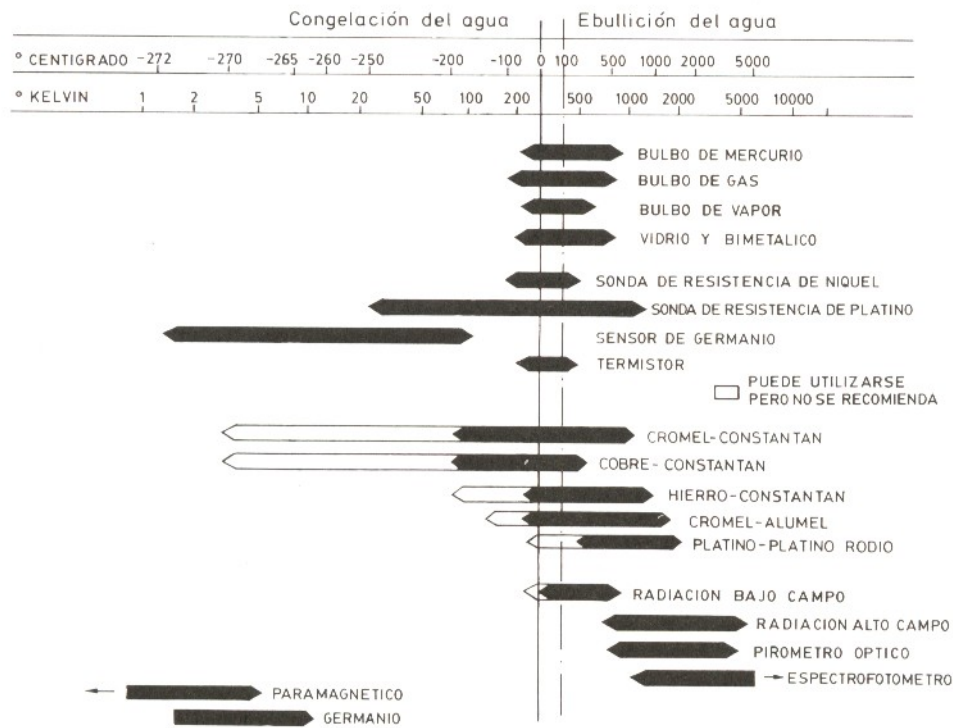


SENSORES DE TEMPERATURA

Campos de medida - instrumentos:



Fenómenos utilizados para sensar temperatura:

- (1) Variaciones en volúmen o en estado de los cuerpos (sólidos, líquidos o gases).
- (2) Variación de resistencia de un conductor (sondas de resistencia).
- (3) Variación de resistencia de un semiconductor (termistores).
- (4) fem creada en la unión de dos metales distintos (termopares).
- (5) Intensidad de la radiación total emitida por el cuerpo (pirómetros de radiación).
- (6) Etc.

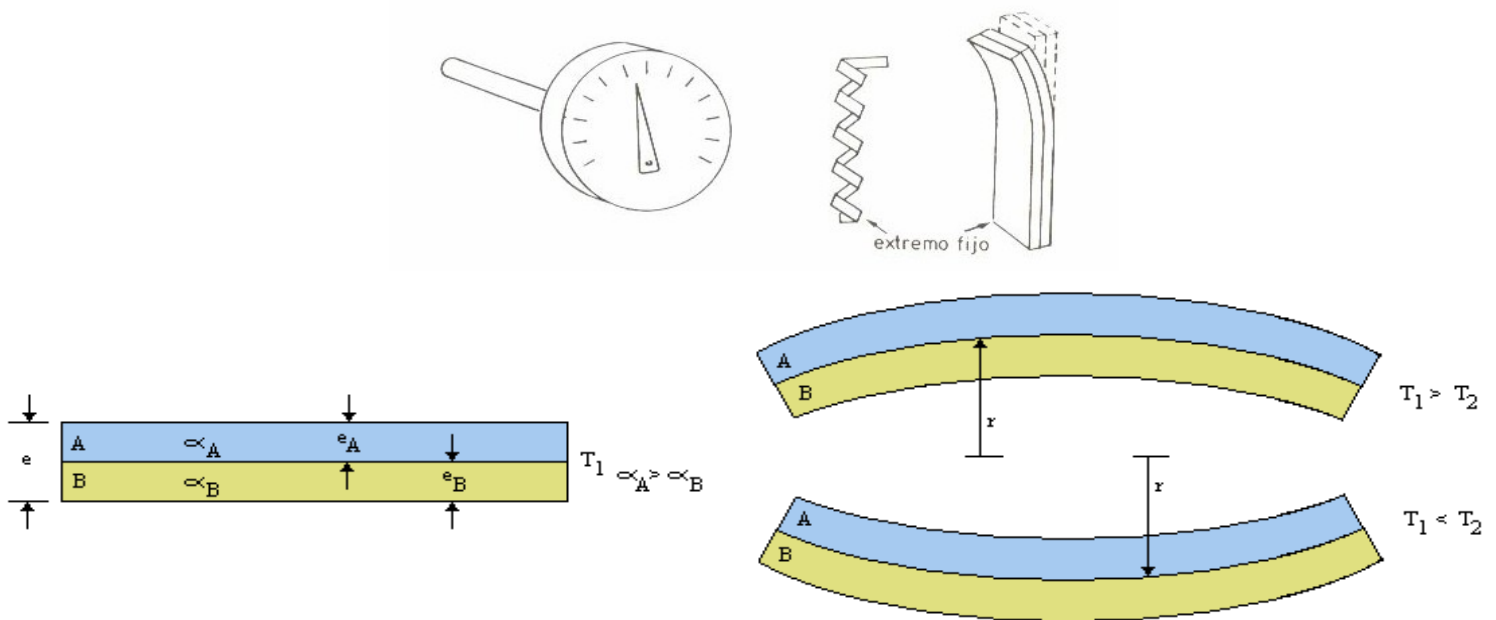
Termometro de vidrio:

Márgenes de trabajo:

Mercurio	-35 - +280° C.
Mercurio (tubo capilar lleno de gas)	-35 a + 450 °C.
Pentano	-200 a +20° C.
Alcohol	-70 a +100 ° C.

Termómetro bimetalico:

- Su base, el distinto coeficiente de dilatación de dos metales diferentes (p.e.: latón o monel y una aleación de ferroníquel o Invar (35,5% Níquel)), laminados conjuntamente.



- Posee pocas parte móviles, solo la aguja indicadora sujeta al extremo libre de la espiral o de la hélice y el propio elemento bimetalico.
- Generalmente los bimetalicos comerciales poseen un espesor entre 10 μm y 3 mm, para obtener una alta sensibilidad.
- La temperatura a los cuales son sometidos estos sensores van desde **-75°C a 540°C**. Sus formas varían de voladizo, espiral, hélice, etc.
- Son muy empleados como elementos de **control on-off**, cortando un flujo de corriente que pasa a través de ellos.

Termómetro de bulbo y capilar:

Consisten esencialmente en un bulbo conectado por un capilar a una espiral.

