
Capítulo 3: Elementos sensores y transductores de temperatura

En el presente capítulo se describen los conceptos de temperatura, medición de temperatura, así como la descripción de las características y especificaciones de varios elementos sensores y transductores de temperatura.

3.1 CONCEPTO DE TEMPERATURA

Se considera que la temperatura es un concepto intuitivo que nos indica cuando un cuerpo está “caliente” o “frío”; según la segunda ley de la termodinámica, la temperatura se relaciona con el calor, porque se sabe que el calor fluye sólo de un cuerpo con alta temperatura a otro con baja temperatura, en ausencia de otros efectos.

Específicamente, la temperatura es una medida del promedio de la energía cinética de las partículas en una unidad de masa, expresada en unidades de grados en una escala estándar.

Se le considera también una variable de estado, la cual, junto con otras variables, como la masa, capacidad térmica específica, describe el contenido de energía de un cuerpo.

En un contexto físico, el calor es la medida de la cantidad de energía intrínseca contenida en un cuerpo debida al movimiento aleatorio de sus moléculas y sus átomos; de la misma forma que la energía mecánica poseída por un cuerpo aumenta con el incremento de su velocidad, la energía térmica de un cuerpo o gas aumenta con el incremento de su temperatura.

La teoría cinética de los gases y de la termodinámica estadística muestra que la temperatura se relaciona con la energía cinética promedio de las moléculas de un gas ideal.

Ya que la presión, volumen, resistencia eléctrica, coeficiente de expansión, están relacionados con la temperatura mediante la estructura fundamental molecular, cambian con la temperatura y estos cambios pueden usarse a fin de medirla. La calibración puede realizarse comparando con estándares, además la temperatura forma parte de las 7 unidades básicas del Sistema Internacional de Unidades (SI).

La unidad fundamental de la temperatura es el Kelvin, a 0 K (cero absoluto), las moléculas de cualquier cuerpo están en reposo y en consecuencia no pueden poseer energía térmica alguna, esto significa, que nunca habrá temperaturas negativas.

Relacionado con el concepto de temperatura, está la transferencia de calor, que se efectúa al entrar en contacto dos cuerpos o sistemas a distinta temperatura.

Desde este punto de vista, la temperatura puede ser considerada como un potencial de energía, y la diferencia de temperatura como la fuerza que impulsa la transferencia de calor desde un objeto o sistema hacia otro, cuya temperatura es menor.

Diversos procesos industriales requieren un control de temperatura exacto, ya que otros parámetros físicos, como el volumen y la presión, dependen de la medida de la temperatura.

Reacciones químicas, y cambios de fase de sustancias, se efectúan a temperaturas específicas, de ahí la importancia de emplear un método confiable de medición de temperatura.

3.2 MEDICIÓN DE TEMPERATURA

No es posible realizar una medición de temperatura directamente, sin embargo, pueden ser observados los efectos en otras variables físicas dependientes de la temperatura, como resistencia eléctrica, expansión volumétrica de un líquido o un gas, presión de vapor, características del espectro, entre algunos otros.

Continuamente se lleva a cabo una optimización de procesos de medición de temperatura, para poder realizar una medición de forma rápida, exacta, y que sea repetitiva por periodos largos de tiempo.

3.2.1 ESCALAS DE TEMPERATURA

Las dos escalas de temperatura en uso son la escala Fahrenheit y la escala Celsius. Dichas escalas se basan en una especificación del número de incrementos entre el punto de congelación y el punto de ebullición del agua a la presión atmosférica normal.

La escala Celsius tiene 100 unidades entre estos puntos, en tanto que la escala Fahrenheit tiene 180 unidades.

La escala Celsius absoluta se llama escala Kelvin, en tanto que la escala Fahrenheit absoluta se denomina escala Rankine. Ambas escalas absolutas se definen de modo que corresponden tanto como es posible a la escala termodinámica absoluta de temperatura. Los puntos cero de ambas escalas absolutas representan el mismo estado físico, y la razón de estos dos valores es la misma independientemente de la escala absoluta usada; es decir:

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right)_{Rankine} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)_{Kelvin} \dots\dots\dots(3.1)$$

El punto de ebullición del agua a 1 atm se toma en forma arbitraria como 100° en la escala Celsius y 212° en la escala Fahrenheit.

Las relaciones matemáticas de conversión se muestran a continuación:

$$[^{\circ}C] = \frac{5}{9} (^{\circ}F - 32) \dots\dots\dots(3.2)$$

$$[^{\circ}F] = \left(\frac{9}{5}\right)^{\circ}C + 32 \dots\dots\dots(3.3)$$

$$[K] = ^{\circ}C + 273.15 \dots\dots\dots(3.4)$$

$$[^{\circ}\text{R}] = ^{\circ}\text{F} + 459.67 \dots \dots \dots (3.5)$$

3.3 EFECTOS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN LA MEDICIÓN DE TEMPERATURA

El proceso de transferencia de calor está asociado con todas las mediciones de temperatura. Cuando se expone un termómetro a un medio ambiente, la temperatura está en función del intercambio total de la energía en forma de calor con el elemento detector de temperatura.

La transferencia de calor puede ocurrir por tres modos, a saber:

- a) por conducción
- b) por convección
- c) por radiación

En general, los tres deben valorarse al analizar un problema de medición de temperatura.

a) Transferencia de calor por conducción

La conducción se realiza mediante la transferencia de energía entre moléculas adyacentes, y tiene lugar siempre que exista un gradiente de temperatura.

Siendo la temperatura una medida de la energía cinética de un cuerpo, la energía del movimiento, la conducción térmica ocurre debido a las colisiones resultantes por tal movimiento.

Aunque el mecanismo de colisión varía entre metales, no-metales, líquidos y gases, la conducción es la transferencia de energía desde átomos ó moléculas con mayor nivel energético hacia átomos o moléculas que presenten un menor nivel energético.

La conducción se describe por la ley de Fourier:

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial X} \dots \dots \dots (3.6)$$

Donde:

k es la conductividad térmica (constante)

A es el área donde se produce la transferencia de calor

q es la tasa de transferencia de calor en la dirección del gradiente de temperatura creciente

T es la temperatura

X es la distancia

Si existe un gradiente de temperatura a lo largo de un termómetro, el calor puede conducirse hacia el elemento sensor o fuera de éste, de acuerdo con la ecuación (3.6).

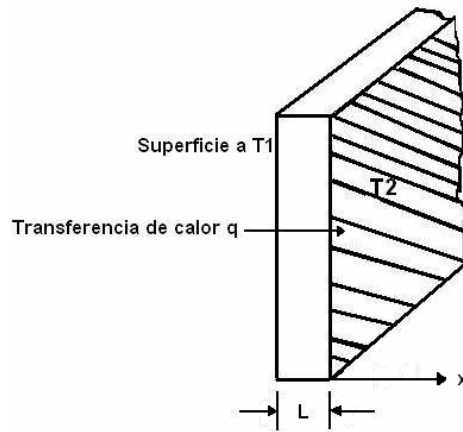


Figura 3.1 Transferencia de calor a través de un sólido o un fluido estacionario

El flujo de calor se define como la razón de la transferencia de calor en una dirección por unidad de área perpendicular a dicha dirección.

El signo negativo en la ecuación (3.6) es usado para enfatizar que el calor es transferido en dirección a la temperatura menor.

La conductividad térmica k es una propiedad del material empleado.

b) Transferencia de calor por convección

La convección es una extensión del flujo de calor por conducción, con la característica adicional de que la energía también es transferida por el movimiento volumétrico de un fluido.

Se presentan dos tipos de convección, a saber:

1. Convección forzada: Ocurre cuando el movimiento de un fluido es resultado de alguna fuerza externa, como un ventilador, una bomba, un extractor, el aire.

Los ventiladores son comúnmente empleados para proveer enfriamiento convectivo hacia componentes electrónicos con alta temperatura.

2. Convección natural: En la convección natural el movimiento del fluido es debido a causas naturales, como el efecto de flotación, el cual se manifiesta con el ascenso del fluido caliente y el descenso del fluido frío.

La transferencia de calor por convección se describe de acuerdo con la ley de Newton del enfriamiento:

$$q = hA(T_s - T_\infty) \dots\dots\dots (3.7)$$

- Donde:
- h es el coeficiente de transferencia por convección
 - A es el área de la superficie que intercambia calor con el fluido
 - T_s es la temperatura de la superficie
 - T_∞ es la temperatura del fluido

c) Transferencia de calor por radiación

La radiación térmica es emisión de energía en forma de ondas electromagnéticas, cubre el espectro a través de ondas de radio, infrarrojos, luz, rayos ultravioleta, y a través de rayos x si el objeto está lo suficientemente caliente.

Esta emisión se debe a cambios espontáneos en la configuración de electrones que constituyen átomos y moléculas del material.

A diferencia de la transferencia de calor por conducción y por convección, la radiación no requiere un medio físico para transferir calor y es, en efecto, el modo más eficiente cuando la transferencia tiene lugar en el vacío.

La transferencia de calor por radiación entre dos superficies es proporcional a la diferencia entre las temperaturas absolutas a la cuarta potencia, de acuerdo con la ley de Stefan-Boltzmann de la radiación térmica:

$$q_{1-2} = \sigma F_G F_\varepsilon (T_1^4 - T_2^4) \dots\dots\dots (3.8)$$

donde T_1 es la temperatura del objeto, T_2 es la temperatura de los alrededores, F_G es un factor geométrico y F_ε un factor que describe las propiedades de radiación de la superficie.

$$\sigma \text{ (constante de Stefan-Boltzmann)} = 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$$

3.4 ELEMENTOS QUE CONFORMAN UN SISTEMA DE MEDICIÓN ELECTRÓNICO DE TEMPERATURA

La función esencial de un sistema de medida es la asignación objetiva (independiente del observador) de un número a una propiedad o cualidad de un objeto ó evento.

En la figura 3.2 se representa la estructura general de un sistema electrónico de medida y control.

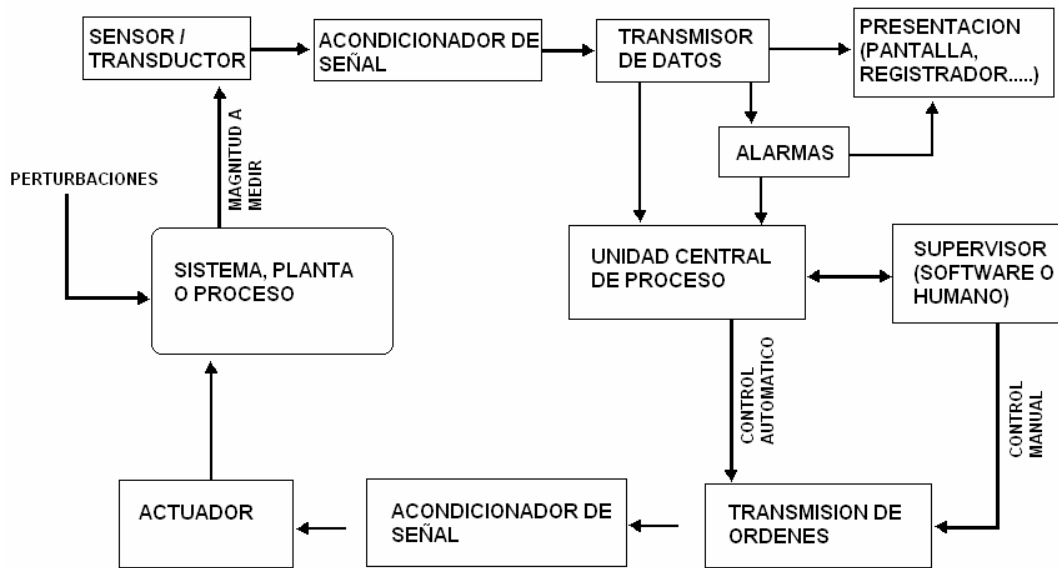


Figura 3.2 Estructura general de un sistema electrónico de medida y control

De todos los bloques que forman dicho sistema, se considera que tres de ellos son básicos y se encuentran presentes en la totalidad de los sistemas de medida. Estos bloques son:

- a) Sensor /transductor
- b) Acondicionador de señal
- c) Presentación (visualización y registro)

a) Transductor y sensor

Definición de sensor

Un sensor es el elemento primario de un sistema de medida que a partir de la energía del medio proporciona una señal de salida que es función de la magnitud que se pretende medir. Un sensor es el elemento de un sistema de medida que es afectado directamente por el fenómeno, cuerpo o sustancia portador de la magnitud a ser medida.

