

Instrumentación Industrial de Procesos



TEMA 4

ELEMENTOS DE TEMPERATURA

Departamento de Ingeniería de Procesos
y Gestión Industrial

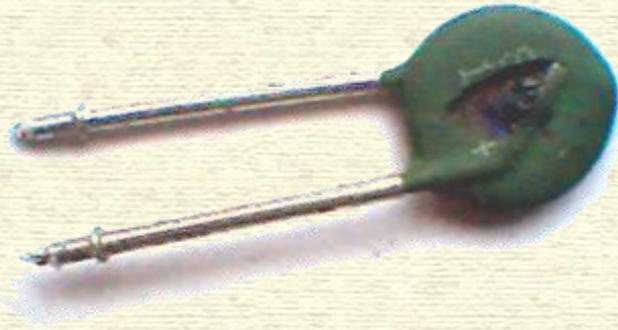
A stainless steel industrial temperature probe. It features a long, thin probe tube that ends in a circular flange with four mounting holes. The probe is connected to a metal housing with various fittings and a chain.



TEMA 2: ELEMENTOS DE TEMPERATURA

Escalas de temperatura. Termocuplas: principio de funcionamiento, características generales, tipos estandarizados, cables de compensación. Termorresistencias, principio de operación, tipos, conexiones. Termistores. Sistemas de protección.

Sistemas de dilatación: clasificación, aplicaciones y limitaciones. Indicadores: termómetros de vidrio y bimetalicos. Pirómetros de radiación, principio de funcionamiento, componentes, aplicaciones. Sistemas de control de temperatura. Especificación técnica



TERMISTORES

Los **termistores** son dispositivos semiconductores cuya resistencia cambia con la temperatura.

Estos dispositivos presentan grandes coeficientes de temperatura negativos (**NTC**), es decir, que su resistencia disminuye cuando la temperatura aumenta. Los materiales con que se fabrican pueden ser mezclas sintetizadas de sulfatos, selenio, óxidos de níquel, manganeso, hierro, cobalto, cobre, magnesio, titanio, uranio, y otros metales.

Existen también termistores con coeficiente térmico positivo (**PTC**) fabricados de bario sintetizado y mezclas de estroncio y titanio, pero son menos sensibles y más caros.

TERMISTORES

La ecuación que domina el cambio de resistencia de un termistor respecto a la temperatura está dada por:

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

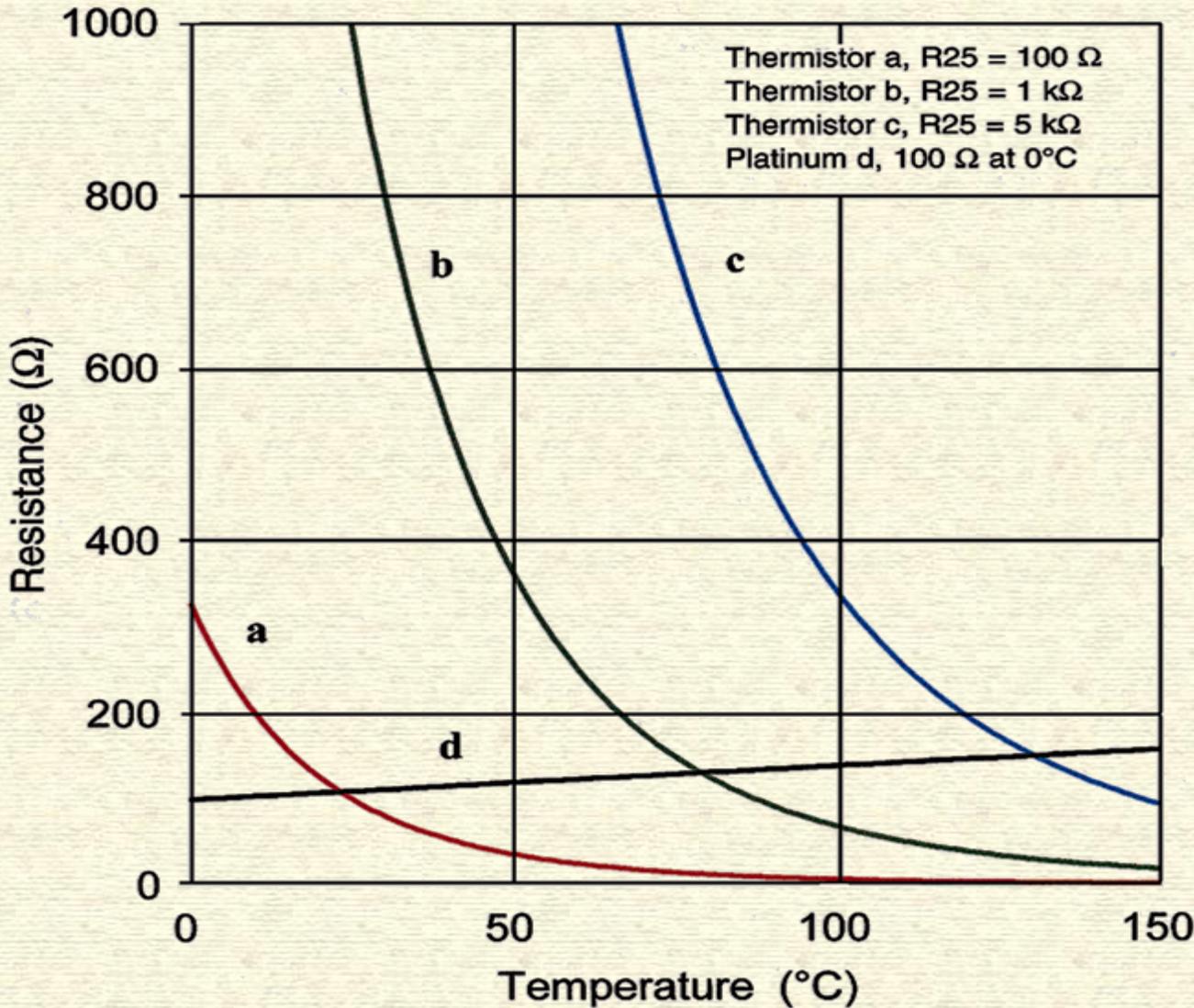
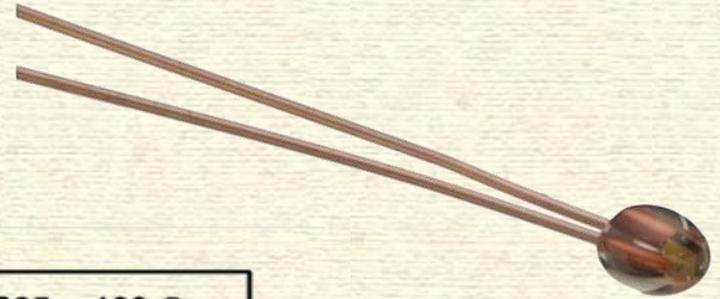
El coeficiente beta usualmente está entre -3500 y -4600 K.

Por tratarse de material semiconductor, los termistores tienen un rango limitado que va de -20 °C a 150 °C, y como se puede apreciar en la ecuación anterior, su respuesta es no lineal por el término exponencial.

Estos dispositivos que presentan el fenómeno de envejecimiento (derivas altas).



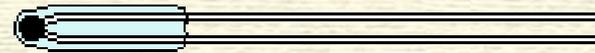
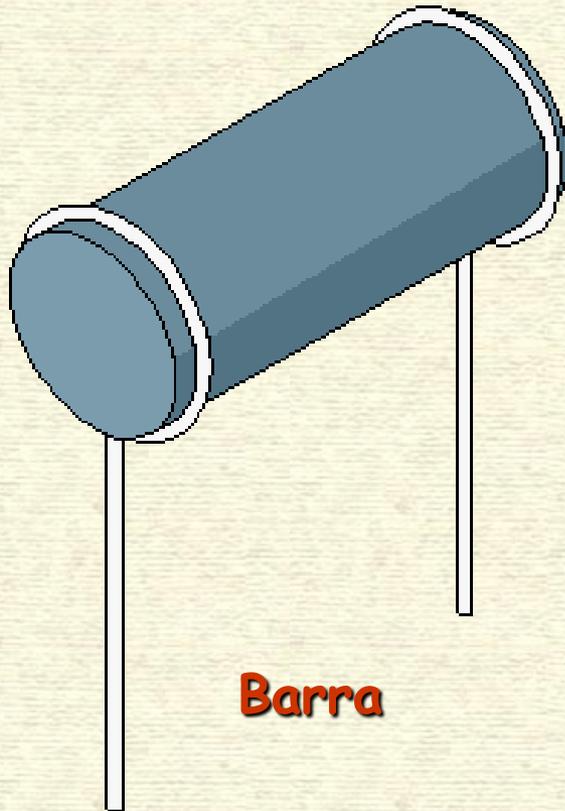
TERMISTORES