Clasificación:

- Clase I: termómetros actuados por líquido.
- Clase II: termómetros actuados por vapor.
- Clase III: termómetros actuados por gas.
- Clase IV: termómetros actuados por mercurio.

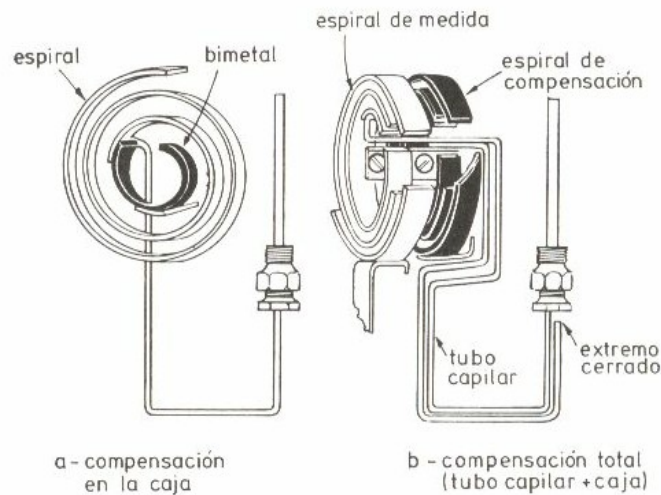
- **Clase I:** Básicamente, alcohol y éter.

Poseen el sistema de medición lleno de líquido y como su dilatación es proporcional a la temperatura, la escala de medición resulta uniforme.

Compensación por temperatura ambiente:

Para capilares cortos (hasta 5m), solo hay que compensar el elemento de medición para evitar errores debidos a variaciones de la temperatura ambiente (Clase IB).

Para capilares largos hay que compensar también el volumen del tubo capilar (Clase IA).



Campo de aplicación: entre 150 y 500° C., dependiendo del tipo de líquido que se emplee.

Clase II:

- Estos, contienen un líquido volátil y se basan en los principios de presión de vapor. Al subir la temperatura, aumenta la presión de vapor del líquido.
- La escala de medición no es uniforme, sino que las distancias entre divisiones van aumentando hacia la parte más alta de la escala.
- La presión del sistema, depende solamente de la temperatura del bulbo \Rightarrow no necesita compensación.

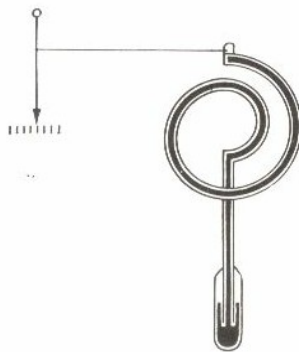


Fig. 6.5 Sistema térmico clase IIA.

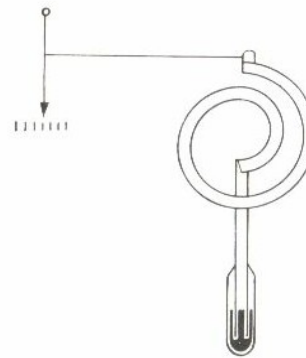


Fig. 6.6 Sistema térmico clase IIB.

- **Clase III:**

En estos, el bulbo se encuentra lleno de gas. Al subir la temperatura, la presión del gas aumenta proporcionalmente y por lo tanto estos termómetros tienen escalas lineales .

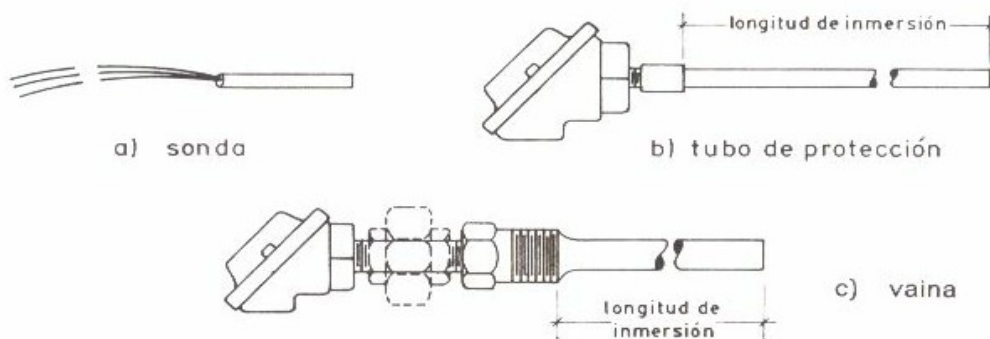
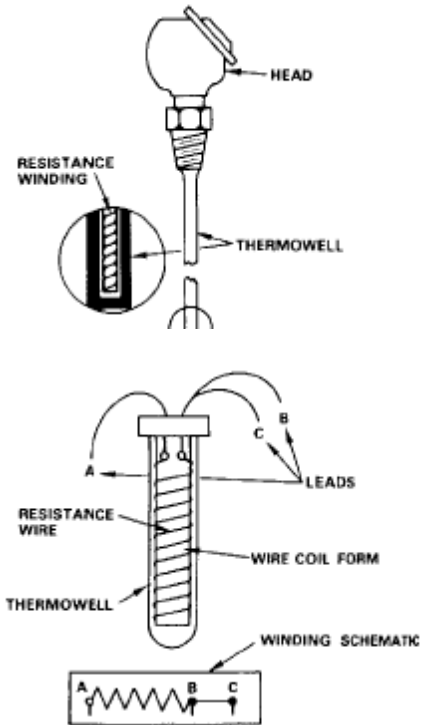
La presión en el sistema depende principalmente de la temperatura del bulbo, pero también de la temperatura del tubo capilar y del elemento de medición, siendo necesario compensar la temperatura del ambiente en el sistema de medición.

- **Clase IV:**

Son similares a los termómetros actuados por líquido. Pueden tener compensación en la caja y compensación total.

Termómetros de resistencia:

- Su principio de funcionamiento se basa en el flujo de electrones a través de la resistencia. Al variar la temperatura en el material resistivo, el flujo de electrones varía. Es decir la resistencia presenta una variación con la temperatura.
- El elemento consiste, usualmente en un arrollamiento de hilo muy fino del conductor adecuado, bobinado entre capas de material aislante y protegido con un revestimiento de vidrio o de cerámica.
- Las bobinas que llevan arrollado el hilo de resistencia, están encapsuladas y situadas dentro de una vaina (acero inoxidable 304)



Ley que sigue el instrumento: $R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 + \dots + \alpha_n T^n)$ – válida de 0 a 850°C.,

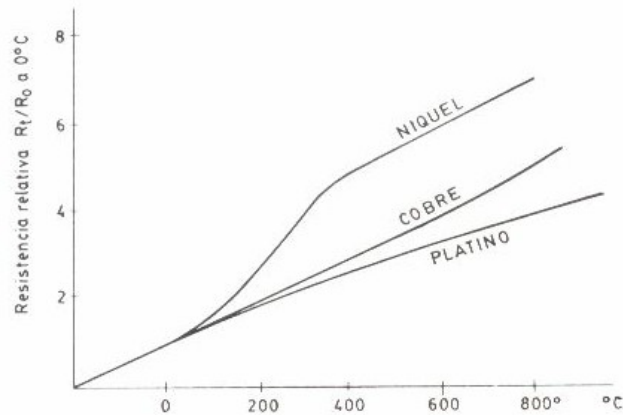
pudiéndose aproximar bajo ciertas circunstancias (region lineal) a:

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha(T - T_0))$$

R_0 : resistencia a T_0 °C (Ω).