Definición de transductor

Se denomina transductor, en general, a todo dispositivo que convierte una magnitud física (mecánica, térmica, magnética, eléctrica, óptica o molecular) en otra magnitud, normalmente eléctrica.

Es, por tanto, un dispositivo que convierte un tipo de energía en otro.

b) Acondicionador de señal

El acondicionamiento de señal, es el bloque del sistema de medida que suministra, a partir de la señal eléctrica de salida de un transductor, una señal apta que permita ser procesada posteriormente mediante el equipo electrónico adecuado.

Las funciones principales del bloque acondicionador de señal son:

- Acoplamiento de impedancias
- Linealización
- Ganancia
- Filtrado
- Reducción de ruido
- Detección de picos
- Aislamiento

c) Presentación (visualización y registro)

Los sistemas de visualización y registro se pueden clasificar en analógicos y digitales, teniendo como misión ambos casos presentar la magnitud medida de tal forma que pueda ser interpretada correctamente por el supervisor del sistema de control electrónico.

Entre los sistemas de presentación analógicos tenemos: medidores de aguja, registradores X-Y y X-t.

Los elementos de presentación digital típicos son: Exhibidores alfanuméricos a LED (Light Emitter Diode), cristal líquido ó fluorescentes, pantallas CRT, indicadores luminosos simples, impresoras, etc.

3.5 CLASIFICACIÓN DE LOS SENSORES DE TEMPERATURA

Los sensores de temperatura se pueden clasificar de acuerdo a la señal de salida que son capaces de suministrar:

Resistencia como función de temperatura: Detectores resistivos de temperatura (RTD), termistores.

Voltaje como una función de la temperatura: Termopares, sensores de temperatura de estado sólido.

Radiación como función de la temperatura: pirómetros.

Expansión volumétrica como función de la temperatura: Termómetros de fluido.

Expansión lineal como función de la temperatura: Termómetros bimetalicos.

La siguiente tabla muestra algunas consideraciones que deben tomarse en cuenta en la selección del sensor adecuado para efectuar una medición de temperatura.

Criterio	Consideraciones
Intervalo de temperatura	El sensor elegido debe ser capaz de medir las temperaturas máxima y mínima esperadas.
Robustez	El sensor a emplear debe ser lo suficientemente fuerte desde el punto de vista mecánico para soportar el ambiente y las condiciones en las cuales esté sujeto, como vibración, o alta presión. El dispositivo debe ser compatible también con el ambiente asegurándose de que no sufra degradación física o química.
Perturbación	La incursión de la punta de prueba dentro del medio de interés causará cierta distorsión de la distribución de la temperatura en comparación con el sistema no perturbado. Si el grado de perturbación es significativo, se debe realizar una compensación, o si no es posible, se debe buscar un método alternativo de medición de temperatura.
Tipo de señal	Muchos transductores producen una salida en forma de señal eléctrica. El tamaño y la forma de la señal dependen del tipo de transductor. Algunos transductores generan una señal relativamente pequeña, la cual es sensible a interferencia electromagnética.
Rapidez de respuesta	La rapidez de respuesta de diferentes sensores debido a un cambio de temperatura varía de acuerdo a los niveles locales de transferencia de calor y a las propiedades térmicas del sensor. La rapidez de respuesta usualmente es caracterizada como una constante de tiempo y para rápidas variaciones de temperatura se requiere un dispositivo con una constante de tiempo pequeña, de forma que el sensor sea capaz de detectar dicha variación de temperatura en intervalos pequeños de tiempo.
Incertidumbre	La incertidumbre define la cercanía de una medición a la temperatura termodinámica verdadera. La incertidumbre varía para diferentes dispositivos y puede ser cuantificada dentro de límites especificados efectuando una calibración adecuada.
Calibración	La relación entre la temperatura indicada por un sensor y los valores conocidos correspondientes debe ser monitoreada periódicamente. La complejidad y el costo asociados a la calibración pueden afectar la elección del tipo de sensor.
Costo	La variación en costo entre los diferentes métodos de medición es un factor crucial.
Tamaño	El tamaño de los transductores de medición de temperatura y equipo asociado de procesamiento y despliegue de datos varía considerablemente.

Tabla 3.1 Consideraciones a tener en cuenta en la elección de un sensor de temperatura

3.6 TERMOPARES

Los termopares son transductores de temperatura que producen un pequeño voltaje cuya magnitud es del orden de los mV como función de la temperatura.

Un termopar es un dispositivo formado por la unión de dos metales distintos, al conjunto de estos dos metales distintos con una unión firme en un punto o una zona se le denomina termopar.

Cuando la unión de dos metales es calentada o enfriada se genera un voltaje función de la temperatura en la junta.

3.6.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS TERMOPARES

Comparativamente con otros transductores de temperatura, los termopares destacan por su amplio margen de medida, y en particular por las características siguientes:

Positivas:

- Dimensiones reducidas.
- Estabilidad a largo plazo.
- Robustos, versátiles y fiables.
- Económicos.
- Transductores activos (no requieren excitación externa).

Negativas:

- Baja sensibilidad.
- Baja linealidad.
- Requieren unión de referencia.

La principal desventaja de los termopares es su relativamente débil señal de salida, cuya magnitud es del orden de los mV, este hecho tiene como consecuencia que las mediciones sean sensibles a ruido eléctrico.



Figura 3.3 Termopares estándar

Los materiales que formen un termopar, deben estar caracterizados por:

- Altos puntos de ebullición
- Altas temperaturas de operación
- Alta resistencia a oxidación
- Propiedades estables con el tiempo

3.6.2 PRINCIPIO DE OPERACIÓN

Cuando se unen dos metales distintos, como en la figura 3.4, se presenta una fem entre los puntos A y B, la cual es una función de la temperatura en la junta.

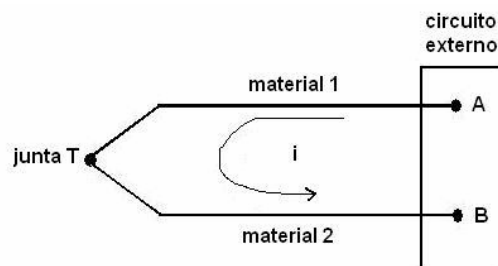


Figura 3.4 Junta de dos metales distintos indicando el efecto termoeléctrico

Este fenómeno se llama efecto Seebeck. Si los dos materiales se conectan a un circuito, se establece una corriente, y por lo tanto, la fem puede alterarse ligeramente debido a un fenómeno llamado efecto Peltier.

El efecto Peltier consiste en el calentamiento o enfriamiento de una unión entre dos metales distintos al pasar una corriente por ella.

El efecto Seebeck es una combinación de los efectos Peltier y Thomson, que se enuncian a continuación:

- Efecto Peltier: Cuando una corriente circula por la unión de dos metales diferentes se produce una absorción o liberación de calor en la unión, que es función de la dirección del flujo de corriente.

- Efecto Thomson: Cuando una corriente circula por un metal homogéneo sometido a un gradiente de temperatura provoca una absorción o liberación de calor.

Hay entonces, tres fem en un circuito termoeléctrico:

1. La fem de Seebeck, causada por la unión de dos metales diferentes
2. La fem de Peltier, causada por el flujo de una corriente en el circuito.
3. La fem de Thomson, que resulta del gradiente de temperatura de los materiales.

La fem de Seebeck es de primera importancia, ya que de ésta depende la temperatura de la junta. Si la fem generada en la junta de dos metales distintos se mide con cuidado como función de la temperatura, entonces la junta puede utilizarse a fin de medir la temperatura, según se muestra en la siguiente figura:

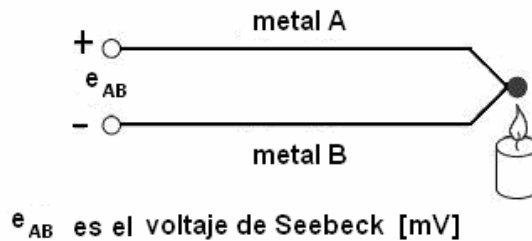


Figura 3.5 Voltaje de Seebeck

Se tiene que

$$e_{AB} = \alpha T \dots\dots\dots (3.9)$$

Donde α es el coeficiente de Seebeck y T la temperatura absoluta, α representa la variación de la tensión eléctrica producida por la variación de 1° de temperatura para cada par de materiales. Todos los pares de metales diferentes, presentan este efecto.

El problema principal surge al intentar cuantificar el potencial. Cuando los dos materiales distintos se conectan a un dispositivo de medición, hay otra fem térmica que se genera en la junta de los materiales y los alambres conectados al instrumento de medición de voltaje. Esta fem depende de la temperatura de la conexión y se debe prever este potencial adicional.

Existen dos reglas para el análisis de circuitos termoelectricos:

1. Ley de los metales intermedios

Si un tercer metal se conecta al circuito, como se ilustra en la figura 3.6, la fem neta del circuito no se afecta siempre que las conexiones nuevas estén a la misma temperatura. Este enunciado puede probarse mediante la segunda ley de termodinámica y se conoce como la ley de los metales intermedios.

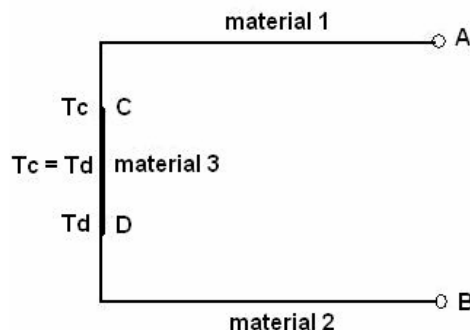


Figura 3.6 Influencia de un tercer metal en un circuito termoelectrico; ley de los metales intermedios

2. Ley de las temperaturas intermedias

Considérese los circuitos mostrados en la figura 3.7. El circuito termopar simple se construye con los mismos materiales, pero opera entre límites de temperatura diferentes.

El circuito de la figura 3.7a desarrolla una fem de E_1 entre las temperaturas T_1 y T_2 ; y el circuito de la figura 3.7b desarrolla una fem de E_2 , entre las temperaturas T_2 y T_3 .

La ley de las temperaturas intermedias establece que este circuito desarrolla una fem de $E_3 = E_1 + E_2$ cuando se opera entre las temperaturas T_1 y T_3 , como se muestra en la figura 3.7c.

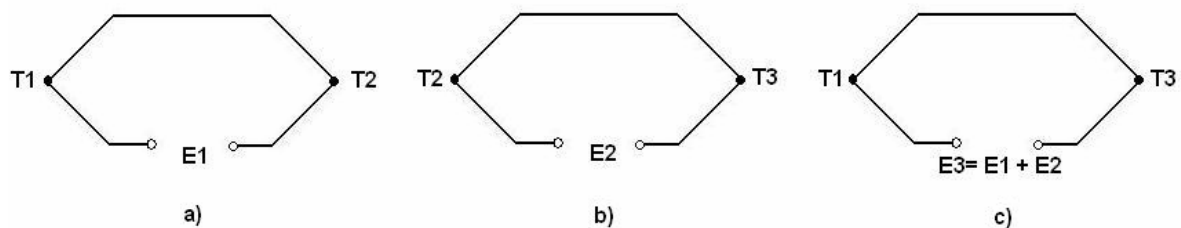


Figura 3.7 Circuitos que ilustran la ley de las temperaturas intermedias

3.6.3 TIPOS DE TERMOPARES

Existen cientos de tipos de termopares que han sido desarrollados, en principio, casi cualquier par de metales diferentes, e incluso semiconductores pueden ser acoplados en forma de termopares.

Se clasifican por tipo de calibración, ya que difieren en sus curvas de fem vs. temperatura.

Algunos generan considerablemente más voltaje a menor temperatura, mientras que otros no comienzan a desarrollar un voltaje significativo, sino hasta que están sometidos a altas temperaturas.

Adicionalmente, los tipos de termopar tienen diferentes tipos de compatibilidad con las diferentes atmósferas, ya que la reacción química entre ciertas aleaciones de los termopares y la aplicación en la atmósfera podría causar degradación metalúrgica.

