que todas las uniones en el circuito estén siempre en la misma temperatura. El poder termoeléctrico de las uniones del cobre y el platino o del cobre y el níquel es despreciable.

Los bulbos de los termómetros de resistencia se usan generalmente con un tubo de protección, excepto cuando se mide la temperatura de aire seco. En general, los cuerpos sensibles de los termómetros de resistencia se montan en un tubo de protección interno. Este tubo junto a una placa de bornes (conectada al cuerpo sensible) situada en el extremo superior, forman el cuerpo de medición.

En la siguiente figura (4.1) se muestra el cuerpo de medición con muelles usados en el caso en que este se meta dentro de un tubo de protección externo. El ajuste entre ambos tubos debe ser hermético para evitar la presencia de un espacio lleno de aire entre ambos. y por consiguiente la transmisión de calor por efecto de conducción es lenta. Otro tipo de cuerpo de medición, se ve en la figura (4.1.b) se llama cuerpo de medición fijo (no usa muelles) y se monta en los termómetros de barra sin tubo de protección externo.

Los termómetros pueden presentar complejos ensamblajes dependiendo de la característica del medio donde van a medir.

- En la figura 4.1.c tenemos un termómetro destinado para el montaje de un tubo de protección fija, este tipo de montaje se usa por ejemplo, en alguna maquinaria.
- En la figura 4.1.d se tiene un termómetro con un tubo de protección externo y con cuerpo de medición fijo.
- En la figura 4.1 .e se presenta un termómetro en forma de barra para montarlo en canales y recipientes a presión atmosférica.
- En la figura 4.1 .f se tiene un termómetro sin tubo de protección externa. Este se usa en sistemas en donde se necesita de una respuesta de medición rápida de un medio que no reacciona en forma agresiva contra el material del termómetro.

**Fig. 4.1.- Tubos de Protección para las termorresistencias**

### DISEÑO DE LOS ELEMENTOS PRIMARIOS CON TERMISTORES

Los elementos primarios con termistores se pueden construir de cualquier forma y tamaño. Se producen por ejemplo, termistores en forma de bolitas con diámetros de 0,15 a 15 mm. Para proteger el termistor propio contra la influencia de la humedad se cubre éste con una capa fina de vidrio (ver figura 4.2.a). La protección mecánica se hace introduciendo el elemento en un envase

de vidrio de tamaño pequeño (fig. 4.2.b).

Otro tipo se puede instalar directamente en el medio de medición (fig. 4.2.c). Aquí el termistor está colocado en el pico del tubo vítreo de protección. La pared en la cercanía del termistor es delgada para hacer la inercia térmica muy pequeña.

Para medir la temperatura en la superficie de algunos cuerpos y para mediciones sin contacto se aprovechan termistores en forma de una pastilla o folia. El diámetro de la pastilla puede ser de 1,5 a 30 mm y su altura de 0,8 a 6,5 mm (ver fig. 4.2.d)

Los termistores para mediciones industriales deben tener características reproducibles. Esto es un problema no resuelto definitivamente hasta hoy. Si es necesario cambiar un termistor de un termómetro, se debe cambiar el termómetro de nuevo, esto es, se deben establecer todos los parámetros de medición para cada termistor.

Los termistores tienen inercia térmica muy pequeña y por eso se pueden aprovechar para mediciones de temperaturas que varían rápidamente.

El intervalo de medición que cubren los termistores es de  $-50$  a  $150$  °C, con una estabilidad de  $0,01$ °C por año. Los mismos son muy utilizados en dispositivos de control de temperatura.

### **4.2.- Diversos tipos de Elementos primarios de termistores**

#### ***VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS TERMOMETROS DE RESISTENCIA***

- Alta repetibilidad en las mediciones.
- Amplio rango de medición.
- Bajo mantenimiento.
- Son versátiles.
- Requieren del manejo de personal técnico especializado.
- Necesitan de un equipo auxiliar para las lecturas.

**MEDICION DE LA RESISTENCIA**

El valor de la resistencia eléctrica de los sensores de resistencia o termorresistencias, se mide generalmente con puentes cuando se requiere de gran exactitud y precisión. Aunque es posible en principio, utilizar sistemas mas simples que constituyen los termómetros digitales, ohmímetros de alambres cruzados, etc.

La necesidad de la compensación de la resistencia  $R_0$  a una temperatura fija ( $0^\circ\text{C}$ ) hace muy conveniente a los puentes. La deriva, con el tiempo, de los componentes de estos puentes se puede eliminar, si el sensor se calibra con puente a una temperatura fija ( $0^\circ\text{C}$ ) a intervalos de tiempo regulares. Ya que solo se necesita establecer el cociente de los valores  $R_t / R_0$  debido a que las mediciones con un puente no muestran valores absolutos de resistencia.

Un problema común a las mediciones de alta precisión con termómetros de resistencia patrones y a las mediciones de media precisión con sensores industriales, es la influencia de la variación de resistencia de los cables del sensor. Estos conductores se hacen normalmente de cobre, metal que tiene un coeficiente de variación de temperatura de alrededor de 0,4% por K, así el mismo orden de variaciones que para el platino. La resistencia de los cables conductores debe mantenerse pequeña en comparación con la resistencia del sensor. Cuando es requerida una exactitud de 0,5 K o mayor, se necesita usar sensores que tengan cuatro terminales y puentes que sean adecuados para esa medición.

Para mediciones de las resistencias de platino se usan puentes dobles, como el de Kelvin o el de Smith tipo III. La resistencia de los conductores también puede compensarse usando un puente de Wheastone. Este método es usado en el bien conocido puente de Müller. Se puede usar un procedimiento similar sin la inversión del termómetro con un Interruptor de polo simple y una resistencia auxiliar.