Comparación
de resistencia
de
termistores
NPT
vs Pt-100

TERMISTORES

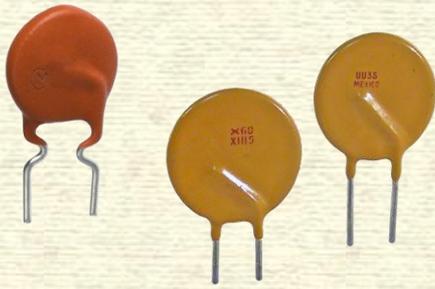
Los encapsulados de los termistores requieren de materiales que conduzcan muy bien la temperatura como son: vidrios, resinas epóxicas, etc.. Dentro de los tipos de encapsulados se puede encontrar las siguientes formas:



Gota de vidrio

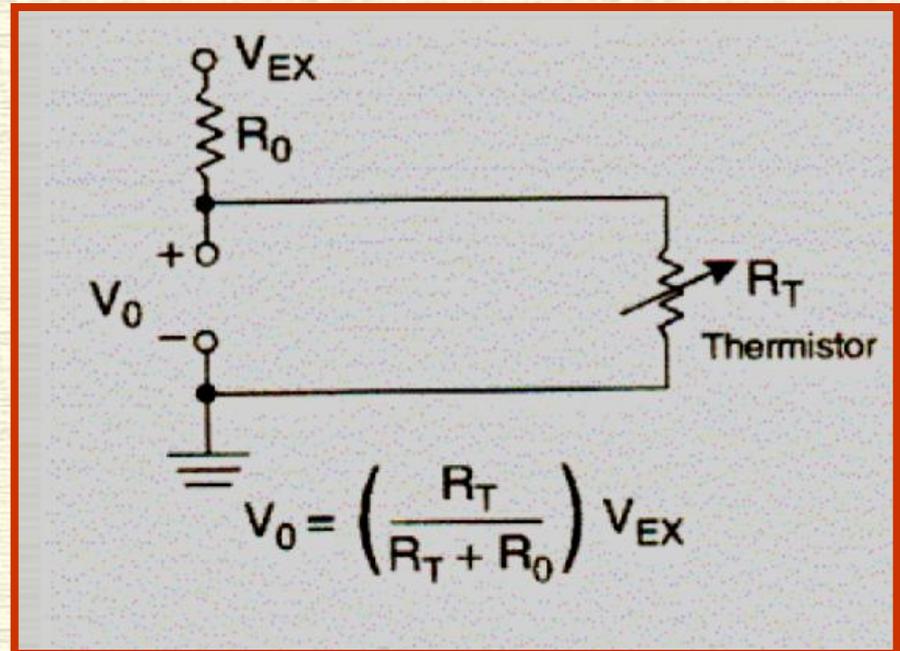
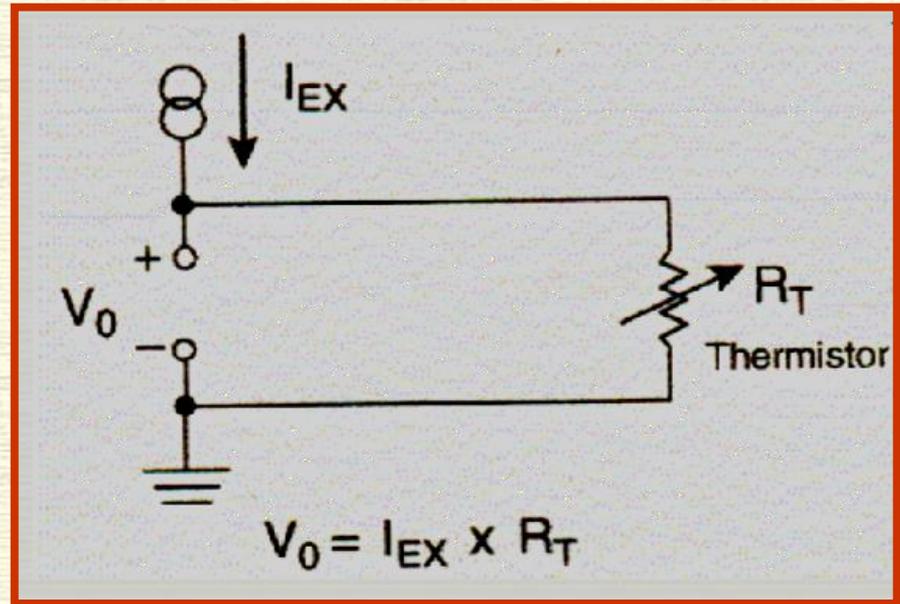
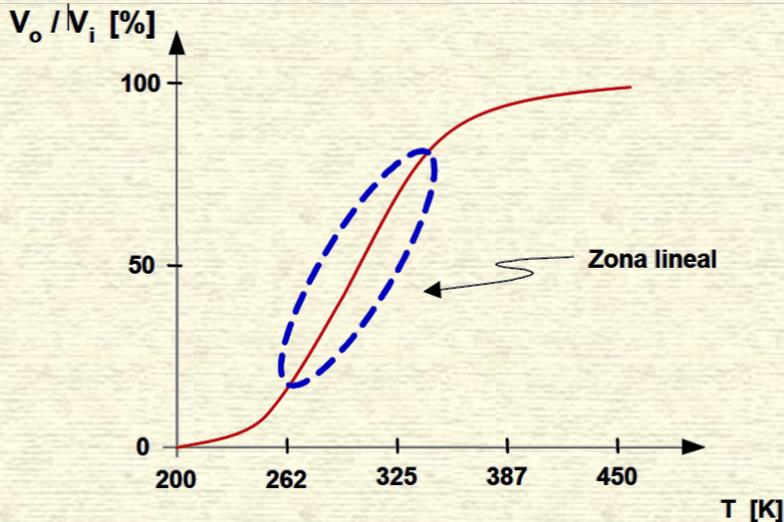