Los tipos de termopar normalmente usados en aplicaciones industriales, se identifican con una letra originalmente asignada por la "Instrument Society of America" (ISA) y nuevamente adoptada como estándar por el ANSI-MC96.1-1975.

Ocho combinaciones de materiales son frecuentemente empleados, dentro de las cuales se tienen 3 categorías, a los que se les denomina termopares estándar:

1. Termopares de metales nobles (tipos B, R y S)
2. Termopares basados en níquel (tipos K y N)
3. Termopares de constantán negativos (tipos E, J y T)

Adicionalmente, hay algunos tipos de termopares que no están considerados en la simbología de la ANSI, esos tipos de termopar están constituidos por aleaciones de tungsteno y tungsteno-renio.

Generalmente para utilizarlos en la medida de altas temperaturas, estos son una alternativa económica en comparación al basado en platino y sus respectivas aleaciones, pero se limita al uso en atmósferas no oxidantes e inertes.

El grupo de termopares de metales raros, tipos B, R y S, están basados en platino y sus aleaciones con rodio, siendo los más estables de los termopares estándar y pueden ser utilizados a altas temperaturas (por arriba de 1750 °C), pero son generalmente más costosos y sensibles a la contaminación.

Los termopares basados en níquel, tipos N y K, son comúnmente usados para aplicaciones que no requieren un intervalo amplio de temperatura en contraparte con los intervalos requeridos para los tipos B, R y S.

Los termopares constantán negativos, tipos E, J y T, tienen salidas de mayor magnitud de fem, debido al coeficiente negativo de Seebeck del constantán.

3.6.4 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE UN TERMOPAR

Para la elección de un termopar, deben tomarse en cuenta varios aspectos, entre los que podemos mencionar:

- Costo
- Máxima y mínima temperatura de operación
- Estabilidad química
- Limitaciones mecánicas
- Duración a la exposición
- Compatibilidad con la atmósfera del entorno del termopar
- Tiempo de vida del sensor
- Sensibilidad
- Magnitud de la señal de salida
- Linealidad

A continuación se pueden observar en la tabla 3.2 las características técnicas de los termopares estandarizados:

Tipo termopar	Composición química	Intervalo de aplicación usual [°C]	Descripción técnica
T	Cobre (+) Constantán (-)	(-190, 400)	El más estable en intervalos de temperatura criogénica (temperatura cercana al cero absoluto). Excelente en atmósferas reductoras y oxidantes dentro del intervalo de temperatura.
J	Hierro (+) Constantán (-)	(-190, 800)	El termopar tipo J puede ser usado expuesto ó aislado, donde haya una deficiencia de oxígeno libre. Para una larga vida y limpieza de éste, se recomienda usar un tubo proyector, ya que el alambre de hierro se oxidará rápidamente sobre temperaturas de 540 [°C], por lo que es recomendado usar un alambre de calibre grueso para compensar.
E	Cobre (+) Constantán (-)	(-190, 1000)	El termopar tipo E es adecuado para usarse a temperaturas de hasta 1000 [°C] en atmósferas reductoras medio oxidantes, inertes, y al vacío. En temperaturas criogénicas el termopar no está sujeto a la corrosión. Este termopar tiene la fem más grande por grado de todos los termopares usados comúnmente.
K	Cromel (+) Alumel (-)	(-190, 1370)	De acuerdo a su confiabilidad y a su precisión, el termopar tipo "K" es usado extensamente en temperaturas de hasta 1370 [°C]. Esta diseñado especialmente para usarse en atmósferas oxidantes.
N	Nicrosil (+) Nisil (-)	(650, 1260)	Este termopar basado en aleación de níquel es usado principalmente en altas temperaturas de hasta 1260 [°C]. En comparación con el tipo K puede proveer una mejor resistencia a la oxidación en altas temperaturas y una vida más amplia donde el sulfuro esté presente.
B	Platino 30% Rodio (+) Platino 6% Rodio (-)	(0, 1800)	El tipo B se recomienda usarse hasta temperaturas de 1800 [°C]. Este tipo de termopar es muy fácil de contaminarse, particularmente las atmósferas reductoras dañan a este tipo de termopares. Los termopares de metales nobles deben estar siempre protegidos.
S	Platino 10% Rodio (+) Platino (-)	(0, 1765)	Patrón de laboratorio altamente reproducible, fácil de contaminarse, requieren protección. Diseñados para operar en atmósferas oxidantes ó inertes a temperaturas superiores a 1400 [°C].
R	Platino 13% Rodio (+) Platino (-)	(0, 1700)	Recomendado en atmósferas oxidantes, fácil de contaminarse, requiere protección.

Tabla 3.2 Características generales de los termopares estándar

Relación temperatura vs. fem

Las relaciones temperatura vs. fem de los termopares mostrados en la tabla 3.2 están reportadas en la tabla del Instituto Americano de Estándares, ANSI MC96.1- 1975, según puede observarse en la figura 3.8.

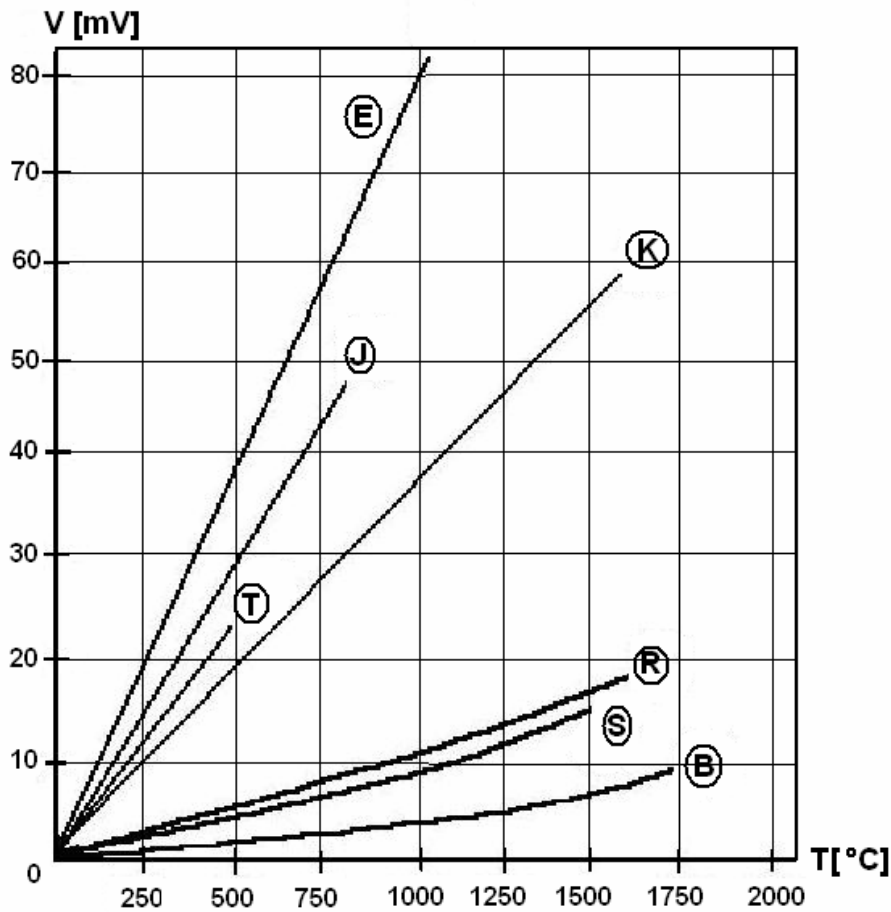


Figura 3.8 Relación temperatura vs. fem para termopares estándar

Aislamiento y protección

Varias aplicaciones requieren que los termopares sean aislados eléctricamente o químicamente del ambiente o del medio de interés. Ejemplos de materiales aislantes incluyen al PVC para temperaturas entre -30 °C y 105 °C, Teflón para -273 °C a +250 °C, fibra de vidrio para temperaturas de -50 °C a 400 °C, y poliamida para intervalos de temperatura de -269 °C a 400 °C.

Límites máximos de temperatura

La tabla que se muestra a continuación (tabla 3.3), nos da los límites superiores de temperatura de varios elementos con sus respectivos calibres de alambres.

TERMOPAR TIPO	CALIBRES AWG [mm]				
	8=3.25	14=1.63	20=0.81	24=0.51	28=0.33
T	----	370°C	260°C	200°C	150°C
J	760°C	590°C	480°C	370°C	320°C
E	860°C	650°C	540°C	430°C	430°C
K	1260°C	1090°C	980°C	870°C	760°C
R	----	----	----	1480°C	----
S	----	----	----	1480°C	----
B	----	----	----	1700°C	----
N	1260°C	1090°C	980°C	870°C	760°C

Tabla 3.3 Límites máximos de temperatura

3.6.5 COMPENSACIÓN DE TERMOPARES

Nótese que todos los circuitos termopares involucran dos juntas cuando menos. Si la temperatura de una junta se conoce, entonces la temperatura de la otra junta puede calcularse con facilidad usando las propiedades termoeléctricas de los materiales. La temperatura conocida se llama temperatura de referencia.

Un arreglo común a fin de establecer la temperatura de referencia es el baño de hielo mostrado en la figura 3.9.

Una mezcla en equilibrio de hielo y agua destilada saturada con aire a la presión atmosférica estándar produce una temperatura conocida de 32 °F.

El sistema de la figura 3.9a sería necesario si los bornes del instrumento de medición de voltaje estuvieran a diferentes temperatura, en tanto que la conexión de la figura 3.9b sería satisfactoria si los bornes estuvieran a la misma temperatura.

Para que el sistema de la figura 3.9a funcione deber tener bornes de cobre, es decir, los bornes y los conductores deben ser del mismo material.

Es común expresar las fem termoeléctricas en términos del potencial generado por una junta de referencia de 32 °F (0 °C).

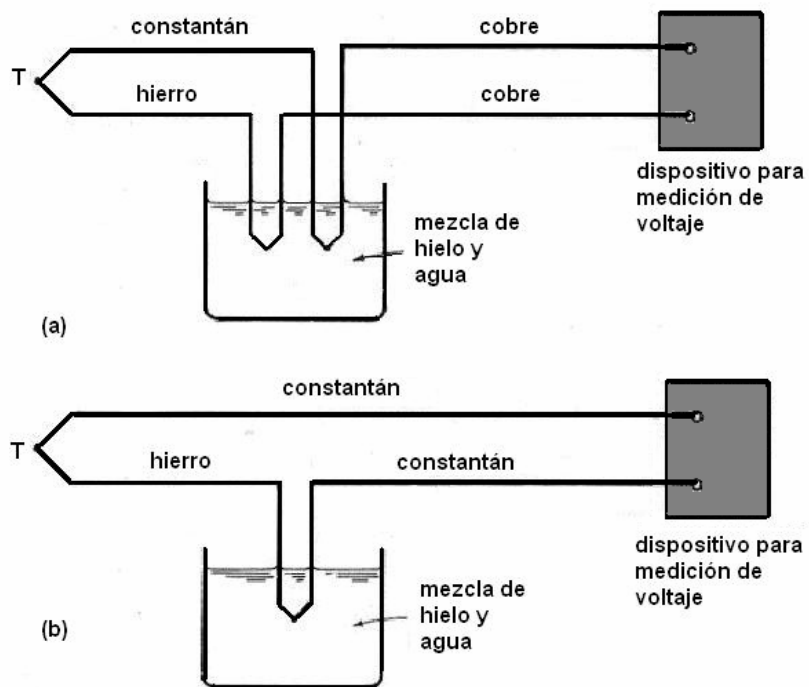


Figura 3.9 Métodos convencionales de establecer la temperatura de referencia en el circuito termopar. Se ilustra el termopar de hierro y constantán

Las tablas estándar de termopares se prepararon con estas bases, y la tabla 3.4 resume las características de salida las combinaciones más comunes de termopares.