Los puentes modernos son automáticos y usan un sistema inductivo (un comparador de corriente DC o un divisor inductivo AC de baja frecuencia), para mediciones de alta exactitud de la relajación de la resistencia a determinar, con respecto a una resistencia patrón. También se usan métodos de comparación potenciométricos.

Pueden hacerse mediciones de resistencia, usando sensores de resistencia industriales de platino y un puente de Wheastone similar al de Müller, pero con el termómetro en una posición fija. En este caso, sólo se necesitan, tres conductores para el termómetro. El montaje del puente es llamado puente de tres cables, generalmente vienen con un sistema de ajuste para hacerlas iguales a través de un procedimiento de inversión. Algunas firmas producen puentes especiales que tienen disponibles conexiones de cuatros hilos para sensores industriales.

En el laboratorio es fácil construir un sistema indicador de temperatura de regular exactitud si se dispone de un voltímetro digital o de un registrador potenciométrico sensible, además de una fuente estabilizada de voltaje regulable. El sensor de resistencia debe estar equipado con dos conductores extras para construir una resistencia de cuatro conductores. El registrador potenciométrico o el voltímetro digital se intercala en posición del indicador de cero.

El puente se coloca directamente a una fuente de voltaje DC estabilizada que se ajuste a 20 ó 10 volt, dependiendo de la corriente máxima que permita el sensor, tomando en cuenta los efectos de autocalentamiento (generalmente de 1 mA como máximo). La resistencia R debería tener la facilidad de ajustarse, ya que el puente debe ser ajustado en cero cuando el sensor se introduce en la solución de hielo fundido. El voltaje indicado por el potenciómetro compensador debe ser de alrededor de 40 mV a  $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Si la corriente en el termómetro es de 1 mA, es decir, el voltaje de la fuente es de 20 V, la indicación sólo será lineal en un intervalo limitado pero puede ser fácilmente calibrado.

## Capítulo 4

### TERMOMETROS TERMOELECTRICOS (TERMOPARES O TERMOCUPLAS)

Los instrumentos más comunes utilizados en la medición de temperatura son los termómetros termoeléctricos. Estos se conocen normalmente como termopares o termopares, aunque el termopar no es más que el elemento primario del termómetro termoeléctrico.

Cuando dos metales diferentes se unen de manera que uno de los extremos de uno de ellos queda soldado con uno de los extremos del otro, al calentarse la unión se establece una diferencia de potencial entre los dos extremos libres, la cual depende de la temperatura de la soldadura.

En la práctica los extremos libres se conectan a través de un conductor a un milivoltímetro o a un potenciómetro con el propósito de determinar la fuerza electromotriz (f.e.m.) generada por la diferencia de temperatura entre la junta de medición (soldadura) y la junta de referencia. La junta de referencia no es más que los dos puntos de conexión de los extremos libres con los conductores (alambre de cobre generalmente) o con los bornes del instrumento de medición. Además, la junta de referencia se mantiene a temperatura constante, o se utiliza un sistema de compensación que produce un efecto equivalente.

Los instrumentos de medición de la f.e.m. se pueden calibrar directamente en unidades de temperatura.

#### ***Teoría De Los Termómetros Termoeléctricos***

##### Fuerzas Electromotrices Térmicas

La transformación de energía eléctrica en calor, en una resistencia, es un proceso irreversible; es decir, no hay medio de recuperar el calor y convertirlo de nuevo en energía eléctrica. Existen, sin embargo, elementos de circuito en los cuales se produce calor a expensas de la energía eléctrica cuando la corriente circula en un sentido, mientras se produce energía eléctrica a expensas de calor cuando la corriente circula en sentido opuesto. En otras palabras, si



no se produjera más que este fenómeno sería posible enfriar el circuito haciendo circular una corriente por él.

### Fuerza Electromotriz Thompson

Supongamos que una varilla conductora es sostenida por aisladores y que un extremo de la misma se calienta, como indica la figura 4.1, de modo que se establezca un gradiente de temperatura a lo largo de la barra. Si imaginamos los electrones libres de la varilla como análogos a un gas, puede esperarse que la mayor temperatura de un extremo ocasionará un aumento de presión y una difusión de gas electrónico desde el extremo calentado.

La acumulación de carga negativa en el extremo más frío crearía un campo eléctrico dentro de la varilla en el sentido representado por el vector  $E_0$ . La difusión cesaría cuando la fuerza sobre los electrones, debida a este campo, tuviera un valor suficiente para compensar su tendencia a difundirse a causa de la diferencia de temperatura.

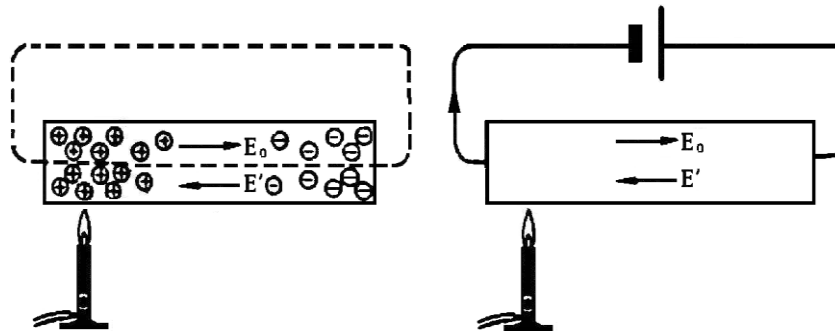
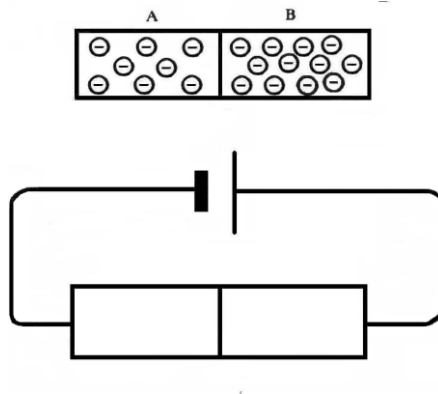


Figura 1. 8. Efecto Thomson

Cuando se ha alcanzado en la varilla el estado estacionario, los electrones de su interior están en equilibrio. El campo electrostático ejerce una fuerza sobre los electrones en un sentido y se puede considerar que la diferencia de temperatura origina un campo equivalente que los impide en sentido opuesto.