R_t : resistencia a T °C (Ω).

α : coeficiente de temperatura de la resistencia. Entre 0° C y 100° C $\alpha = 0,003850$ 1/°C



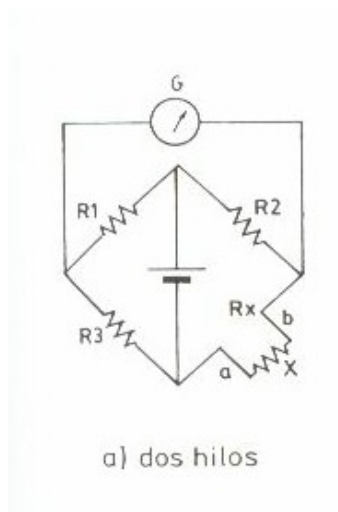
- El platino, es el material mas adecuado desde el punto de vista de precisión y de estabilidad, pero presenta el inconveniente de su alto costo.

Nota: a nivel de industria, la sonda más utilizada Pt100 ($R_0= 100 \Omega$, $T_0=0^\circ\text{C}$)

Otras: Pt500 y Pt1000

- El níquel, podría ser una variante del platino para éstos termómetros, pero observar su no linealidad. El cobre tiene el inconveniente de su baja resistividad.
- La salida de éstas sondas, son enviadas a un puente de Wheastone dispuesto en distintos montajes.

- **Montaje de dos hilos:**



Se varía R_3 hasta que se anula la desviación del galvanómetro, entonces se cumple:

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{X} \quad \Rightarrow \quad X = R_3 \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

X: valor de la sonda de resistencia.

Es un montaje barato y sencillo, pero la resistencia de los hilos a y b de conexión de la sonda al puente varía cuando cambia la temperatura, y ésta variación falsea por lo tanto la indicación. Además, las longitudes que puede haber en campo entre la sonda y el panel donde esté el instrumento receptor, añaden una cierta resistencia.

La ecuación corregida sería:

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{X + K \cdot (a + b)}$$

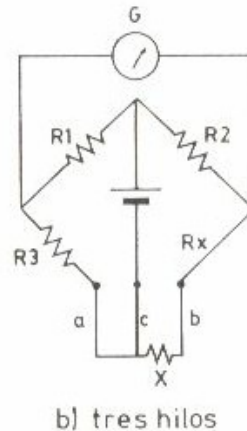
K: coeficiente de temperatura por unidad de longitud.

a y b: longitudes de los hilos.

Por lo tanto, éste tipo de montaje se utiliza cuando la lectura no necesita ser demasiado exacta.

- **Montaje de 3 hilos:**

En éste circuito la sonda está conectada mediante 3 hilos al puente.



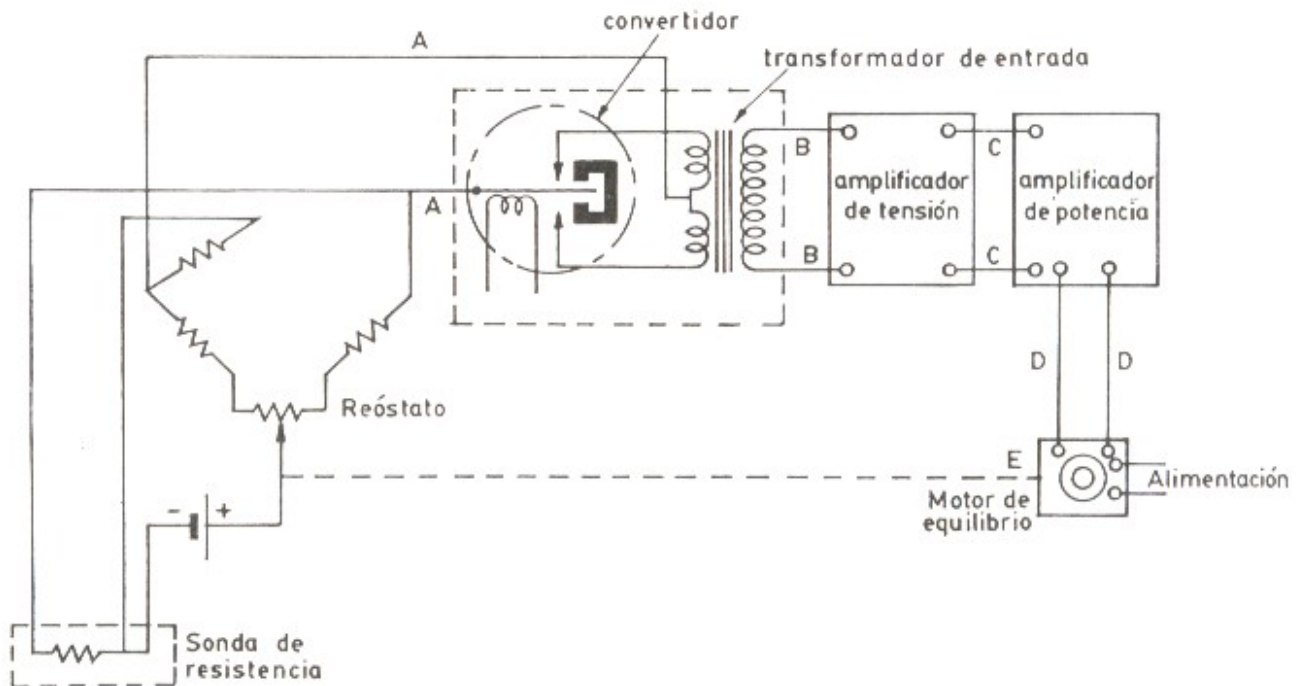
Ahora, la medida no es afectada por la longitud de los conductores ni por la temperatura, ya que ésta influye a la vez en dos brazos adyacentes del puente, siendo la única condición que la resistencia de los hilos a y b sea exactamente la misma.

$$\Rightarrow \frac{R_1}{R_3 + K.a} = \frac{R_2}{X + K.b}$$

Como $K.a = K.b$, haciendo $R_2/R_1 = 1$, R_3 puede ajustarse a un valor igual a X para que el galvanómetro no indique tensión.

Para una medición automática con éste tipo de termómetro, se lleva a cabo mediante instrumentos autoequilibrados que utilizan un circuito de **puente de Wheastone**.