Temperatura [°F] [°C]		Tipo T Cobre vs. Constantán [mV]	Tipo E Cromel vs. Constantán [mV]	Tipo J Hierro vs. Constantán [mV]	Tipo K Cromel vs. Alumel [mV]	Tipo S Platino vs. Platino con 10% de rodio [mV]
-300	-184.4	-5.34	-8.4	-7.51	-5.63	---
-250	-156.6	-4.74	-7.43	-6.63	-5.0	---
-200	-128.9	-4.41	-6.47	-5.76	-4.38	---
-150	-101.1	-3.36	-5.22	-4.62	-3.53	---
-100	-73.3	-2.58	-3.97	-3.49	-2.69	---
-50	-45.5	-1.62	-2.5	-2.18	-1.69	---
0	-17.8	-.67	-1.02	-.88	-.69	-.09
50	10	0.42	0.62	0.52	0.41	0.06
100	37.8	1.51	2.28	1.94	1.52	0.22
150	65.5	2.74	4.07	3.42	2.66	0.41
200	93.3	3.96	5.86	4.9	3.81	0.59
250	121.1	5.3	7.78	6.42	4.95	0.8
300	148.9	6.64	9.7	7.94	6.09	1.02
350	176.7	8.08	11.72	9.48	7.2	1.24
400	204.4	9.52	13.74	11.02	8.31	1.47
450	232.2	11.04	15.84	12.56	9.43	1.71
500	260	12.57	17.94	14.1	10.56	1.96
600	315.5	15.83	22.28	17.17	12.86	2.47
700	371.1	19.09	26.63	20.25	15.17	2.98
800	426.7	---	31.1	23.33	17.53	3.52
1000	537.8	---	40.05	29.51	22.25	4.60
1200	648.9	---	48.92	---	26.91	5.76
1500	815.6	---	62.24	---	33.91	7.51
1700	926.7	---	---	---	38.28	8.77
2000	1093.3	---	---	---	44.85	10.67
2500	1371.1	---	---	---	54.84	14.01
3000	1648.9	---	---	---	---	17.34

Tabla 3.4 Fem térmica en mV absolutos para combinación de termopares de uso común de acuerdo con Powell y asociados

Por lo general, el voltaje de salida E de un circuito termopar simple se escribe en la forma

$$E = AT + \frac{1}{2}BT^2 + \frac{1}{3}CT^3 \dots\dots\dots (3.10)$$

Donde T es la temperatura en grados Celsius y E se basa en la temperatura de la junta de referencia de 0 °C. Las constantes A, B y C dependen del material del termopar.

El problema de la junta de referencia puede aminorarse mediante el circuito mostrado en la figura 3.10. Se coloca un termistor en contacto térmico con la cinta terminal a la que se añaden los alambres del termopar.

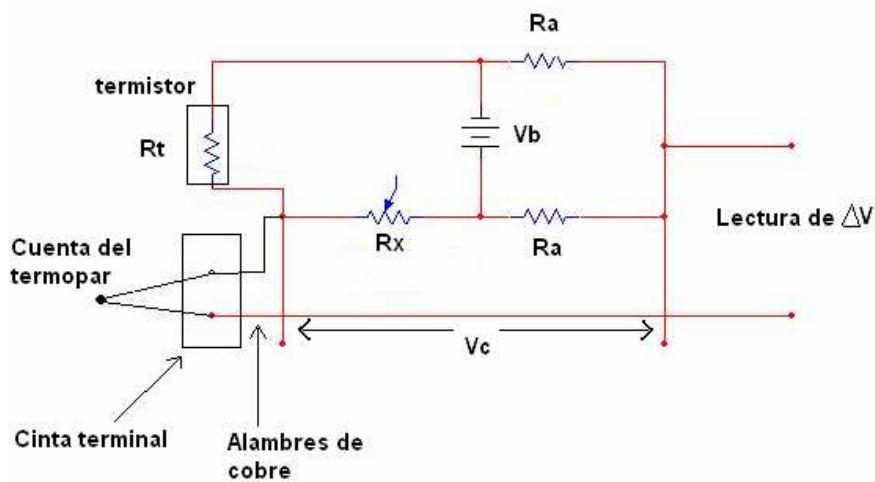


Figura 3.10 Compensación de la junta de referencia por el uso de un termistor

El voltaje V_b y el coeficiente de temperatura del termistor deben ajustarse de modo que V_c iguale al coeficiente de temperatura del termopar en $\frac{mV}{^\circ C}$. El valor de R_x se ajusta de manera que la salida de voltaje ΔV sea cero a 0 °C. Un valor conveniente para R_a es de cerca de 1 KΩ.

3.7 SISTEMAS BIMETÁLICOS

Un método muy usado a fin de medir la temperatura, es emplear una tira bimetalica, que consiste en la unión de dos piezas de metal con diferentes coeficientes de expansión térmica, α_1 y α_2 , como se observa en la figura 3.11.

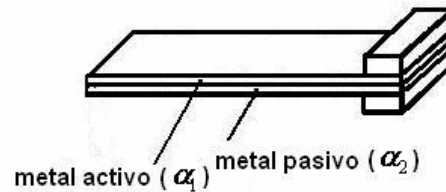


Figura 3.11 Estructura de una tira bimetalica

Un termómetro bimetalico consiste de un indicador o dispositivo de registro, un elemento sensor denominado bulbo bimetalico, y un medio que conecta ambos. En la figura 3.12 se muestra un termómetro bimetalico.



Figura 3.12 Termómetro bimetalico

Aplicaciones típicas del empleo de termómetros bimetalicos incluyen la medición de temperatura de líquidos y gases en contenedores, calderas, o bien la medición de temperatura del aceite en transformadores de potencia.

3.7.1 PRINCIPIO DE OPERACIÓN

La operación de un termómetro bimetalico depende de la diferencia en la expansión térmica de dos metales.

La diferencia en la expansión térmica de ambos metales produce cambios de curvatura en el material compuesto contenido dentro del bulbo, debidos a cambios de temperatura. Este material compuesto consiste de dos metales distintos que han sido fusionados en forma de lámina.

La construcción helicoidal es empleada para usar cambios de curvatura y producir la rotación de una aguja.

La diferencia de coeficientes térmicos está expresada por la ecuación:

$$\Delta l = l(1 + \alpha_1 \Delta T) - l(1 + \alpha_2 \Delta T) = l(\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T \dots\dots\dots(3.11)$$

Donde l es la longitud del sensor, α_1 y α_2 son los coeficientes de expansión térmica lineal de los dos materiales empleados, y ΔT es la diferencia de temperatura.

Donde:

$$[\Delta l] = [m]$$

$$[\alpha] = \left[\frac{1}{^\circ C} \right]$$

$$[\Delta T] = [^\circ C]$$

Los sensores son construidos diseñando un tubo con el material de mayor coeficiente de expansión lineal α_1 , y una varilla coaxial insertada hecha del material de menor coeficiente α_2 , los cuales son llamados respectivamente, materiales activos y pasivos, según se muestra en el siguiente esquema:

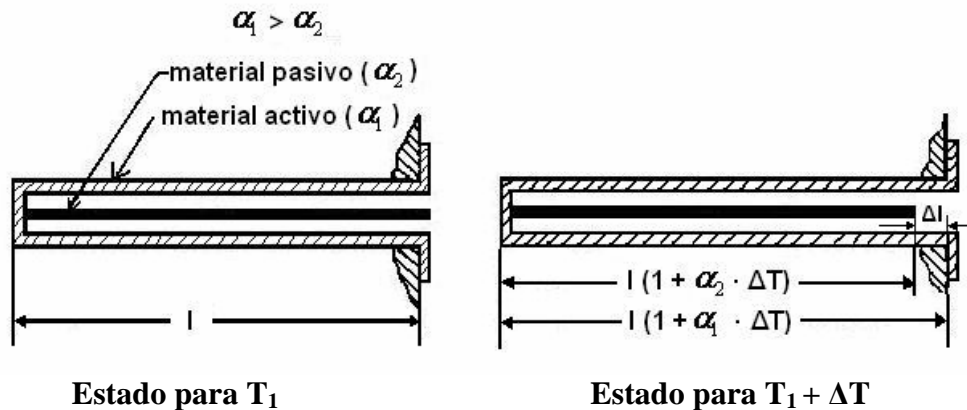


Figura 3.13 Principio del termómetro de dilatación

3.7.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SISTEMAS BIMETÁLICOS

1. Intervalo de temperatura

Los termómetros bimetálicos tienen un intervalo de operación entre $-130\text{ }^\circ\text{C}$ y $540\text{ }^\circ\text{C}$, sin embargo, no se recomienda su uso continuo a temperaturas más allá de $425\text{ }^\circ\text{C}$.

La diferencia en los intervalos de temperatura depende del empleo de materiales distintos o de la modificación de la longitud del elemento bimetálico (número de espiras).

2. Sensibilidad

El movimiento angular del elemento bimetálico para un cambio de temperatura dado está determinado por las características físicas del elemento bimetálico.

Se tiene una máxima sensibilidad de aproximadamente tres grados angulares de desplazamiento por °F.

3. Precisión

La precisión en las mediciones de temperatura con un termómetro bimetálico depende del diseño del termómetro, del ambiente de trabajo bajo el cual esté inmerso el dispositivo de medición, de una inmersión correcta, de la precisión en la calibración de los termómetros, de la estabilidad térmica del elemento bimetálico y de los errores de observación.

4. Estabilidad mecánica

La estabilidad mecánica de un termómetro bimetálico es afectada por choques severos o vibraciones, las cuales pueden deformar el elemento bimetálico, produciendo errores de medición.

5. Estabilidad térmica

La estabilidad térmica de un termómetro bimetálico es una característica inherente a los materiales empleados en su construcción.

Un termómetro bimetálico puede ser empleado para operar a temperaturas por encima de 540 °C, pero exposiciones prolongadas a esos niveles de temperatura pueden causar cambios en la calibración del dispositivo.

Su operación continua estable no es segura más allá de 425 °C.

Los pares de materiales utilizados deben poseer la mayor diferencia posible entre los coeficientes α_1 y α_2 , alta temperatura de operación y buena resistencia a la corrosión y a la oxidación.

Tradicionalmente, como su nombre implica, sólo metales o aleaciones habían sido empleados, como el latón y el acero, o el invar, una aleación de acero-níquel con un coeficiente de expansión térmica muy bajo.

Sin embargo, cualquier par de materiales distintos pueden ser empleados en teoría, como el uso de cerámicos y semiconductores.

A continuación se muestra una tabla con los intervalos de temperatura adecuados para materiales activos y pasivos y sus respectivos coeficientes de expansión lineal α .

Materiales		Intervalo de Temperatura [°C]	Coeficiente térmico de expansión lineal , $\alpha \left[\frac{1}{^{\circ}\text{C}} \right]$
Rol	Tipo		
Activo	aluminio	(0,600)	23×10^{-6}
	latón	(0,300)	18×10^{-6}
	níquel	(0,600)	13×10^{-6}
	Aleación cromo- níquel	(0,1000)	16×10^{-6}
Pasivo	Porcelana	(0,1000)	4×10^{-6}
	Aleación Fe-Ni (64%-36%)	(0,200)	3×10^{-6}
	cuarzo	(0,1000)	$.54 \times 10^{-6}$

Tabla 3.5 Materiales empleados en termómetros de dilatación

*Valores aproximados dependiendo de la composición exacta del material

Como la diferencia de expansión lineal entre dos materiales de razonable longitud es usualmente muy pequeña para dar una indicación directa de temperatura, requiere ser amplificada por una transmisión mecánica.

La sección transversal de un termómetro de dilatación es mostrada en la figura 3.14.