### Fuerza Electromotriz Peltier

Cuando dos conductores distintos a la misma temperatura se ponen en contacto como indica la figura 4.2; habrá una difusión de electrones del uno al otro al menos que el gas electrónico dentro de cada uno tenga la misma presión



*Figura 1. 9. Efecto Peltier*

La soldadura de ambos metales da origen a la f.e.m Peltier. Esta f.e.m. depende de ambos metales y de la temperatura de soldadura entre ellos.

Las f.e.m. Peltier, al igual que las de Thompson, son de un orden de magnitud de algunos milivolt.

### Fuerza Electromotriz Seebeck

Consideremos a continuación un circuito cerrado por dos metales diferentes A y O como lo indica la figura 4.3; las dos soldaduras se encuentran a temperaturas  $T_1$  y  $T_2$ . Hay necesariamente un gradiente de temperatura en ambos metales, de modo que se crea una f.e.m. Thompson en cada uno. Dado que las soldaduras están a temperaturas distintas, la f.e.m. Peltier en las soldaduras es distinta. La f.e.m. neta en el circuito, es la suma algebraica de las dos f.e.m. La fuerza electromotriz neta no es, en general, nula y, por consiguiente, existe una corriente en el circuito mientras ambas soldaduras estén a temperaturas distintas.

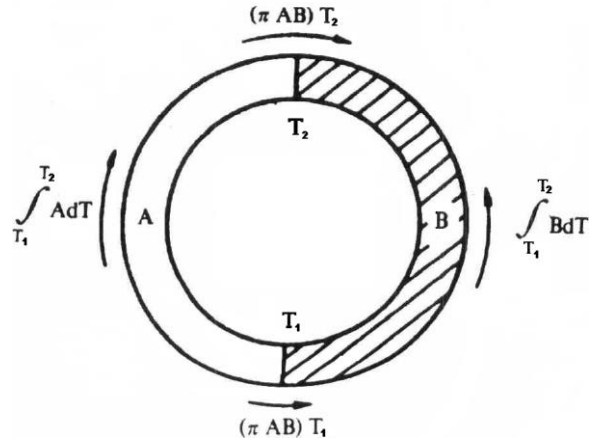
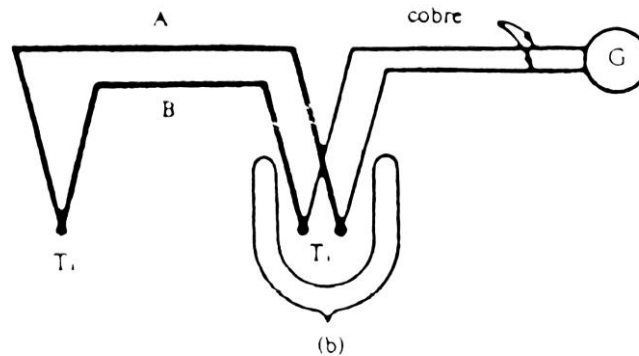


Figura 1. 10. Efecto Peltier Y Thompson En Un Par Termoeléctrico

La f.e.m. de un par termoeléctrico no es nunca muy grande, aún con grandes diferencias de temperatura entre las soldaduras, y el efecto no constituye un procedimiento práctico de obtener directamente energía eléctrica a partir del calor. Sin embargo, los pares termoeléctricos tienen un gran valor práctico como medio de medir temperaturas. La f.e.m. del par depende de la temperatura de las soldaduras, si se mide, por consiguiente, la f.e.m. manteniendo una soldadura a una temperatura conocida, puede determinarse la temperatura de la otra.

Puede intercalarse en un circuito termoeléctrico, como en la fig. 5.3, un metal intermedio D, sin modificar la f.e.m., siempre que los extremos de D se encuentren a igual temperatura.

Figura 1. 11. Interposición de un metal intermedio en un par termoeléctrico



El circuito del par termoeléctrico ordinario, presentado en la figura 4.4, utiliza este hecho.

Los metales A y B pudieran ser el níquel y el hierro, conectados por hilos de cobre a un galvanómetro G, que ocupa una posición adecuada. Una soldadura se encuentra a la temperatura  $T_2$  a medir, y la otra a la temperatura  $T_1$  que puede mantenerse fija ( $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , en hielo en un vaso Dewar).

La f.e.m. de un par termoeléctrico suele medirse como indica la fig. 5.4; intercalando un galvanómetro o un voltímetro en un punto adecuado. Debe utilizarse un instrumento de resistencia elevada o lo que es preferible, un potenciómetro.

### Características Que Deben Tener Los Materiales De Construcción De Los Termopares

Teniendo en cuenta el intervalo de temperatura, las condiciones del ambiente en que será usado, se seleccionará el material del termopar. Sin embargo, se desea que cualquier combinación de metales escogida reúna las siguientes propiedades:

1. Relación f.e.m.-temperatura lineal en el rango usado.
2. Gran fuerza termoeléctrica por grado de cambio de temperatura. Esto posibilita el uso de instrumentos simples y más robustos.
3. Mantener su característica durante largo tiempo, por lo cual el metal debe ser lo más puro posible.
4. Resistencia mecánica a altas temperaturas y resistencia química a la oxidación, envenenamiento, contaminación, etc.