Para la medición automática de la resistencia y por lo tanto de la temperatura se lleva a cabo mediante instrumentos AUTOCALIBRADOS

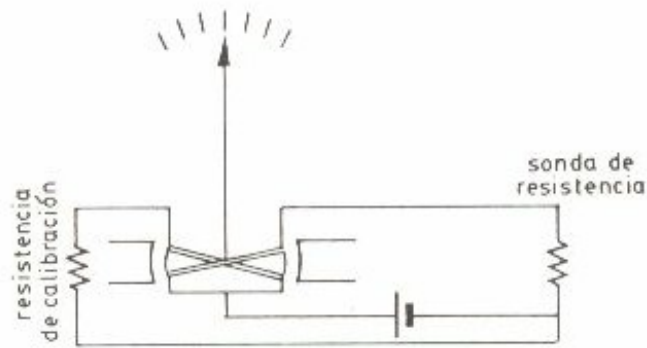


Puente de Wheastone para sonda de resistencia

La sonda está conectada al puente mediante un circuito de 3 hilos. Si el puente está desequilibrado, la señal de error en forma de tensión continua que aparece en AA, es convertida a una tensión alterna BB y amplificada en tensión CC y potencia DD, para excitar el motor de equilibrio E.

Este mueve en la dirección adecuada para equilibrar el puente a través del brazo móvil del reóstato que al mismo tiempo acciona los mecanismos asociados de indicación, registro y control.

Bobinas cruzadas:

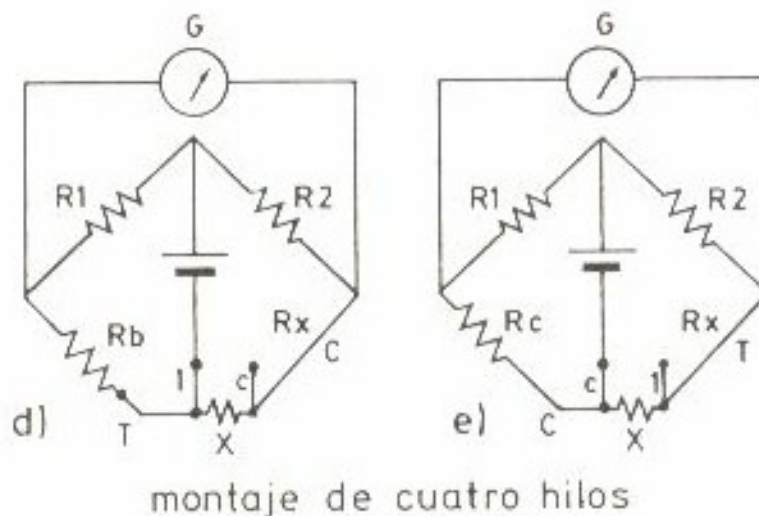


Tiempo atrás, se usaban en éste montaje, para no tener que utilizar un galvanómetro y montaje en tres hilos para eliminar las variaciones de resistencia de las líneas de conexión.

El instrumento dispone de una resistencia de calibración que inicialmente equivale a la resistencia de medida.

De éste modo, por ambas bobinas pasa la misma corriente, compensándose sus efectos y permaneciendo estacionario el índice. Al elevarse la temperatura de la sonda crece su resistencia, desequilibrando el instrumento y señalando el índice un nuevo valor proporcional al aumento de T de la sonda.

- **Montaje de 4 hilos:**



Se utiliza para obtener la mayor precisión posible en la medida (usado en laboratorios).

Termistores:

- Los termistores, son semiconductores electrónicos con un coeficiente de temperatura de resistencia negativo (o positivo) de valor elevado, por lo que presentan unas variaciones rápidas y extremadamente grandes para los cambios relativamente pequeños en la temperatura.
- A diferencia de los RTD, los termistores se basan en semiconductores y no en conductores.



Fig. 1.21.- Símbolos del termistor: PTC y NTC.

- Materiales usados: óxidos de níquel, manganeso, hierro, cobalto, etc.

Ley que gobierna el fenómeno:

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

R_0 : resistencia a $T_{ref} = T_0$ (absoluta).
 β : etc. dentro de un intervalo moderado de temperaturas.

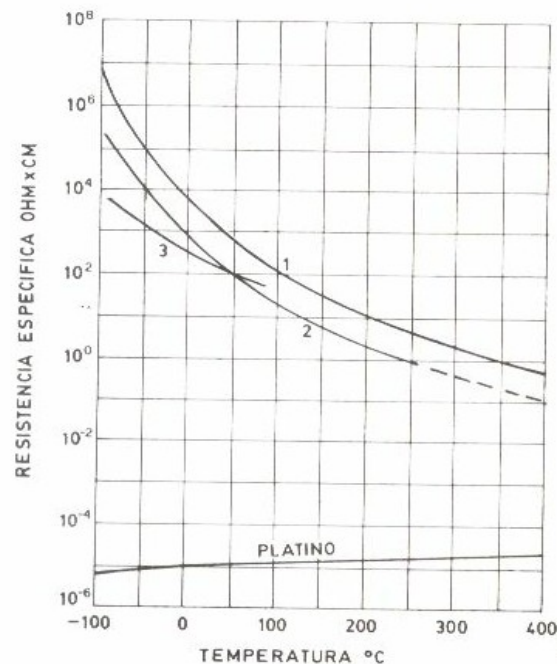


Fig.

- La salida de los termistores, se conectan a circuitos de puente de Wheatstone convencionales.
- Son de pequeño tamaño y su tiempo de respuesta depende de la capacidad térmica y de la masa del termistor.
- La distancia entre el termistor y el instrumento de medida puede ser considerable siempre que el elemento posea una alta resistencia comparada con la de los cables de unión.
- La corriente que circula por el termistor a través del circuito de medida debe ser baja para garantizar que la variación de resistencia del elemento sea debida exclusivamente a los cambios de temperatura del proceso.

Termopares:

Los termopares son unos de los sensores más sencillos y de los más utilizados en las industrias para determinar la temperatura de un proceso. Este sensor [esta constituido por la unión de dos metales](#), la cual es sometida a la temperatura a ser medida.

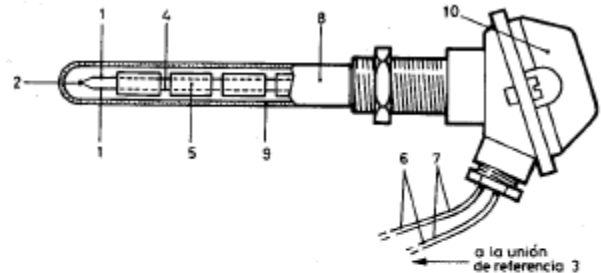
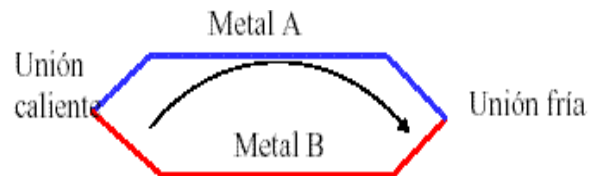


Figura 6.4 Termopar industrial con vaina

- | | |
|---|---|
| 1. Conductores (diferentes) | 7. Cables de compensación, diferentes de los del termopar pero con f.t.e.m. pequeña |
| 2. Unión de medida | 8. Caña pirométrica |
| 3. Unión de referencia | 9. Protector (cubierta externa) |
| 4. Hilos de termopar sin aislar | 10. Cabeza de la caña |
| 5. Hilos de termopar aislados | |
| 6. Cables de extensión iguales a los del termopar | |

Efecto Seebeck:

- Se basa en que la circulación de corriente por un circuito formado por 2 metales diferentes cuyas uniones (unión de medida o caliente y unión de referencia o fría) se mantienen a distinta temperatura.
- Esta circulación de corriente obedece a 2 efectos termoeléctricos combinados, el [efecto Peltier](#) que provoca la liberación o absorción de calor en la unión de 2 metales distintos cuando una corriente circula a través de la unión y el [efecto Thompson](#) que consiste en la liberación o absorción de calor cuando una corriente circula a través de un metal homogéneo en el que existe un gradiente de temperaturas.