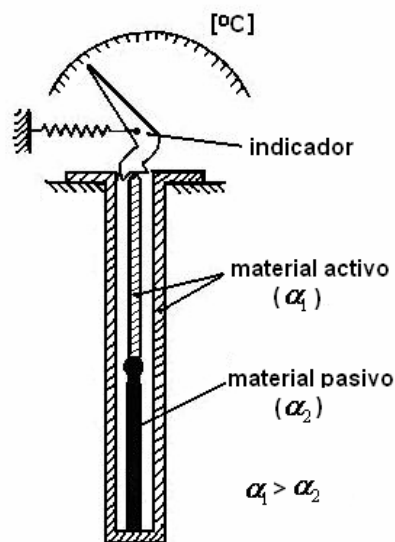


Figura 3.14 Sección transversal de un termómetro de dilatación

Formas típicas de tiras bimetálicas:

a) Tira plana

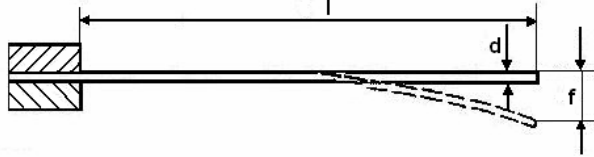


Figura 3.15 Tira bimetálica plana

b) Tira en forma de U

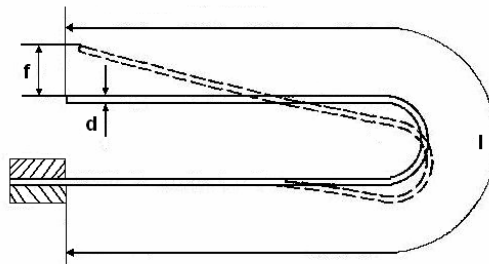


Figura 3.16 Tira bimetálica en forma de U

Para las formas indicadas en las figuras 3.15 y 3.16 se cumple que:

$$f = k \frac{\Delta T \cdot l^2}{d \cdot 10^4} \dots \dots \dots (3.12)$$

Donde:

- f [mm] es el desplazamiento
- k [adim] es el coeficiente de torsión
- d [mm] es el espesor de la placa
- l [mm] es la longitud
- ΔT [°C] es la diferencia de temperatura

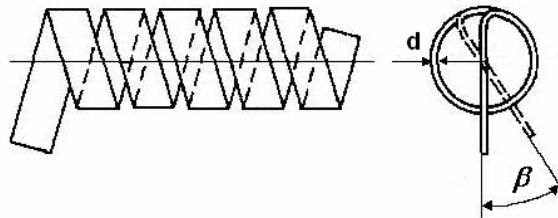


Figura 3.17 Forma cilíndrica-helicoidal

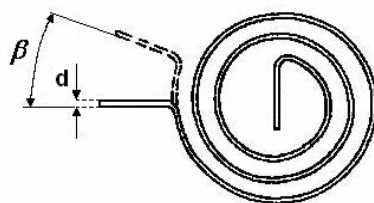


Figura 3.18 Forma plana-helicoidal

Para las figuras 3.17 y 3.18 se tiene que:

$$\beta = k \frac{2\Delta T \cdot l}{d \cdot 10^4} \dots\dots\dots(3.13)$$

donde ΔT [°C] es la diferencia de temperatura, l [mm] es la longitud de la tira, $k \left[\frac{1}{^\circ\text{C}} \right]$ es el coeficiente de torsión, d [mm] es el espesor, y β [rad] el ángulo de torsión.

Los principales valores de los coeficientes de torsión k , para los intervalos de temperatura de tiras bimetálicas, se muestra en la tabla 3.6.

El sobrecalentamiento de una tira bimetálica puede causar que el límite elástico de los materiales utilizados sea excedido, produciendo una deformación permanente en el elemento sensor.

Metal pasivo	Metal activo	Intervalo de temperatura [°C]	Coefficiente de torsión k [1/°C]
Invar (64% Fe, 36% Ni)	Aleación 27% Ni, 68% Fe, 5% Mo	(0,200)	0.16
	Latón	(0,150)	0.16
	Cobre	(0,150)	0.16
	Constantán	(0,200)	0.14
	Níquel	(0,150)	0.12
	Hierro	(0,150)	0.11
	Acero no-magnético	(0,120)	0.18
Aleación 58% Fe, 42% Ni	Aleación 27% Ni, 68% Fe, 5% Mo	(0,500)	0.12
	Constantán	(0,350)	0.11
	Níquel	(0,400)	0.09
	Aleación 42% Ni, 53% Fe, 5% Na	(0,350)	0.09

Tabla 3.6 Materiales usados en la construcción de termómetros bimetálicos

3.8 TERMÓMETRO DE MERCURIO

El termómetro de mercurio en vidrio es uno de los tipos más comunes de dispositivos de medición de temperatura. Sus detalles de construcción se muestran en la siguiente figura:

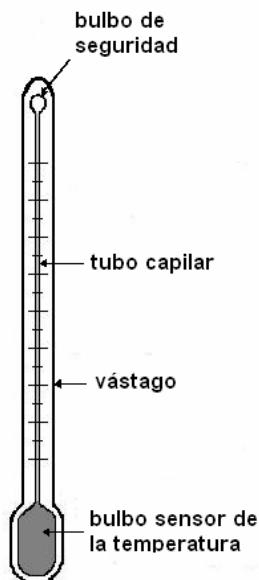


Figura 3.19 Esquema de un termómetro de mercurio en vidrio

Un bulbo relativamente grande en la parte más baja del termómetro contiene la mayor cantidad del líquido, en este caso mercurio, el cual se expande cuando se calienta, y sube por el tubo capilar en el cual está grabada una escala apropiadamente calibrada.

En la parte superior del tubo capilar se coloca otro bulbo, a fin de proporcionar seguridad en caso de que el margen de la temperatura del termómetro se exceda de manera inadvertida.

El mercurio no puede usarse debajo de su punto de congelación, $-37.8\text{ }^{\circ}\text{C}$. El tamaño del capilar depende del tamaño del bulbo sensor, el líquido y los márgenes de temperatura deseados para el termómetro.

Su intervalo de operación abarca de $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $510\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.8.1 PRINCIPIO DE OPERACIÓN

En operación, el bulbo del termómetro de mercurio en vidrio se expone al ambiente cuya temperatura se va a medir. La elevación de la temperatura causa que el mercurio se expanda en el bulbo y suba por el capilar, indicando, por lo tanto, la temperatura.

Es importante observar que la expansión registrada por el termómetro es la diferencia entre la expansión del líquido y la expansión del vidrio.

La diferencia es una función no sólo del calor transferido al bulbo por el medio ambiente, sino también es función del calor conducido en el bulbo por el vástago, mientras mayor es la conducción del vástago en relación a la transferencia de calor del medio ambiente, mayor es el error.

Con objeto de tomar en cuenta dichos efectos de conducción, el termómetro por lo general se calcula para una profundidad específica de inmersión.

Los termómetros de mercurio en vidrio de alto grado tienen la escala de la temperatura con marcas grabadas en el vidrio a lo largo, con una marca que indica la propia profundidad de inmersión, según se puede observar en el siguiente esquema:

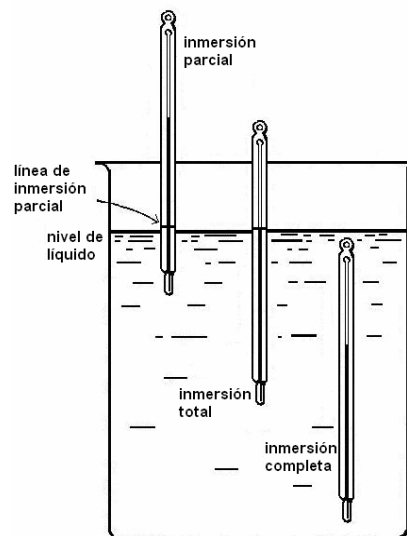


Figura 3.20 Termómetros de inmersión parcial, total y completa

Los termómetros de mercurio en vidrio muy precisos pueden obtenerse del Nacional Bureau of Standards con información de calibración para cada termómetro.

Por lo general, los termómetros de mercurio en vidrio se aplican hasta 315 °C, pero su alcance puede extenderse a 538 °C llenando el espacio sobre el mercurio con un gas como el nitrógeno. Esto aumenta la presión en el mercurio, eleva su punto de ebullición y permite, por lo tanto, el uso del termómetro a temperaturas más altas.

La expansión de líquidos termométricos con la temperatura puede ser modelada como:

$$V = V_0(1 + \alpha T + \beta T^2) \dots \dots \dots (3.14)$$

Donde:

$V [m^3]$ es el volumen del líquido a la temperatura T

$V_0 [m^3]$ es el volumen del líquido a 0 °C

$T [°C]$ es la temperatura del sistema

$\alpha \left[\frac{1}{°C} \right]$ es el primer coeficiente de expansión térmica

$\beta \left[\frac{1}{^{\circ}\text{C}^2} \right]$ es el segundo coeficiente de expansión térmica

Para el mercurio, $\alpha = 1.8 \times 10^{-4} \frac{1}{^{\circ}\text{C}}$, $\beta = 5 \times 10^{-8} \frac{1}{^{\circ}\text{C}^2}$

La característica deseada para el líquido termométrico es un alto coeficiente de expansión, estabilidad química, y compatibilidad con el contenedor, el cual es usualmente algún tipo de vidrio.

3.9 TERMISTORES (MATERIALES SEMICONDUCTORES)

Los termistores consisten de un semiconductor cerámico cuya resistencia eléctrica es sensible a la temperatura, tienen ya sea un coeficiente de temperatura negativo (NTC) o un coeficiente de temperatura positivo (PTC).

Los termistores NTC tienen una resistencia que disminuye al aumentar la temperatura, mientras que los tipo PTC presentan mayor resistencia al aumentar la temperatura, dependiendo de los materiales empleados en su construcción.

Los termistores tienen muy altas sensibilidades con valores en el orden de $50 \frac{mV}{^{\circ}\text{C}}$, lo cual los hace extremadamente susceptibles a los cambios de temperatura, también tienen una baja masa térmica que da como resultado tiempos rápidos de respuesta, pero son limitados por un intervalo pequeño de temperatura. Los termistores NTC son los más comunes y pueden operar dentro de un intervalo de temperatura que va de -200°C a 1000°C .

Además, la resistencia sigue una variación exponencial con la temperatura en lugar de una relación polinomial.

A continuación, se muestra la simbología empleada para representar resistencias dependientes de la temperatura.

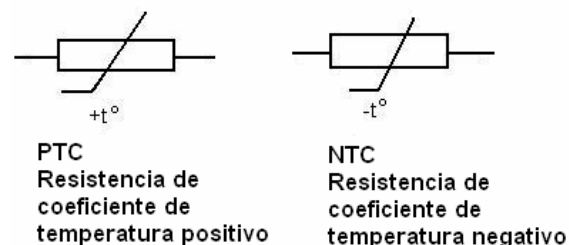


Figura 3.21 Símbolo para una resistencia con dependencia intrínseca de la temperatura y variación no lineal, con sensibilidad positiva o negativa

El termistor es un dispositivo muy sensible y puede anticiparse un comportamiento consistente dentro de 0.1% con calibración apropiada. Una característica atractiva del termistor es que puede usarse a fin de compensar la temperatura de los circuitos eléctricos.

Esto es posible debido al coeficiente negativo de temperatura de modo que puede usarse para contrarrestar el aumento de resistencia de un circuito, conforme aumenta la temperatura.

Están fabricados con material de semiconductor de óxido de metal los cuales son encapsulados en una pieza de vidrio o epoxi.

Los termistores PTC también se emplean para medición de temperatura y son comúnmente usados en aplicaciones de control.

3.9.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El fundamento de los termistores está en la dependencia de la resistencia de los semiconductores con la temperatura, debida a la variación con ésta del número de portadores.

Al aumentar la temperatura lo hace también el número de portadores reduciéndose la resistencia, y de ahí que presenten coeficiente de temperatura negativo.

Esta dependencia varía con la presencia de impurezas, y si el dopado es muy intenso, el semiconductor adquiere propiedades metálicas con coeficiente de temperatura positivo (PTC) en un margen de temperaturas limitado.

El termistor se fabrica a partir de óxidos metálicos comprimidos y sintetizados. Los metales utilizados son níquel, cobalto, manganeso, hierro, cobre, magnesio y titanio.

Con un cuidadoso control del tipo de óxido y la proporción, se obtienen amplios intervalos de resistencia eléctrica y curvas características de coeficiente de temperatura.

Como típicas se pueden considerar las preparaciones de óxido de manganeso con cobre y óxido de níquel con cobre. Modificando las proporciones de óxido se puede variar la resistencia básica de un termistor, se dispone de termistores con resistencias básicas a 25 °C.