Las combinaciones de metales más usados son las siguientes:

#### Cobre - Constantán (Tipo "T")

Símbolo: Cu - Ko

Composición: Rama positiva, Cobre de pureza electrolítica

Rama negativa, Constantán (58 % Cu, 42 % Ni).

Intervalo:  $-200$  a  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ . No se usa a temperaturas mayores pues el Cu se oxida rápidamente.

Características: es barato, es el más conveniente para medir temperaturas bajas,

especialmente bajo cero. Tiene gran fuerza termoeléctrica (aproximadamente  $42,8 \mu V/^{\circ}C$  en el intervalo de  $0$  a  $100^{\circ}C$ ). El alambre de cobre tiene la desventaja de una alta conductividad térmica.

#### Hierro - Constantán (Tipo "J")

Símbolo: Fe - Ko.

Composición: Rama positiva: Hierro puro

Rama negativa: Constantán

Intervalo:  $0$  a  $750^{\circ}C$ .

Características: Debe usarse en atmósfera reductora donde haya deficiencia de oxígeno libre ya que el alambre de hierro se oxida fácilmente. Por encima de  $700^{\circ}C$  la velocidad de oxidación crece y deben usarse alambres con mayor diámetro. Produce gran fuerza termoeléctrica (alrededor de  $56,4 \mu V/^{\circ}C$  en el intervalo usual). Los dos metales son mecánicamente fuertes, de conductividad térmica moderadamente baja. Es barato.

#### Cromel - Aluminio (Tipo "K")

Símbolo; Ch - A

Composición: Rama positiva: Cromel ( $89\% Ni$ ;  $9,8\% Cr, Fe, Mn...$ )

Rama negativa: Alumel ( $96\% Ni$ ;  $2\% Al, Si, Fe, Mn..$ )

Intervalo:  $0$  a  $1100^{\circ}C$ .

Características: Es muy usado en atmósferas oxidantes, donde haya exceso de oxígeno libre, particularmente a altas temperaturas. Ambos materiales poseen conductividad térmica baja. La fuerza termoeléctrica es alta y aproximadamente uniforme dentro de un amplio intervalo de temperatura (alrededor de  $41,5 \mu V/^{\circ}C$ ) en el intervalo usual de  $600$  a  $900^{\circ}C$ ). En la mayoría de los países europeos este termopar es conocido con el nombre de níquel, cromo-níquel y se representa por el símbolo Ni Cr-Ni.

#### Platino - Platino/Rodio (Tipo "R" y "S")

Símbolo: Pt - Pt/Rh

Composición: Rama positiva: Platino-rodio ( $90\% Pt$  y  $10\% Rh$ ; tipo S ó  $87\% Pt$  y  $13\% Rh$ ; tipo R).

Rama negativa: Platino de alta pureza.

Intervalo: 0 a 1 450 °C.

Características: A pesar de la repetibilidad y reproducibilidad de estos termopares, estos no son muy comúnmente utilizados en la industria debido a que su fuerza termoeléctrica es relativamente baja (alrededor de  $12 \mu V/^{\circ}C$  en el rango usual de 1 100 a 1 600 °C, y de  $13,8 \mu V/^{\circ}C$  en el mismo intervalo para la combinación de Pt-Pt/Rh al 13 %).

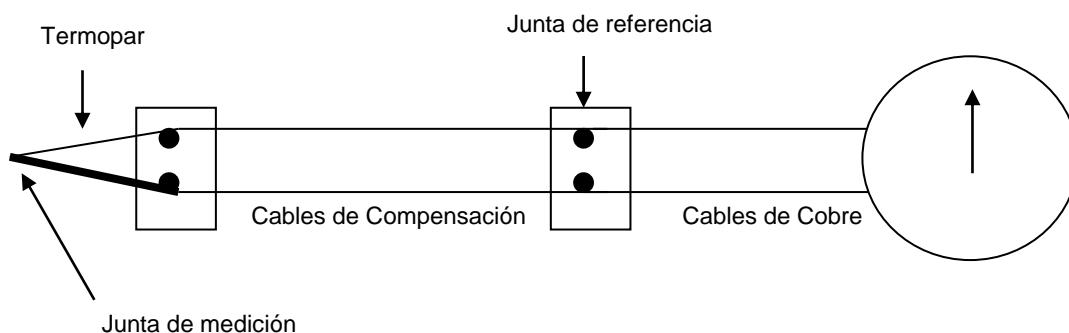
Este termopar es afectado por atmósfera que contenga gases reductores por lo cual debe ser protegido con tubos de cerámica, herméticos, a temperaturas mayores de 1 000 °C. La conductividad térmica de ambos materiales es moderadamente baja. Son muy costosos en comparación con los otros tipos.

### **Métodos De Medición De La F.E.M. Generada Por Los Termopares**

Para la medición de la f.e.m, producida por un termopar, se utilizan dos métodos:'

#### **Método De Desviación**

Emplea un milivoltímetro que por desviación directa indica la f.e.m. generada por el termopar. Algunos de estos instrumentos están equipados con un control de temperatura. Los instrumentos son calibrados contra tablas modelos, los cuales dan la f.e.m. del termopar dentro de ciertas tolerancias.