Ventajas

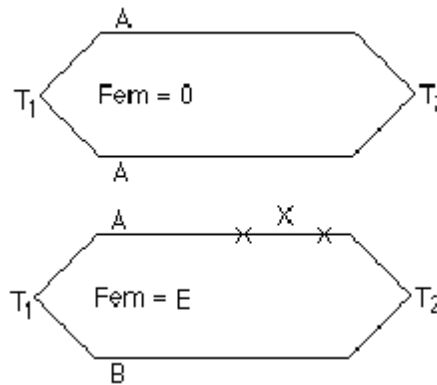
- Determinación puntual de la temperatura
- Respuesta rápida a las variaciones de temperatura
- No necesita alimentación
- Rango de temperaturas grande: $- 270^{\circ}\text{C} \rightarrow 3000^{\circ}\text{C}$
- Para bajas temperaturas tienen mayor exactitud que las Pt100
- Estabilidad a largo plazo aceptable y fiabilidad elevada

Inconvenientes

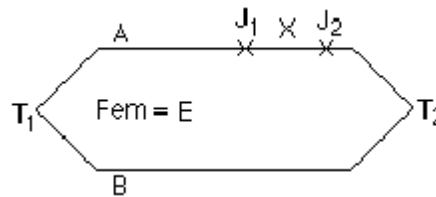
- Mantener la unión de referencia a una temperatura constante y conocida
- Respuesta no lineal.
- La temperatura máxima que alcance el termopar debe ser inferior a su temperatura de fusión.
- El medio donde se va a medir no ataca a los metales de la unión.
- La corriente por el termopar debe ser muy pequeña para despreciar el efecto Joule.

La operación de un termopar se rige por cuatro leyes que se exponen continuación.

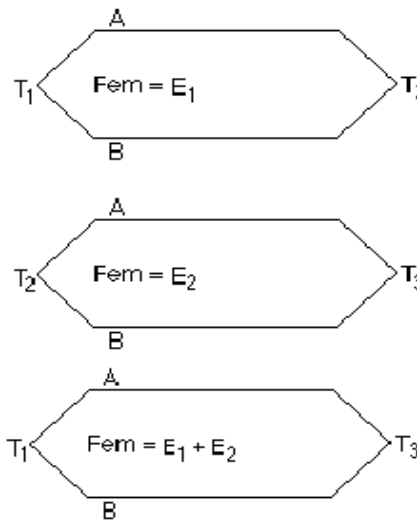
- (1) Ley de la temperatura externa. Una corriente eléctrica no se puede mantener en un circuito compuesto por un sólo metal homogéneo al aplicar calor en los extremos. Ahora, si dos metales, A y B, son sometidos a temperaturas T_1 y T_2 en sus uniones entonces, existirá una fuerza electromotriz generada en los extremos.



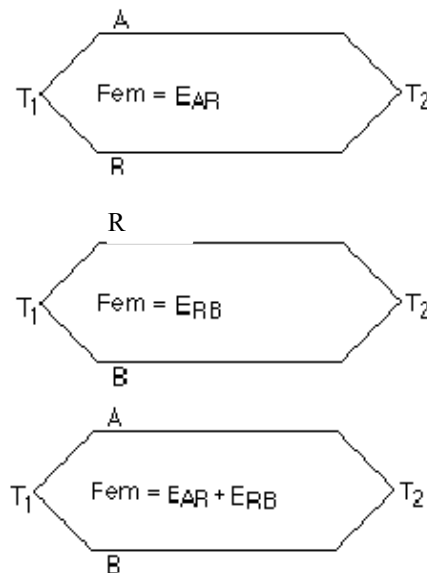
- (2) Ley del metal intermedio. Dos metales homogéneos A y B tienen sus uniones a temperaturas T_1 y T_2 . Si un tercer metal X se conecta en un corte del metal A formando uniones J_1 y J_2 y la temperatura a la que está sometido el metal X es uniforme en toda su longitud entonces, la fem generada en el arreglo será igual a aquella sin el conductor X.



- (3) Ley de la temperatura intermedia. Si dos metales homogéneos A y B están sometidos a temperaturas T_1 y T_2 en sus uniones generando una fem E_1 y se efectúa un cambio en las temperaturas T_2 y T_3 en sus extremos generando una fem E_2 , entonces si las uniones se sometieran a temperaturas T_1 y T_3 la fem térmica generada será igual a $E_1 + E_2$.



- (4) Ley de la fem aditiva. Si dos metales A y R son sometidos a temperaturas T_1 y T_2 en sus uniones, la fem generada será E_{AR} . Al unir dos metales R y B y someterlos a temperaturas T_1 y T_2 en sus uniones, la fem generada será E_{RB} . Entonces si se utilizan los metales A y B bajo las mismas condiciones de operación entonces la fem generada será E_{AB} .



- La composición de los materiales usados en la construcción de termopares:

<u>Material</u>	<u>Composición</u>
Hierro	99.5% de Hierro.
Constantán	45% de Níquel y 55% de Cobre. y 95% de Níquel
Platino/Rodio(13%)	87% de Platino y 13% de Rodio.
Platino/Rodio(10%)	90% de Platino y 10% de Rodio.
Cobre	100% de Cobre.

- De acuerdo al rango de operación y a la combinación de aleaciones que los componen los termopares se clasifican dentro de los siguientes tipos:

<u>Tipo</u>	<u>Materiales</u>
J	Hierro-Constantán (Galga 14).
T	Cobre-Constantán (Galga 20).
K	Cromel-Alumel (Galga 14).
R	Platino/Rodio(13%)-Platino.
S	Platino/Rodio(13%)-Platino.
J*	Hierro-Constantán (Galga 8).