La figura 3.22 muestra una curva típica de variación de resistencia para una variedad de termistores NTC. La relación de resistencia contra temperatura para un termistor NTC, puede ser aproximada por:

$$R_T = A \exp\left(\frac{\beta}{T}\right) \dots\dots\dots (3.15)$$

Donde:

$R_T [\Omega]$ es la resistencia a la temperatura T

A $[\Omega]$ es la constante para el termistor particular en consideración

B [K] es la constante para el termistor particular en consideración

T [K] es la temperatura absoluta

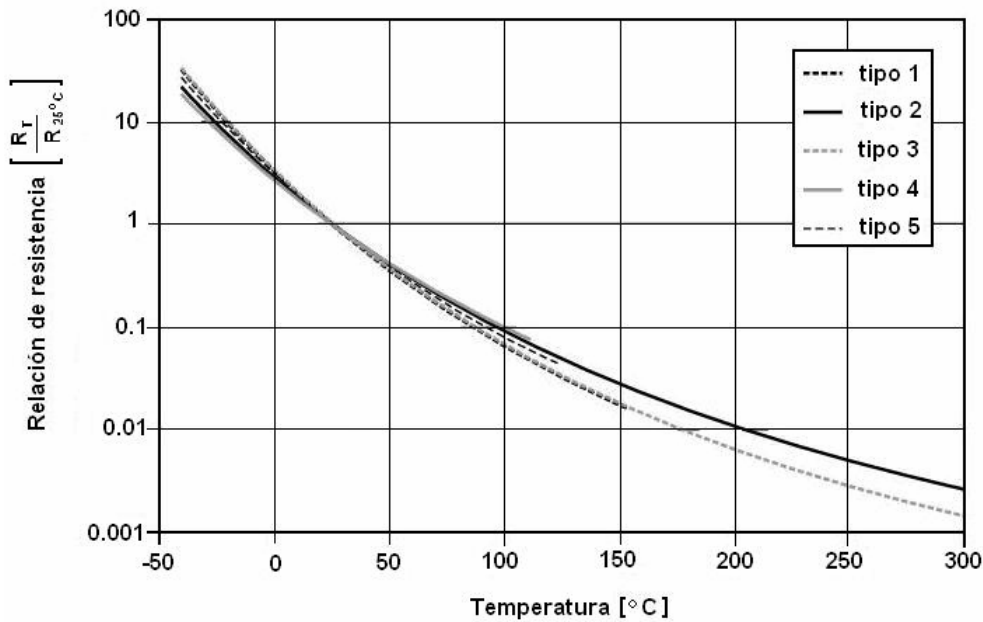


Figura 3.22 Variación de la resistencia con la temperatura para una variedad de termistores NTC

La ecuación (3.15) puede ser reescrita en la forma:

$$R_T = R_0 \exp \left[\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \dots \dots \dots (3.16)$$

donde: T_0 es la temperatura de referencia en K, normalmente 290.15 K (25 °C), ó 273.15 K (0 °C)

$R_0 [\Omega]$ es la resistencia a la temperatura T_0

R_0 es la resistencia a 25 °C u otra temperatura de referencia T_0 [K].

El parámetro β representa la temperatura característica del material, y tiene valores de 2000 K a 5500 K, pero varía con la temperatura, de forma creciente con el incremento de la misma.

3.9.2 APLICACIONES

Las aplicaciones de los termistores se pueden dividir entre las que están basadas en un calentamiento externo del termistor, que son todas las relativas a la medida, control y compensación de temperatura, y las que se basan en calentarlo mediante el propio circuito de medida, están entre estas últimas las medidas de caudal, nivel y el análisis de composición de gases, todos ellos son casos en que varía la conductividad térmica del medio alrededor del termistor, también el control automático de volumen y potencia, la creación de retardos de tiempo y la supresión de transitorios.

En la figura 3.23 se ejemplifica el empleo del termistor en una aplicación de control, cuando la temperatura ambiente supera un cierto valor, se reduce la resistencia del termistor NTC con lo que aumenta la corriente y se acciona el relevador.

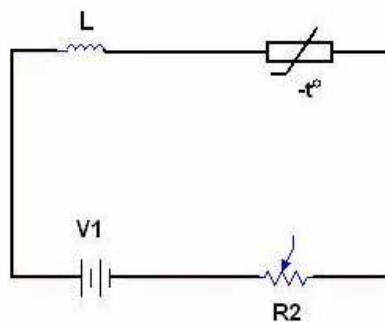


Figura 3.23 Control de temperatura utilizando un termistor

La protección por sobrecargas, por ejemplo de un motor eléctrico, se puede llevar a cabo con un termistor PTC en serie, tal como se muestra en la figura 3.24.

Cuando aumenta la corriente, aumenta la resistencia del termistor PTC y así limita la corriente a través del motor. A diferencia de los fusibles, aquí no hace falta ninguna intervención externa para restablecer el funcionamiento una vez que cesan las condiciones que provocaron el exceso de corriente.

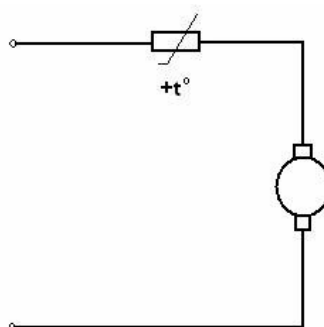


Figura 3.24 Protección de un motor empleando un termistor PTC

3.9.3 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS TERMISTORES

Los termistores sirven para la medición o detección de temperatura tanto en gases, como en líquidos o sólidos.

A causa de su muy pequeño tamaño, se les encuentra normalmente montados en sondas o alojamientos especiales que pueden ser específicamente diseñados para posicionarlos y protegerlos adecuadamente cualquiera que sea el medio donde tengan que trabajar.

Los alojamientos pueden ser de acero inoxidable, aluminio, plástico, bronce u otros materiales.

Parámetro	Magnitud
Intervalo de temperatura	-200 a 1000 °C
Resistencia a 25 °C	0.5 Ω a 100 MΩ (±5% ó ±10%) 1 kΩ a 10 MΩ es lo habitual
β	2000K a 5500K
Temperatura máxima	>125 °C 300 °C en régimen permanente 600 °C en régimen intermitente
Coefficiente de disipación, δ	$1 \frac{mW}{K}$ en aire en reposo $8 \frac{mW}{K}$ en aceite
Constante de tiempo térmica, τ	1 ms a 22 s
Potencia disipable	1 mW a 1 W

Tabla 3.7 Características generales de los termistores NTC de uso más frecuente

Las configuraciones constructivas del termistor de uso más común son los glóbulos, tipo barra, y los discos, según se ilustra en la figura 3.25.

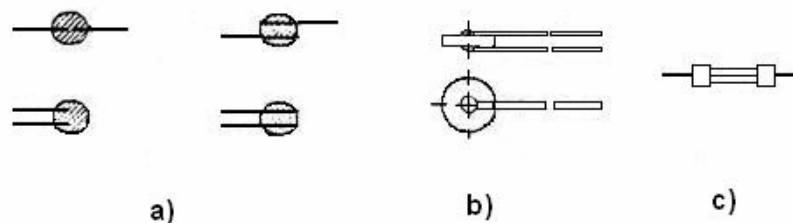


Figura 3.25 Formas constructivas de termistores

De acuerdo con la figura 3.25, se ilustran los tipos de termistores con base a su configuración constructiva:

- a) Tipo glóbulo con diferentes tipos de terminales
- b) Tipo disco
- c) Tipo barra

Especificaciones mecánicas

Las especificaciones mecánicas en un termistor, se refieren a:

- Tamaño y configuración adecuados para el uso previsto, como el método de montaje del elemento sensor, ya sea expuesto o encerrado, lo que a su vez determina la constante de disipación y la constante de tiempo.
- Material a utilizarse para la construcción del conjunto sensor del termistor, lo cual depende del medio, longitud de exposición y medio corrosivo, niveles de choque, vibración, humedad, temperatura de operación, intervalo de temperatura, y presión del medio al que se halla expuesto el termistor.

Especificaciones eléctricas

- Resistencia y tolerancia a cierta temperatura de referencia.
- Constante de disipación térmica δ : Es la potencia en mW que hará subir la temperatura del termistor 1 K encima de la temperatura ambiente, esta constante queda determinada por el tipo y tamaño del termistor utilizado, y por el método de montaje.
- El coeficiente de temperatura, o variación de resistencia por cada grado de variación de temperatura del termistor.
- Constante de tiempo: Es el tiempo necesario para que la temperatura del termistor cambie en un 63% de la diferencia entre su temperatura inicial y final, cuando se le somete a un cambio de temperatura asimilable a un escalón (por ejemplo, de 25 °C a 85 °C).

Intervalo de temperatura

La resistencia nominal de un termistor se elige fundamentalmente con base en el alcance de la temperatura de operación. Su intervalo de operación usual es de -200 °C a 1000 °C.

Autocalentamiento

La potencia disipada (PR) en el termistor hará subir su temperatura por encima de la ambiente. El incremento de temperatura es una función directa de la constante de disipación del termistor con su montaje dentro del medio ambiente donde opera.

Esta característica se aprovecha en los circuitos de retardo y para la supresión de transitorios.

Para el siguiente circuito, mostrado en la figura 3.28, el autocalentamiento está sometido a una constante de tiempo que supone un retardo entre la tensión aplicada y el instante en que se alcanza el calor de corriente estacionario.

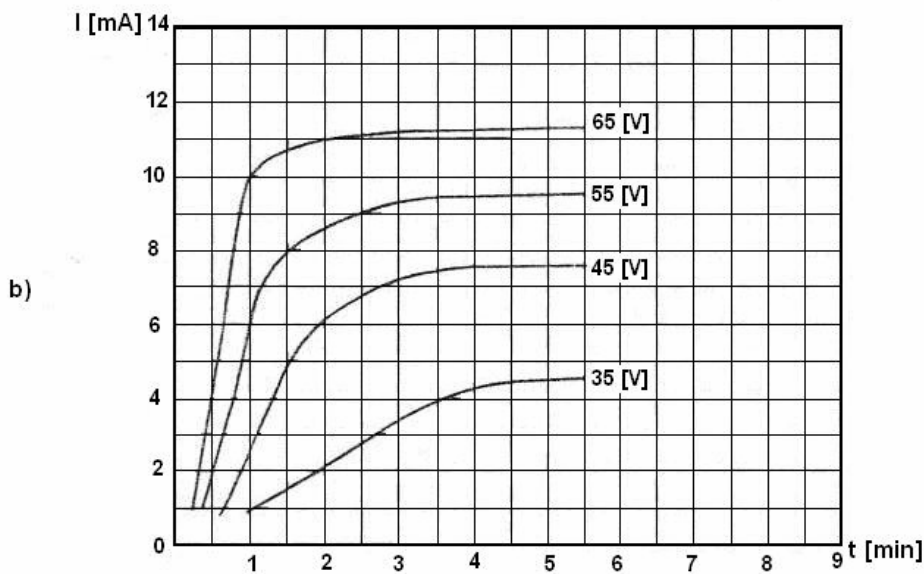
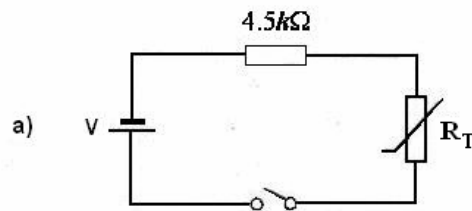


Figura 3.28 Característica corriente-tiempo para una determinada resistencia en serie con el termistor (Documentación Fenwal Electronics)

Representación matemática del comportamiento de un termistor

Se define un coeficiente de temperatura equivalente, o sensibilidad relativa, para un termistor como:

$$\alpha = \frac{dR_T}{R_T} \cdot \frac{dT}{dT} \dots\dots\dots (3.17)$$

De la ecuación (3.16), se obtiene que

$$\alpha = -\frac{\beta}{T^2} \dots\dots\dots(3.18)$$

De la ecuación (3.18) se observa la no linealidad del comportamiento.

El valor de β se puede encontrar midiendo la resistencia del termistor a dos temperaturas conocidas T_1 y T_2 . Si la resistencia respectiva es R_1 y R_2 , tendremos

$$\beta = \frac{\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \dots\dots\dots (3.19)$$

Para un termistor típico, en el margen de 0 a 50°C, el error cometido al emplear un modelo de dos parámetros basado en la ecuación (15) es del orden de $\pm 0.3^\circ\text{C}$.

Considerando tres parámetros, se logran errores de sólo $\pm 0.01^\circ\text{C}$ en un margen de 100 °C.