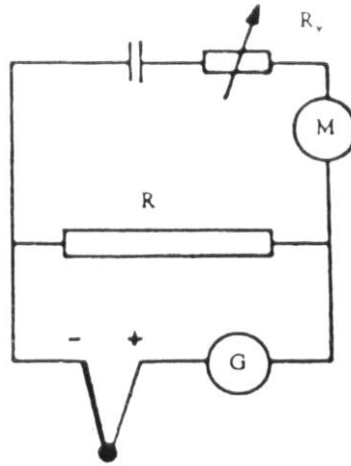
*Figura 1. 12. Circuito Típico Del Método De Desviación*

#### **Método De Compensación**

Se conocen dos modalidades de este método:

##### Con Corriente Variable

La f.e.m. producida por el par se compara con la tensión que produce una corriente que atraviesa la resistencia  $R$  que es constante. La intensidad de esta corriente se ajusta con una resistencia

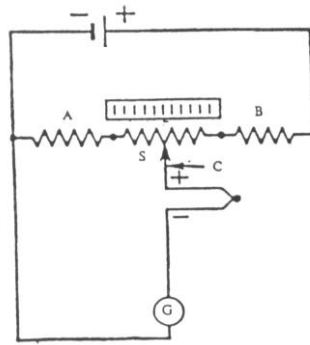


variable  $R_v$  hasta que el galvanómetro  $G$  indique cero. En ese instante el miliamperímetro  $M$  indica la magnitud de la corriente o los grados en unidades de temperatura correspondientes.

*Figura 1. 13. Método de Compensación con Corriente Variable.*

#### Con Corriente Constante, De Balanceo Nulo o Método de Cero

La batería suministra un voltaje sobre las resistencias  $A$ ,  $S$  y  $B$ . La caída de potencial a través de la resistencia  $S$  es conocida, el potencial correspondiente a cada posición del cursor tiene un valor conocido que se compara contra la f.e.m producida por el termopar. Cuando exista un potencial desconocido en el termopar, fluirá una corriente por el circuito del mismo si los potenciales conocidos y desconocidos son diferentes, y la aguja del galvanómetro de cero  $G$ , no necesita ser calibrado, se moverá en una u otra dirección según el flujo de corriente. Puede agregarse una escala a la resistencia variable  $S$  y la posición del cursor  $C$  sobre la escala puede calibrarse para la f.e.m. del termopar o en unidades de temperatura.



*Figura 1. 14. Método de Medición con Corriente Constante.*

### Ventajas Y Desventajas De Los Termopares

1. Son fáciles de instalar.
2. Son muy Económicos.
3. Tienen amplio rango de trabajo.
4. Son versátiles.
5. No requieren Mantenimiento.
6. Son de corta vida útil.



## Capítulo 5

### **PIROMETROS DE RADIACION**

Para medir temperaturas superiores a los  $1\ 000\ ^\circ\text{C}$  no se pueden utilizar los termómetros estudiados anteriormente; con la excepción de algunos arreglos especiales basados en principios de los termómetros termoeléctricos. Para estas altas temperaturas se emplean los Pirómetros de Radiación que tienen como fundamento la determinación de la temperatura por medio de la energía radiante de los cuerpos calientes.

Cuando se calienta un objeto, éste emite, en primer lugar, radiaciones de larga longitud de onda. A medida que la temperatura se eleva, esta emisión de radiación esta compuesta por longitudes de onda siempre más cortas, hasta que se llega a una temperatura donde el objeto alcanza su máxima intensidad de radiación.

Las principales ventajas de la aplicación de los Pirómetros Ópticos y de Pirómetros de Radiación Total son las siguientes:

1. No necesita un contacto directo entre el cuerpo cuya temperatura se desea medir y el elemento primario del Pirómetro.
2. La medición de la temperatura es relativamente Independiente de la distancia entre el Pirómetro y el cuerpo caliente sujeto a medición.
3. El cuerpo cuya temperatura se mide puede estar estacionario o en movimiento.
4. Puede medir temperaturas extremadamente altas.

La reproducibilidad obtenida en la medición con Pirómetros es muy buena. Estos Instrumentos se utilizan principalmente para medir temperaturas mayores a  $1000\ ^\circ\text{C}$ . No obstante, usando elementos primarios muy sensibles, capaces de detectar pequeñas cantidades de radiación, pueden medirse con ellos temperaturas tan bajas como  $-25\ ^\circ\text{C}$ .

En forma general se puede decir que no hay una temperatura superior que limite la utilización de los medios de medición basados en la radiación.

## **Leyes de la Radiación**

La energía radiante, es la energía transmitida en forma de ondas electromagnéticas. Para diferentes intervalos se conocen como radiación de radio de radar; radiación infrarroja, luminosa y ultravioleta, radiación de rayos X y de rayos gamma.

Un cuerpo negro es el que absorbe toda la radiación que incide sobre él, sin transmitir ni reflejar ninguna. En otras palabras, un cuerpo negro radia energía en todas las longitudes de onda del espectro a un régimen máximo en correspondencia con su temperatura. El concepto de cuerpo negro es muy importante, pues es la base de las leyes de la Radiación.

Es conveniente aclarar que en la práctica no es posible conseguir un cuerpo que se comporte exactamente como el cuerpo negro teórico definido anteriormente. Este último, es un cuerpo cuyo coeficiente de absorción es igual a la unidad para cada longitud de onda cualquiera que sea la temperatura absoluta. El coeficiente de absorción total  $\alpha_t$ , se define como la relación entre la energía absorbida y la energía radiante incidente.

El cuerpo que más se aproxima al cuerpo negro teórico es el negro de humo, cuyo coeficiente de absorción es de 0,98. Para un cuerpo de poder reflector total, este coeficiente es igual a 1. No obstante, en la práctica se constituyen elementos que por sus características geométricas se comportan muy aproximadamente como cuerpos negros y prácticamente se les considera como tales.