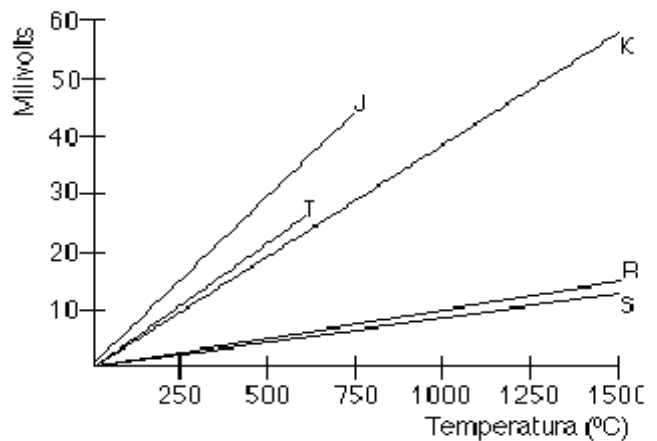
Convenciones establecidas por el American National Standards Institute- (ANSI).

RECOMENDACIONES PRACTICAS:

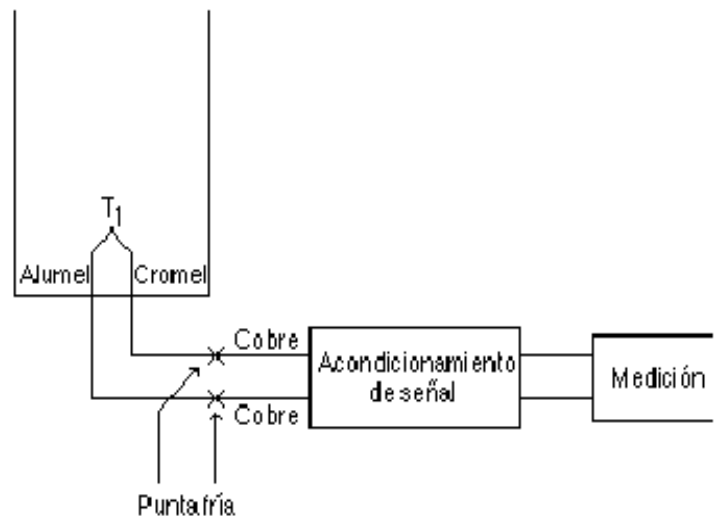
- A bajas temperaturas (200-600 °C) son recomendables los tipos J, K y T. El tipo J es el más barato, pero tiene que tomarse la precaución de no usarse en ambientes sulfatados. El tipo K aunque más caro es el más lineal.

Obs.: un termopar es susceptible al ataque químico de agentes oxidantes, por lo que deben estar debidamente protegidos en vainas llamadas termopozos usadas también para la instalación de RTD's y termistores.

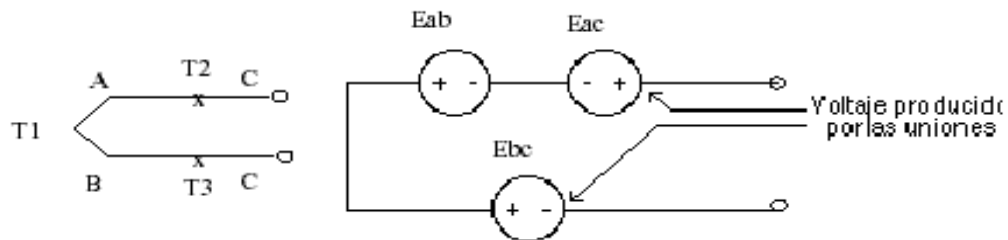
- A temperaturas altas se recomiendan los tipos R y S donde el tipo R es el más recomendable debido a su sensibilidad.



- Son muy susceptibles a sufrir alteraciones por ruido. Es por ello que requieren de un acondicionador que incluya filtros que eliminen los voltajes inducidos de altas frecuencias con un transmisor adecuado cerca del lugar de medición



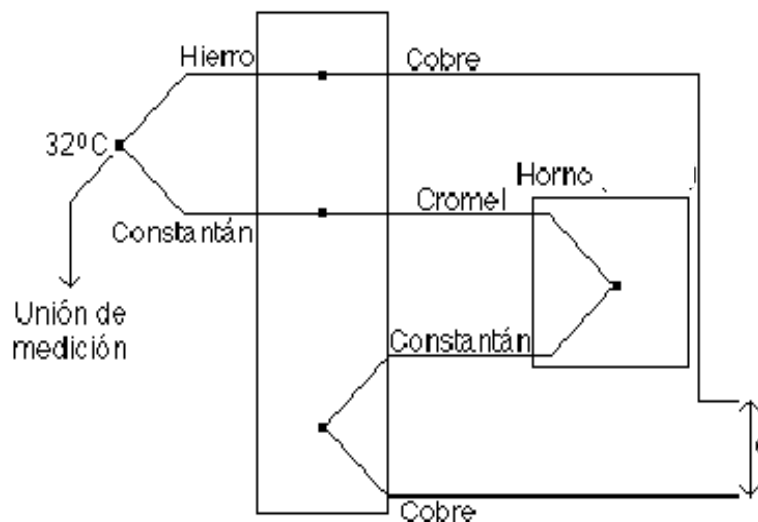
- Otro de los efectos indeseados es cuando se tienen voltajes parásitos debido a la unión de las terminales del termopar con otros conductores a diferente temperatura que aquella en la unión de medición. Este fenómeno se denomina "efecto de punta fría" y se presenta como una consecuencia de una violación a las leyes de la temperatura intermedia y del metal intermedio como se muestra.



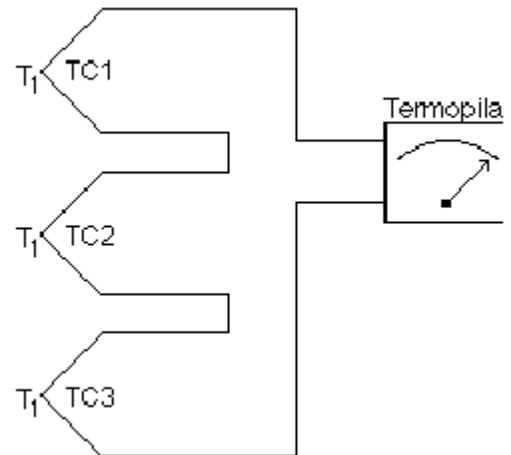
Una forma de evitar este efecto indeseado es aprovechar otra de las leyes -la del metal intermedio- para compensar los voltajes de las uniones en la punta fría.

En la figura se observa el efecto de las puntas fría sobre el voltaje de interés en la unión de los metales A y B sometido a temperatura T1. El acondicionamiento de la señal debe hacerse con [compensación de punta fría](#).

La compensación de punta fría puede hacerse mediante varias técnicas. La primera y cuyo uso está ampliamente difundido en la industria consiste en conectar en serie diferentes tipos de termopares instalados en puntos del proceso con temperaturas casi constantes o que sufran variaciones que contrarresten los efectos de la punta fría del termopar principal.