El modelo viene descrito en este caso mediante la ecuación de Steinhart y Hart, que se ilustra a continuación:

$$\frac{1}{T} = a + b \ln R_T + c(\ln R_T)^3 \dots\dots\dots(3.20)$$

Esta última ecuación se puede aplicar a la determinación de los parámetros a, b y c midiendo R_T a tres temperaturas distintas y resolviendo el sistema de ecuaciones.

A partir de a, b y c, el valor de R_T a una temperatura T viene dado por:

$$R_T = \exp \left[\left[-\frac{m}{2} + \left(\frac{m^2}{4} + \frac{n^3}{27} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{3}} + \left[\frac{m}{2} - \left(\frac{m^2}{4} + \frac{n^3}{27} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{3}} \right] \dots\dots\dots (3.21)$$

donde

$$m = \frac{a - \frac{1}{T}}{c} \dots\dots\dots(3.22)$$

$$n = \frac{b}{c} \dots\dots\dots (3.23)$$

Con cuatro parámetros se logra un mejor ajuste entre la curva real de evolución de R_T y la ecuación teórica. Con un modelo de la forma:

$$\frac{1}{T} = a + b \ln R_T + c(\ln R_T)^2 + d(\ln R_T)^3 \dots\dots\dots (3.24)$$

se logra un error de sólo .0015 °C, para un termistor típico en un margen de 0 a 100 °C. En este caso, los parámetros se determinan midiendo R_T a cuatro temperaturas distintas conocidas.

Como consecuencia del efecto Joule I^2R , se tiene una disipación de potencia eléctrica en el termistor, lo que causará que el elemento se caliente por encima de su temperatura ambiente.

Cuando aumenta la corriente, el termistor sufre un autocalentamiento apreciable y alcanza una temperatura por encima de la del ambiente, reduciéndose su resistencia y, por lo tanto, la caída de tensión a través del termistor.

La razón a la cual le energía es disipada como calor en un termistor puede ser modelada como:

$$\frac{dQ}{dt} = I^2R = \partial(T - T_{amb}) + mc_p \frac{dT}{dt} \dots\dots\dots(3.25)$$

Donde:

Q [J] es la energía suministrada al termistor

t [s] es el tiempo

T [°C] es la temperatura

T_{amb} [°C] es la temperatura ambiente

$c_p \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$ es la capacidad calorífica específica

m [kg] es la masa del termistor

$\partial \left[\frac{J}{s \cdot K} \right]$ es la constante que determina la razón de pérdida de calor a los alrededores

como una función de la diferencia de temperatura

3.10 RESISTOR DEPENDIENTE DE LA TEMPERATURA (RTD)

Los termómetros industriales de resistencia, también llamados RTD (por sus siglas en inglés Resistance Temperature Detectors) son básicamente, instrumentos para medir temperatura en función de la resistencia eléctrica, y se calibran para indicar lecturas de temperatura directamente en vez de unidades de resistencia óhmica, siendo un método bastante exacto de medición de temperatura.

Pueden usarse varios tipos de material como elementos resistores, siendo el cobre, níquel y platino los más empleados.

Los RTD son en principio bobinas de alambre enrolladas dentro o alrededor de soportes de material aislante capaz de soportar la temperatura para la que se diseñó el termómetro.

Algunos de los tipos de devanado de resistencias más empleados en aplicaciones industriales incluyen:

- a) Devanados espaciados de alambre no recubierto sobre un eje aislador cilíndrico.
- b) Alambre aislado devanado uniformemente sobre un eje de plástico, metal o cerámica.
- c) Alambre no recubierto enrollado sobre una tira angosta de mica con muescas uniformes.
- d) Alambre no recubierto devanado en una hélice pequeña alrededor de tiras de mica cruzadas y con muescas uniformes.
- e) Alambre no recubierto devanado en forma de pequeña hélice o bobina, que se inserta en una ranura de doble espiral de un tubo metálico o de cerámica aislado y de paredes delgadas.
- f) Una tira de papel metálico muy delgado.
- g) En una tela tejida de malla de alambre.

Estos devanados se colocan con mucho cuidado de manera que ni el alambre ni el soporte de montaje se rompa debido a los cambios de temperatura dentro del intervalo de operación para el que fueron diseñados. Existe siempre el peligro de que el alambre o la tira se rompan o estiren si se sobrepasa el intervalo de temperatura.

El símbolo general para estos dispositivos es el de la figura 3.29. La línea recta en diagonal sobre el resistor indica que varía de forma intrínseca lineal, y la anotación junto a dicha línea denota que la variación es debida a la temperatura y tiene coeficiente positivo.

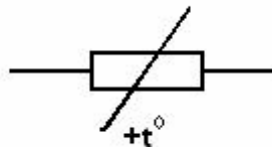


Figura 3.29 Símbolo para una resistencia con dependencia intrínseca de la temperatura

3.10.1 PRINCIPIO DE OPERACIÓN

El fundamento de los RTD es la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura.

En un conductor, el número de electrones disponibles para la conducción no cambia apreciablemente con la temperatura, pero si ésta aumenta, las vibraciones de los átomos alrededor de sus posiciones de equilibrio son mayores, y así dispersan más eficazmente a los electrones, reduciendo su velocidad media.

La siguiente figura muestra la linealidad de varios metales para un amplio intervalo de temperatura contra resistencia a corriente directa (cd). Los datos adquiridos para producir estas curvas son obtenidos para metales de la misma longitud y misma área seccional.

Los RTD son fabricados comúnmente de platino, cobre o níquel. En la siguiente figura puede verse las curvas de resistencia relativa de dichos metales en función de la temperatura.

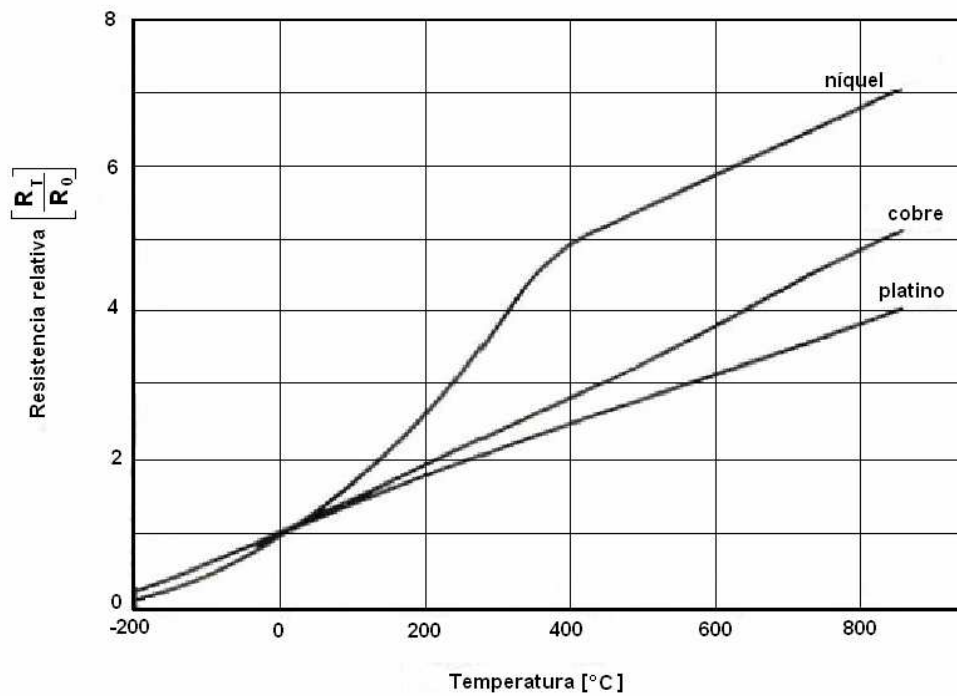


Figura 3.30 Gráfica de resistencia dc vs. temperatura para varios metales

Donde R_0 es la resistencia a una temperatura de referencia T_0 , y R_T es la resistencia a cualquier temperatura T que pertenezca al intervalo de operación del dispositivo.

Para cualquier metal dado, su resistencia de corriente directa varía directamente proporcional con su temperatura.

La resistencia en función del área seccional y longitud, manteniendo una temperatura de referencia, se expresa en la ecuación (3.26).

$$R = \frac{\rho l}{A_{CM}} \dots\dots\dots (3.26)$$

Donde:

R [Ω] es resistencia del alambre

ρ [$\Omega \cdot cm$] es la constante de resistividad

l [cm] es la longitud

A_{CM} [cm^2] es el área seccional del alambre

Cuando un material cambia de resistencia en función de una variación en la temperatura, el cambio se denomina coeficiente de temperatura de la resistencia del material. Este coeficiente se expresa en ohms por grado de temperatura, a una temperatura dada, y es positivo para la mayoría de los metales.

Con el fin de obtener la más alta sensibilidad de medición posible, es muy conveniente tener mayor cambio de resistencia por grado para un valor de resistencia específico, pero también es necesario que el material posea una buena estabilidad durante un largo periodo(años) y en una amplia gama de temperaturas, sin cambiar sus características eléctricas.

Los metales que se emplean en la fabricación de los RTD tienen un alto grado de linealidad sobre el intervalo de temperatura de la resistencia para la que se diseñó cada una en particular. La mayor parte de los metales puros tienen un cambio de resistencia en función de la temperatura, prácticamente lineal por lo menos durante una porción de su curva de resistencia-temperatura.

La relación entre la resistencia y la temperatura se puede expresar matemáticamente en la forma siguiente:

$$R_T = R_0 (1 + \alpha \cdot \Delta T) \Rightarrow \alpha = \left(\frac{R_T - R_0}{R_0 \cdot \Delta T} \right) \dots\dots\dots (3.27)$$

En donde:

R_0 [Ω] es la resistencia a una temperatura de referencia

R_T [Ω] es la resistencia a una temperatura T

α $\left[\frac{1}{^\circ\text{C}} \right]$ es el coeficiente lineal de temperatura de resistencia

ΔT [$^\circ\text{C}$] es la diferencia de temperatura (T – T₀)

Para márgenes de temperatura más amplios, en los casos que el coeficiente de resistencia-temperatura no sea lineal, la resistencia del material se expresa mediante una relación cuadrática:

$$R_r = R_0 (1 + aT + BT^2) \dots\dots\dots (3.28)$$

Donde:

R_T [Ω] es la resistencia a la temperatura T

R_0 [Ω] es la resistencia a la temperatura de referencia T₀

a,b son constantes determinadas experimentalmente

El instrumento receptor de señal lee la temperatura como cambios en corriente, la cual se suministra al circuito del sensor. Vistos de otra manera, como cambios de temperatura o de resistencia del sensor.

Debido a que es un mecanismo de resistencia, su operación genera calor extra al calor que se está midiendo. Cuando especificamos el uso de un RTD, su masa y el calor que genera deben ser tomados en cuenta.

Idealmente la sustancia que está siendo medida tendrá el suficiente volumen y conductividad térmica para que el calor que genere el RTD sea un factor despreciable. Ajustando los parámetros del instrumento se puede tomar en cuenta el calor que genera el RTD y desarrollar lecturas lo suficientemente precisas para una determinada aplicación.

3.10.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE UN RTD

Constante de tiempo

La constante de tiempo, o el tiempo de respuesta térmica, es una expresión de qué tan rápido el sensor(en este caso el RTD), responde a los cambios de temperatura. El tiempo de respuesta es definido como el tiempo que le lleva al sensor llegar al 63.2% de un cambio de temperatura.

Un rápido tiempo de respuesta es esencial para la precisión en un sistema con repentinos cambios de temperatura. Las características de respuesta pueden ser alteradas también por cambios en la medida del elemento, el diámetro de la funda, el grosor de la pared de la funda y técnicas especiales de empaque.

Intercambialidad del RTD

La intercambialidad es comúnmente citada como un factor de precisión del RTD. Esta nos dice que tan cerca el elemento sensor de un RTD sigue su curva nominal de resistencia-temperatura, y la máxima variación que debe existir en las lecturas de termómetros idénticos, montados igual sobre condiciones idénticas.

La intercambialidad consiste de dos puntos, una tolerancia a una temperatura de referencia, usualmente 0 °C, y una tolerancia en el declive, o el coeficiente de temperatura de la resistencia (TCR).

Hay dos tipos de estándar utilizados en la industria, el estándar DIN y el estándar JIS. El estándar más comúnmente usado en México es el DIN, el cual usa un TCR de

$0.00385 \frac{\Omega}{\Omega \cdot ^\circ C}$ para un RTD de platino.