Hay dos principios que son utilizados para la construcción de los instrumentos de medición de temperatura que aprovechan el fenómeno de la radiación:

Primero: se puede medir la energía total de la radiación que emana de un cuerpo caliente de este modo se obtendrá un Pirómetro de Radiación Total, este está destinado a recibir la máxima cantidad de energía radiante en el intervalo más amplio posible de longitudes de onda.

Segundo: se puede medir la intensidad de radiación espectral a una longitud de onda determinada, a partir de la energía radiada desde un cuerpo caliente.

## ELEMENTOS RECEPTORES DE RADIACIÓN

El propósito de un elemento primario para los Pirómetros de radiación es convertir la energía radiante proveniente del cuerpo caliente en una indicación sensible de la temperatura de dicho cuerpo.

Los elementos primarios de uso más comunes, por las ventajas que ofrecen, son los termopares en la forma de una termopila, o de un termopar al vacío y las termorresistencias en la forma especial de un bolómetro.

La termopila consiste en un cierto número de termopares conectados en serie, cuyas juntas de medición han sido aplanadas y ennegrecidas con el propósito de lograr una mejor absorción de la radiación. La termopila puede poseer varias juntas de medición, aunque es común el uso de ocho (08) a dieciséis (16). La junta de referencia, común a todos los termopares, se localiza en el anillo exterior. Este elemento opera a partir de la energía radiante que incide sobre él. Para condiciones de estado estacionario, el incremento real de la temperatura de la junta de medición depende de:

1. La cantidad de energía radiante recibida.
2. Las pérdidas de calor por radiación y conducción a partir de la termopila.

**Fig. 6.1.- Termopila**

La termopila puede calibrarse usando la relación entre energía radiante absorbida versus f.e.m. de salida y puede usarse con un potenciómetro balanceado automáticamente de la misma forma en que se usa un termopar.

El termopar de vacío, consiste en una envoltura de vidrio en cuyo interior, se ha hecho vacío, está soportado un sólo termopar de alambres finos. La junta de medición del termopar lleva una lámina pequeña cubierta de negro platino, la cual se coloca en el centro de la envoltura de vidrio. La junta de referencia se localiza generalmente en la base de la unidad. Cuando la energía radiante pasa a través de la envoltura de vidrio e incide sobre la junta de medición, la temperatura

de ésta se incrementa por encima de la temperatura de la junta de referencia; entonces aparece una f.e.m.. Las pérdidas de calor del termopar por conducción y convección se reducen grandemente por el uso de una envoltura con alto vacío en su interior y por la utilización de alambres finos en la construcción del termopar.

**Fig. 6.2.- Termopar de Vacío**

El Bolómetro es una termorresistencia que generalmente se construye con una tira de una lámina de níquel de aproximadamente 0,1  $\mu\text{m}$  de espesor. El largo de la tira es de aproximadamente 1,2 cm y tiene un ancho suficiente para dar una resistencia aproximadamente de 10 ohm. Este elemento se cubre con una capa de negro humo para incrementar su coeficiente de absorción. El aumento de temperatura de la tira depende de la cantidad de energía radiante absorbida y de las pérdidas de calor de radiación y conducción. El cambio resultante de la resistencia puede ser determinado mediante un puente de Wheatstone e indicado como por un termómetro de resistencia.

**Fig. 6.3.- Bolómetro**

### ***Pirómetros de Radiación Total***

El Pirómetro de Radiación Total, utiliza la energía radiada del cuerpo en observación para calentar su elemento receptor de radiación o elemento primario. Las radiaciones emitidas por el cuerpo caliente son concentradas sobre la superficie receptora del elemento primario y esto hace que la temperatura de éste se eleve. Esta elevación de temperatura es una magnitud con la cual se puede determinar la temperatura que se quiere conocer, dado que los termopares al vacío y las termopilas son los elementos primarios que se usan en los Pirómetros de radiación total.

En el Pirómetro de Radiación Total presentado en la fig. 6.4, la f.e.m. generada por el par termoeléctrico es proporcional a la temperatura de la superficie receptora que está en contacto directo con la junta de medición y por consiguiente, a la temperatura del cuerpo en observación. Las radiaciones del cuerpo caliente son concentradas por el lente objetivo y el diafragma sobre la lámina P soldada a la junta de medición del par termoeléctrico. En general, la lámina esta cubierta

de una capa de negro de humo con el propósito de que se comporte prácticamente como un cuerpo negro. El galvanómetro G graduado directamente en unidades de temperatura, está conectado a los bornes del par termoeléctrico.

#### **Fig. 6.4.- Pirómetro de Radiación Total**

Para dirigir correctamente el Pirómetro se usa un visor instalado detrás del elemento receptor de radiación utilizando para ello la lente ocular y un filtro F. En caso de una intensidad exagerada de luz, se interpone delante de la lente ocular el modificador M.

La lente objetivo absorbe ciertas radiaciones, es por este motivo que las lentes de vidrio no pueden utilizarse para temperaturas inferiores a 430 °C.

En otras formas constructivas (fig. 6.5) la lente objetivo es reemplazada por un espejo cóncavo que refleja las radiaciones y las concreta sobre la plaquita receptora P. El diafragma limita la abertura del aparato. El ocular permite el enfoque correcto del cuerpo caliente. Esta construcción tiene la ventaja de que el espejo no absorbe radiación alguna

#### **Fig. 6.5.- Pirómetro de Radiación Total de Espejo**

El Pirómetro de Radiación Total es particularmente útil para medir temperaturas de objetos en movimiento, como lingotes en un tren de laminación. Reemplaza también, por lo general a los termopares, donde los materiales de éstos puedan resultar dañados por la atmósfera del horno. Mide temperaturas que están fuera del rango de cualquiera de los termopares comerciales comunes. El Pirómetro de Radiación responde con más rapidez que el termopar convencional a los cambios de temperaturas.