Es común encontrar arreglos de termopares ideados para obtener mejores respuestas en cuanto a la magnitud de fem termo-generada en la unión. Cuando la señal de salida por el termopar es baja y su relación señal a ruido debe ser mejorada entonces se emplea el concepto de termopila que se logra al conectar en serie varios termopares como se aprecia en la figura



- Uno de los factores importantes para los termopares es contar con una [resistencia alta](#), lo cual se traduce en una alta capacidad calorífica y una respuesta lenta, aumentando el rendimiento de la medida, al tener una buena estabilidad ante pequeños cambios perturbadores.
- El comportamiento de los termopares, matemáticamente se describe por la siguiente ecuación:

$$E = C_1 \cdot (T_1 - T_2) + C_2 \cdot (T_1^2 - T_2^2)$$

con: C_1, C_2 coeficientes de voltaje, respecto a la temperatura.
 T_1, T_2 temperaturas de las uniones.
 E fem generada por el termopar.

Limitaciones en el uso de termopares:

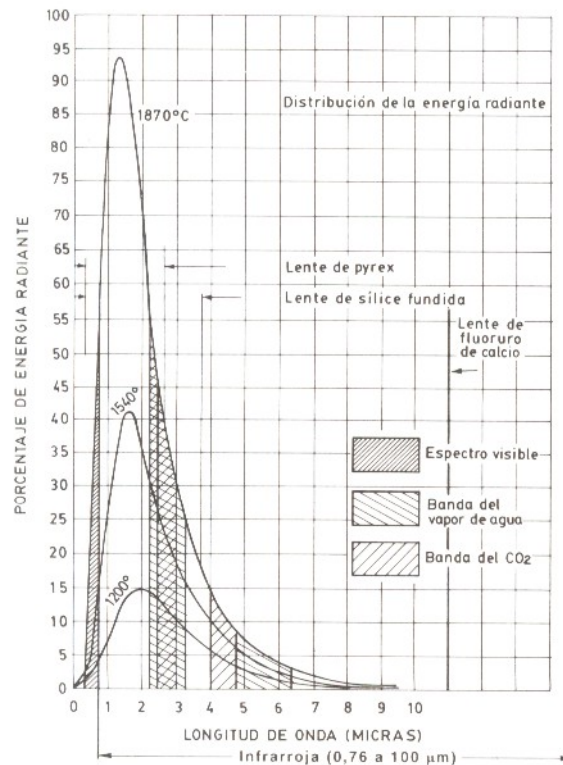
- ✓ La temperatura máxima que alcance el termopar debe ser inferior a su temperatura de fusión
- ✓ El medio donde se va a medir no debe atacar a los metales de la unión.
- ✓ La corriente por el termopar debe ser muy pequeña para despreciar el efecto Joule.
- ✓ Hay que mantener la temperatura de referencia fija

Pirómetros de radiación:

- Los pirómetros de radiación, se fundamentan en la [Ley de Stefan-Boltzman](#): “la intensidad de energía radiante emitida por la superficie de un cuerpo, aumenta proporcionalmente a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo”.

$$W = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^4$$

ENERGIA DE UN CUERPO RADIANTE:



- Desde el punto de vista de medición de temperaturas industriales, las longitudes de onda térmicas abarcan desde 0,1 μ (radiaciones UV) hasta 12 μ (radiaciones IR).

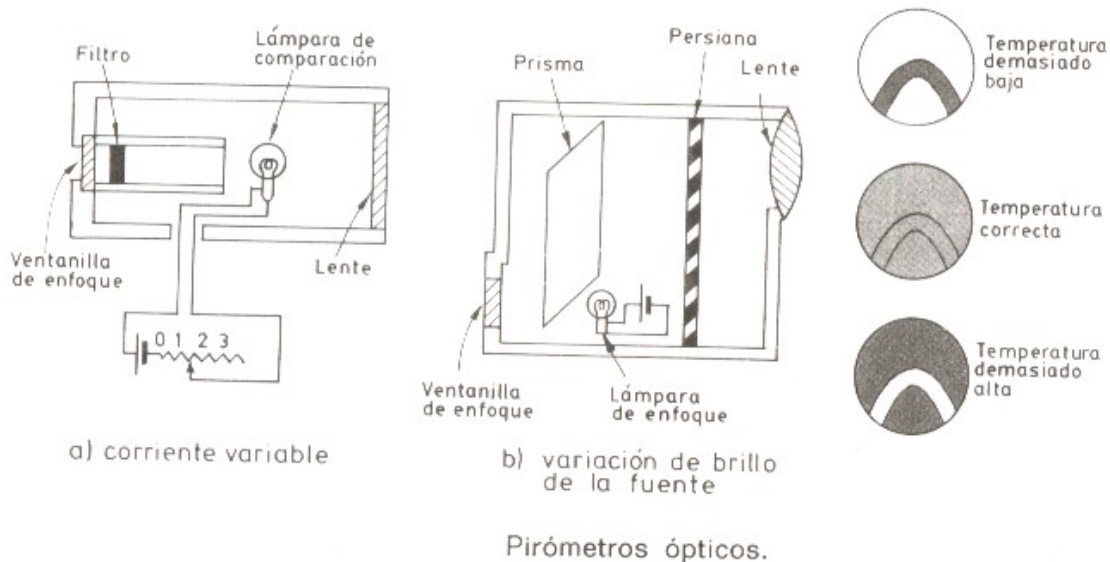
Radiación visible: 0,45 μ (color violeta) a 0,70 μ (color rojo).

Los pirómetros de radiación miden, pues, la temperatura de un cuerpo a distancia en función de su radiación.

● **Pirómetros ópticos:**

Se basan en la desaparición del filamento de una lámpara al compararlo visualmente con la imagen del objeto enfocado.

Los pirómetros automáticos consisten esencialmente en un disco rotativo que modula desfasadas la radiación del objeto y la de una lámpara que inciden en un fototubo multiplicador. Este envía una señal de salida en forma de onda cuadrada de impulsos de corriente continua que convenientemente acondicionada modifica la corriente de alimentación de la lámpara hasta que coinciden en brillo la radiación del objeto y de la lámpara. En éste momento, la intensidad de corriente que pasa por la lámpara es función de la temperatura.

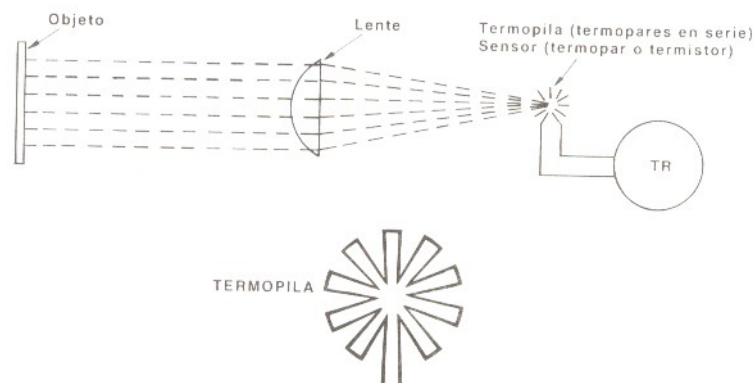


Obs.: El pirómetro dirigido sobre una superficie incandescente no nos dará su temp. verdadera, si la superficie no es perfectamente negra, i.e. que absorba todas las radiaciones y no refleje ninguna. En los casos generales es preciso hacer una corrección de la temperatura leída para tener en cuenta el valor de absorción (o de emisión ϵ) de la superficie.