Coefficiente de temperatura de la resistencia (TCR)

TCR (Temperature Coefficient of Resistance) o coeficiente de temperatura de la resistencia, es un factor que indica el incremento de resistencia promedio por grado celsius de un RTD.

Por ejemplo, un RTD de platino con una medición de resistencia de 100Ω a 0°C , y 138.5Ω a 100°C tiene un TCR de $0.00385 \frac{\Omega}{\Omega \cdot ^\circ\text{C}}$, calculado de la siguiente forma:

$$\text{TCR} = \frac{R_{100^\circ\text{C}} - R_{0^\circ\text{C}}}{R_{0^\circ\text{C}} \cdot 100^\circ\text{C}} \dots\dots\dots (3.29)$$

$$\text{TCR} = \frac{138.5\Omega - 100\Omega}{100\Omega \cdot 100^\circ\text{C}} = 0.00385 \frac{\Omega}{\Omega \cdot ^\circ\text{C}}$$

A continuación se muestra la tabla 3.8 en la que se incluyen diversos parámetros para los RTD de níquel, cobre y platino.

Metal	Resistividad [$\mu\Omega \cdot \text{cm}$]	TCR [$\frac{\Omega}{\Omega \cdot ^\circ\text{C}}$]	Intervalo útil de temperatura [$^\circ\text{C}$]	Costo Relativo	Resist. Sonda a 0°C [Ω]	Precisión [$^\circ\text{C}$]
Platino	9.83	0.00385	(-200,850)	alto	25,100,1 30	0.01
Níquel	6.38	0.0063 a 0.0066	(-150,300)	medio	100	0.5
Cobre	1.56	0.00425	(-200,120)	bajo	10	0.1

Tabla 3.8 Parámetros diversos para los RTD de platino, níquel y cobre

Intervalo de temperatura

Los RTD de platino son utilizados en un intervalo de temperatura de -200°C hasta 850°C . La limitación de los otros materiales para elementos RTD (níquel y cobre) es que su intervalo de temperatura de operación es mucho más bajo que los de platino.

Estabilidad y repetibilidad

Los RTD son muy estables al paso del tiempo, esto significa que las mediciones con el RTD son mucho más precisas sobre un periodo dado de tiempo.

La repetibilidad se refiere a la habilidad de los RTD de medir exactamente la misma temperatura después de ciclos de calentamientos y enfriamientos repetitivos.

Sensibilidad

0.1 a $10 \frac{\Omega}{^{\circ}C}$

Autocalentamiento

Una de las dificultades al emplear un RTD es la determinación de cuánta corriente puede permitir a través de él. La cantidad de corriente es una función del voltaje suministrado a través de las terminales del RTD.

Una cantidad excesiva de voltaje puede causar que el RTD genere una disipación de calor excesiva debida al efecto Joule ($P = I^2R$), y por consiguiente, un autocalentamiento.

Debido a esto, los fabricantes publican el denominado error de autocalentamiento representado por P_{SHE} en las hojas de especificaciones del RTD empleado, y nos determina el incremento de temperatura interno del RTD debido a 1 mW de potencia disipada por efecto Joule.

Se define el incremento temperatura T_{SH} debido a efectos de autocalentamiento como:

$$T_{SH} = P_{SHE} \cdot P_{RTD} \dots\dots\dots (3.30)$$

Donde:

T_{SH} [$^{\circ}C$] es el incremento de temperatura debido a efectos de autocalentamiento

$P_{SHE} \left[\frac{^{\circ}C}{mW} \right]$ es el error de autocalentamiento

P_{RTD} [mW] es la potencia consumida por el RTD

Identificación de los RTD

Un RTD de dos alambres usualmente usa el mismo color en ambas terminales, si se mide la resistencia entre los dos alambres (a temperatura ambiente), la resistencia del RTD estará entre 107 y 110 Ω .

Por los estándares DIN-IEC-751 y ASTM E1137, un RTD DIN de 3 alambres tiene dos terminales rojas y una blanca (alambre de compensación). Un RTD DIN de 4 alambres tiene dos terminales rojas y dos terminales blancas. Para saber que terminal blanca va con que terminal roja cuando no están etiquetados, se mide el valor de las resistencias entre las terminales. Para identificar las terminales se comparan los valores de resistencia obtenidos con los expuestos en la tabla 3.9.

Medida terminal a terminal	Resistencia a temperatura ambiente [Ω]
1 y 2 3 y 4	de menos de 1 Ω a pocos ohms máximo
1 y 3; 1 a 4 2 y 3; 2 y 4	107 a 110

Tabla 3.9 Medidas de resistencia para un RTD DIN de 4 alambres

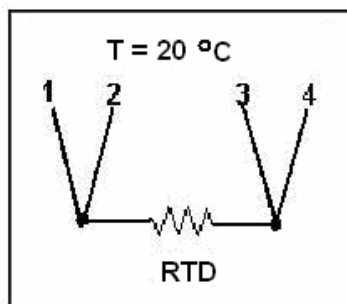


Figura 3.31 Esquema de un RTD DIN de 4 alambres

Clases de RTD

El error en la lectura de los valores de la sonda es llamada también tolerancia; de acuerdo con la norma IEC751-1983, esta relación es idéntica con la JIS C 1604-1997, BS EN 60751 y la DIN EN 60751.

A continuación se muestra la tolerancia en la tabla 3.10, en donde $|t|$ es el valor absoluto de la temperatura.

Clase	Tolerancia
A	$\Delta R = \pm(0.15 + 0.002 \cdot t) [^{\circ}\text{C}]$
B	$\Delta R = \pm(0.3 + 0.005 \cdot t) [^{\circ}\text{C}]$

Tabla 3.10 Clases de RTD

La tolerancia para la clase “A” aplica a temperaturas de -200 a 650 $^{\circ}\text{C}$, mientras que la tolerancia de la clase “B” aplica a temperaturas de -200 a 850 $^{\circ}\text{C}$.

En cuanto a la disposición física, hay modelos tanto para inmersión en fluidos como para medir temperaturas superficiales.

3.10.3 CIRCUITOS ACONDICIONADORES DE SEÑAL PARA LOS RTD

Debido al pequeño cambio en resistencia para un cambio dado de temperatura que se produce al emplear un RTD, el puente de Wheatstone, o alguna variación de este circuito, es empleado para poder realizar mediciones de temperatura empleando un RTD.

Circuito RTD no-compensado de dos alambres

La figura 3.32 muestra un sistema en base a RTD básico de dos alambres. Los resistores, R_{L1} y R_{L2} , son las resistencias equivalentes de las terminales que conectan el RTD, representado por R_3 .

Cuando el puente está balanceado, la siguiente condición es alcanzada:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_{L1} + R_{L2} + R_3}{R_4} \dots\dots\dots (3.31)$$

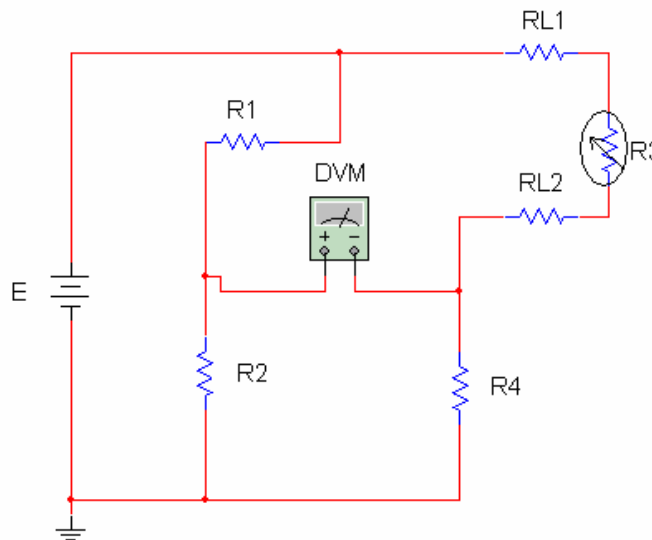


Figura 3.32 Circuito RTD no-compensado de dos alambres

El circuito posee máxima sensibilidad a cambios de temperatura cuando $R_1 = R_2 = (R_{L1} + R_{L2} + R_3) = R_4$. Nótese, sin embargo, que la resistencia de las terminales R_{L1} y R_{L2} tiene una influencia determinante en la resistencia total del RTD para una temperatura dada.

Circuito RTD de dos alambres compensado

Una forma para compensar parcialmente por la inclusión de la resistencia de las terminales R_{L1} y R_{L2} al circuito sensor que contiene un RTD representado por R_3 es la adición de una resistencia de compensación R_C a la estructura del puente de Wheatstone, como se muestra en el siguiente diagrama:

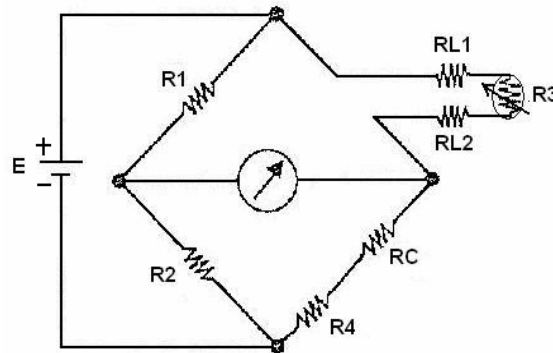


Figura 3.33 Circuito 1: RTD de dos alambres compensado

Otro modo de obtener una compensación es colocando el resistor R_C cerca de las terminales que conectan el RTD.

De esta forma, cualquier cambio en la resistencia de las terminales del RTD debido a la temperatura, será parcialmente nulificado por un cambio similar de resistencia en R_C . Este arreglo se muestra en la siguiente figura:

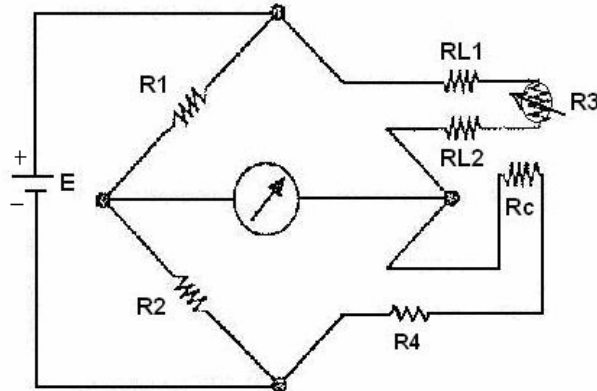


Figura 3.34 Circuito 2: RTD de dos alambres compensado

Circuito RTD de tres alambres

El circuito RTD de tres alambres debe ser empleado cuando la resistencia de las terminales que conectan el RTD sea significativa comparada con la magnitud de resistencia del RTD mismo.

La resistencia de la terminal R_{L1} es uno de los brazos del puente, mientras R_{L2} está en otro brazo, y como resultado de esta configuración, las dos resistencias cancelan el efecto entre sí.

Durante la condición de balance del puente, no hay flujo de corriente a través de R_{L3} puesto que dicho resistor está colocado en el brazo central.

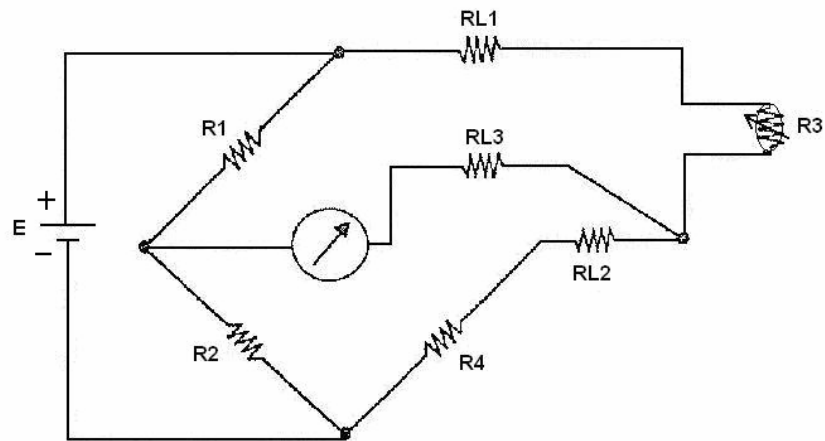


Figura 3.35 Circuito RTD de tres alambres