### ***CORRECCIONES DE LAS LECTURAS EFECTUADAS CON LOS PIROMETROS DE RADIACION TOTAL***

Las mediciones efectuadas con los Pirómetros de radiación son verdaderas tan solo en el caso que el cuerpo cuya temperatura se mide radia como un verdadero cuerpo negro.

En realidad, la mayoría de los cuerpos no radian como cuerpos negros, la temperatura que se mide es inferior a la temperatura absoluta verdadera; es pues, indispensable una corrección de la lectura efectuada con este instrumento.

Cuando se conoce la emisividad total de la superficie del cuerpo cuya temperatura se mide, se puede corregir las lecturas del pirómetro con la siguiente fórmula:

donde:

= temperatura absoluta verdadera.

$T_a$  = temperatura aparente del cuerpo.

= emisividad total de la superficie del cuerpo (dada en tablas)

#### PIROMETROS DE RADIACION

##### Emisividad Total (~>

Material	Temperatura (°C)	Emisividad Total
Aluminio con chapa pulida	23	0,040
<u>Acero dulce fundido</u>	<u>1 600 - 1 800</u>	<u>0,28</u>
<u>Acero moldeado</u>	<u>800 - 1 000</u>	<u>0,52-0,56</u>
<u>Acero cromo-niquel</u>	<u>100 - 1 000</u>	<u>0,64-0,76</u>
Carbono fil de lámpara	1 080 - 1 400	0,53
Cobre fundido brillante	1100	0,15
Hierro fundido	1 300	0,29
Hierro con cha~a	900 - 1 000	0,55-0,60
~de Humo	100-200	0,96
Plata pulida	40 - 370	0,022 - 0,031
Platino filamento	27 - 227	0,036 - 0,192
<u>Oro pulido</u>	630	0,035
Ladrillo refractario	600 - 1 000	0,75
<u>Wolframio filamento</u>	<u>3 115</u>	0,39

<u>Schamotte</u>	<u>600 - 1 000</u>	0,75
Porcelana barnizada	<u>20</u>	0,92
<u>Agua</u>	<u>20</u>	0,96
Amianto	<u>20</u>	0,96
<u>Cuerpo negro</u>	<u>todas</u>	<u>1</u>

### ***CALIBRACION DE PIROMETROS DE RADIACION TOTAL***

Al igual que todos los instrumentos de medición, el pirómetro de radiación total debe controlarse cada cierto tiempo, para que sus indicaciones sean confiables. Para este fin, en la pared de un horno de laboratorio (cuanto más profundo mejor), delante de la puerta y por un orificio previamente practicado, se coloca un termopar de tal modo que tan solo su vaina de material refractario asome en el interior del horno (ver fig. 6.6). Lo mejor es un termopar de platino-platino/rodio colocado en el fondo de una vaina corta.

Después de calentar bastante el horno, se apaga y mediante el pirómetro a calibrar, se dirige el visual hacia la vaina, se procede a su lectura, mientras que, simultáneamente, se leen las indicaciones del par termoeléctrico.

Con los datos tomados se traza la curva de calibración o se confecciona una tabla de corrección.

**Fig. 6.6.- Calibración del Pirómetro de Radiación Total**

### ***Pirómetro Óptico o de Radiación Parcial***

El Pirómetro óptico se usa para obtener, con muy buena precisión, lecturas localizadas de la temperatura de los lingotes de un tren de laminado, de coladas o sangrías de metal derretido y del vidrio en los crisoles. Se utiliza también, donde se tiene que medir temperaturas muy altas, temperaturas de filamento y de otros cuerpos pequeños, fundamentalmente en el rango de 600 a 2 800 °C. La mayoría de los Pirómetros ópticos se operan manualmente y, por consiguiente su aplicación se ve algo limitada.

## PIROMETRO DE RADIACIÓN PARCIAL A DESAPARICIÓN DE FILAMENTO

En el pirómetro de desaparición de filamento, la luz procedente del cuerpo radiante penetra en el aparato por la lente convergente (Fig. 6.7). Entre la lente objetivo y la del ocular, está intercalado el filamento de una lámpara de incandescencia. Para obtener la luz monocromática necesaria, se interpone entre la lente ocular y el ojo del observador un filtro de color rojo que deja pasar solamente las radiaciones de  $0,65 \mu\text{m}$ , que corresponden al color del filtro. El filamento de la lámpara está conectado en serie con una resistencia variable  $R_v$ , un miliamperímetro  $G$  y una batería.

**Fig. 6.7.- Pirómetro de Radiación Parcial a desaparición de Filamento**

Al proceder a una determinación de temperatura, se enfoca el objeto cuya temperatura se quiere medir, se regulan las lentes de manera que se vean perfectamente enfocadas las imágenes del filamento oscuro y el objeto caliente. Cuando se alimenta la lámpara con la corriente de la batería, el filamento cambia de color y se le verá destacar menos oscuro sobre el fondo claro; hasta que actuando sobre la resistencia variable, se da la corriente exacta para que desaparezca la imagen del filamento al confundirse con el fondo. Por consiguiente, la corriente representa una magnitud para determinar  $t$  temperatura. El miliamperímetro puede graduarse directamente en grados de temperatura.

Otro procedimiento consiste en no variar la intensidad que atraviesa el filamento de la lámpara, pero si modificar la energía radiada recibida de la fuente calorífica mediante un filtro de opacidad variable. (ver fig. 6.8)

**Fig. 6.8.- Pirómetro de Radiación Parcial de Corriente Constante**

El filtro constituido por un vidrio ahumado de espesor variable en forma de cuña, interpuesto entre la lente objetivo y la lámpara patrón, puede desplazarse perpendicularmente al eje óptico del aparato.