● *Pirómetros de radiación total:*

Este tipo, está formado por una lente de pyrex (sílice o fluoruro de calcio) que concentra la radiación del objeto caliente en una termopila formada por varios termopares. La radiación está enfocada incidiendo directamente en las uniones calientes de los termopares.

Su reducida masa, les hace muy sensibles a pequeñas variaciones de la energía radiante y además, muy resistentes a vibraciones o choques.

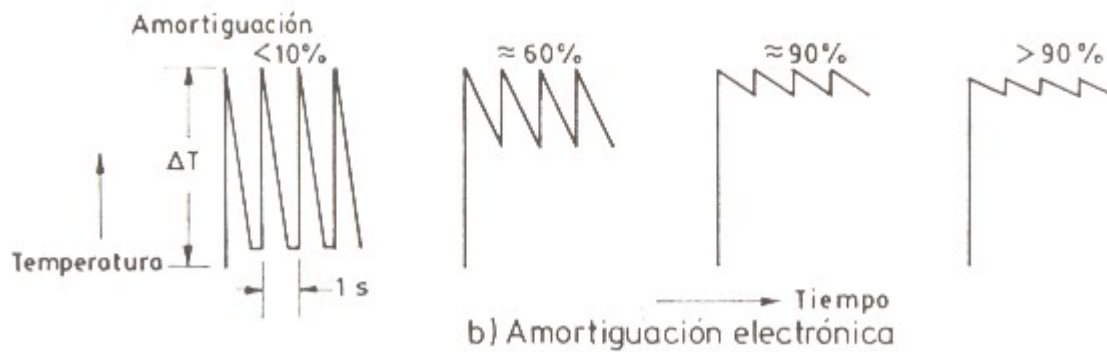
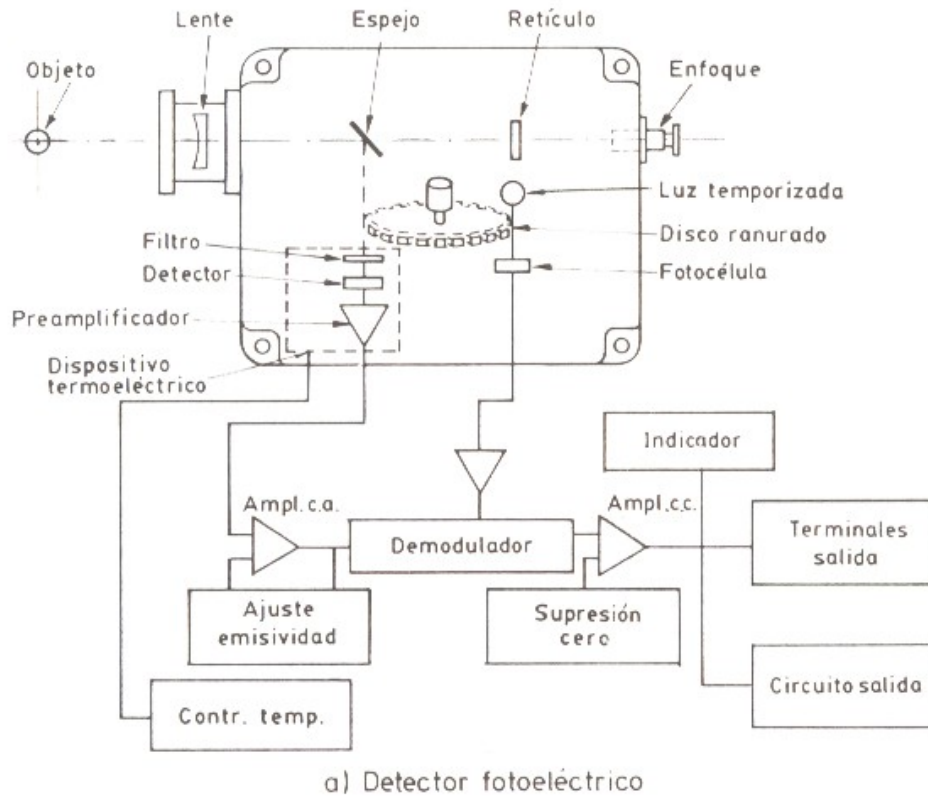


La parte de los termopares expuesta a la radiación está ennegrecida para comportarse como un cuerpo negro, aumentando así sus propiedades de absorción de energía, y proporcionando la fem máxima.

Campos de Temperaturas:

- ✓ $450^{\circ}\text{C} < T < 1750^{\circ}\text{C}$ Lente Pyrex
- ✓ $450^{\circ}\text{C} < T < 1250^{\circ}\text{C}$ Lente de Sílice fundida
- ✓ Para bajas temperaturas – Lentes de Fluoruro de calcio

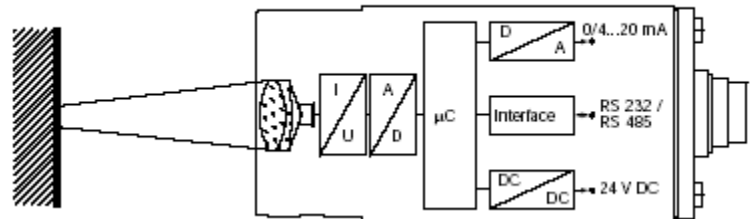
● **Pirómetro fotoeléctrico:**



Campo de trabajo: 35 a 1200 °C.

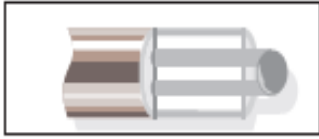
Termómetros infrarrojos:

- Estos, son también llamados pirómetros de radiación.
- Son dispositivos de no contacto que miden indirectamente la temperatura de cuerpos calientes a partir de la radiación térmica, emitida en forma natural por los mismos.
- Se usa en aquellos procesos industriales, que manejan temperaturas superiores a las del punto de fusión del transductor.
- La energía irradiada y su longitud de onda característica depende de la temperatura de la superficie del objetivo.
- El microprocesador recibe las características de la radiación del objetivo y la forma de emisión.
- Precisión: $\pm 0,3 \%$
- Se apunta la posición de medición con una punta indicadora laser o una vista óptica, se presiona el disparador y el resultado de la medida se lee en un indicador.



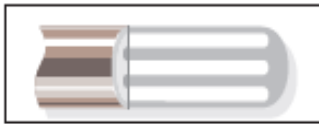
Uniones de Termocuplas:

UNION EXPUESTA:



- Para ambientes no corrosivos.
- Para gases estáticos o fluyentes no sometidos a altas presiones.

UNION ATERRIZADA:



- Permiten la medición de temperaturas estáticas de gases o líquidos corrosivos en movimiento sometidos a altas presiones.
- Con la unión soldada a la cubierta la respuesta térmica es alta, pero la susceptibilidad al ruido también.

UNION NO ATERRIZADA:



- Para medir temperaturas en ambientes corrosivos o ruidosos, donde se requiere un buen aislamiento eléctrico y la velocidad de respuesta no sea crítica.