CORRECCIONES DE LAS LECTURAS EFECTUADAS CON LOS PIROMETROS DE  
RADIACION PARCIAL

Dadas las características de los Pirómetros de radiación parcial u ópticos en las correcciones de las lecturas se debe emplear la emisividad espectral o monocromática ~

**Emisividad Monocromática para  $\lambda = 0,65 \mu\text{m}$**

**MaterialFactor**

Ajuminio con chapas	0,1 a 0,4
Baño de sal (700 a 1 400 °C)	0,8
Caliza	0,8 a 0,9
Cobre fundido brillante	0,15
Carbón	0,85
Castina	0,9 a 1,0
Escoria líquida (1 300 a 1 500 °C)	0,9 a 1,0
Grafito en polvo	0,95
Hierro oxidado (800 a 1 200 °C)	0,8 a 0,9
Ladrillo calcinado rugoso a 1100 °C	0,85
Ladrillo refractario (600 a 1 000 °C)	0,8 a 0,85
Níquel fundido brillante	0,3 a 0,4
Oro fundido brillante	0,22
Plata brillante (300 a 600 °C)	0,05 a 0,02
Platino sólido brillante	0,3 a 0,4
Plomo fundido brillante	0,5 a 0,6
Plomo fundido con escorias	1
Zinc oxidado por calentamiento 400 °C	0,11

**VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS PIROMETROS DE RADIACION**

1. Miden temperaturas muy altas.

2. Miden temperaturas a distancia.
3. Son muy costosos.
4. Requieren de alto mantenimiento.
5. Deben ser operados por personal especializado.

## Capítulo 6

### ESQUEMA DE TRANSMISION DE LA UNIDAD DE TEMPERATURA

#### *Trazabilidad De La Unidad De Temperatura*

Para poder transmitir la unidad de temperatura, se requiere de equipos, instrumentos e instalaciones que son excesivamente costosos; generalmente estos patrones de gran precisión los tienen los Institutos de Metrología que poseen un nivel avanzado en cuanto a lo referente a la medición de esta magnitud.

Estos Institutos están es capacidad de reproducir con facilidad, cualquier punto fijo de la Escala Internacional y de allí garantizar la confiabilidad de las mediciones obtenidas.

Para realizar la trazabilidad desde los patrones Primarios hasta los medios de medición en la industria, se requiere de un repertorio de equipos con muy buenas características metrológicas, los cuales son:

#### Puntos Fijos

1. Punto triple del Hidrógeno (13,803 3 K = -259, 346 7 °C)
2. Punto triple del Neón (24,556 1 k = -248,593 9 °C)
3. Punto triple del Oxígeno (54,358 4 K = -218,791 6 °C)
4. Punto triple del Argón (83,805 8 K = -189,344 2 °C)
5. Punto triple del Mercurio (234,315 6 K = -38,834 4 °C)
6. Punto triple del agua (273,16 K = 0,01 °C)
7. Punto de solidificación del Galio (302,914 6 1 = 29,764 6 °C)
8. Punto de solidificación del Indio (429,748 5 1 = 156,598 5 °C)
9. Punto de solidificación del Estaño (505,078 1 = 231,928 °C)
10. Punto de solidificación del cinc (692,677 K = 419,527 °C)
11. Punto de solidificación del Aluminio (933,473 K = 660,323 °C)
12. Punto de solidificación de la Plata (1 234,93 K = 961,78 °C)
13. Punto de solidificación del Oro (1 337,33 K = 1 064,18 °C)

14. Punto de solidificación del Cobre ( $1\ 357,77\ K = 1\ 084,62\ ^\circ C$ )

#### Termorresistencias De Platino

1. Juego de Resistencias de Platino con Cápsula para el intervalo de  $13,8$  a  $273,16\ K$ .
2. Juego de Resistencias de Platino con Vástago para el intervalo de  $-189$  a  $420\ ^\circ C$ .
3. Juego de Resistencias de Platino con Vástago para el intervalo de  $0$  a  $962\ ^\circ C$ .

#### Indicadores De Temperatura

1. Puente de Resistencia (Mueller) con exactitud de  $0,1\ mK$ .
2. Termómetro de Resistencia de Platino con intervalo de  $-100$  a  $400\ ^\circ C$ , con precisión de  $0,01\ ^\circ C$ .
3. Termómetro de Resistencia de Platino con intervalo de  $-200$  a  $800\ ^\circ C$ , con precisión de  $0,05\ ^\circ C$ .
4. Juego de termómetros de vidrio con intervalo de  $0$  a  $60\ ^\circ C$  con  $0,01\ ^\circ C$ .
5. Juego de termómetros de vidrio con intervalo de  $-40$  a  $300\ ^\circ C$  con  $0,1\ ^\circ C$ .
6. Termómetros de termopar platino/platino-rodio al  $10\%$ , con intervalo de  $0$  a  $1\ 700\ ^\circ C$ .
7. Juego de termómetros de vidrio con intervalo de  $0$  a  $600\ ^\circ C$  con  $0,2$  y  $0,5\ ^\circ C$ .
8. Juego de termopares tipo:  $J, K, T, E, R, S$ , etc.

#### EQUIPOS AUXILIARES

1. Baños termostáticos (varios intervalos) estabilidad  $0,01; 0,05$  y  $0,5\ ^\circ C$  con intervalos desde  $100$  a  $600\ ^\circ C$ .
2. Hornos tubulares de calentamiento, con un intervalo de  $500$  a  $2\ 000\ ^\circ C$  y una estabilidad de  $0,5; 1$  y  $2\ ^\circ C$ .