Disco



TERMISTORES Circuitos

Los circuitos que se emplean, tienden a generar salidas lineales



COMPARACIÓN ENTRE ELEMENTOS ELÉCTRICOS

	Acondicionamiento de señal requerido	Precisión	Sensibilidad	Comparación
Termopar 	<ul style="list-style-type: none"> • Amplificación • Filtrado • Unión fría. Compensación 	Buena	Razonable	<ul style="list-style-type: none"> • Activo: genera señal • Baratos • Robustos • Muy amplio rango de temperatura. • Relativamente lineales
RTD 	<ul style="list-style-type: none"> • Amplificación • Filtrado • Excitación en tensión o corriente 	La mejor	Mejor	<ul style="list-style-type: none"> • Pasivas • Muy precisas • Muy estables • Muy lineales • Caras
Termistor 	<ul style="list-style-type: none"> • Amplificación • Filtrado • Excitación en tensión o corriente 	Mejor	La mejor	<ul style="list-style-type: none"> • Pasivos • Alta resistencia • Pequeña masa térmica • Casi sin coste

TERMÓMETROS DE VIDRIO

Constan de un bulbo que contiene un fluido que al calentarse se expande a través de un tubo capilar.

El ejemplo más conocido es el de mercurio líquido.



Enchufe roscado
4 DIN 16192

Almohadilla 5 DIN 16192

Almohadilla 6 DIN 16192

Sección externa

Capillaridad

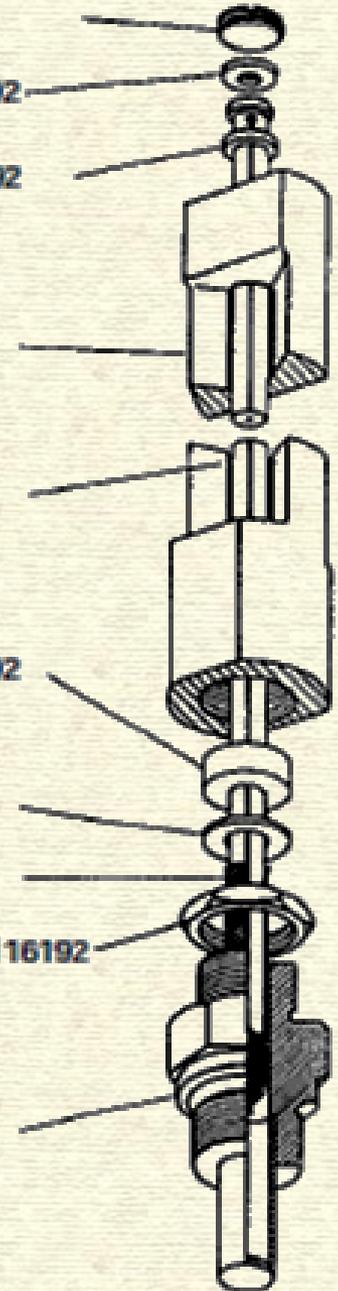
Almohadilla 7 DIN 16192

Arandela 8 DIN 16192

Cubierta textil no.10

Tuerca de fijación 9 DIN 16192

Conexión de montaje

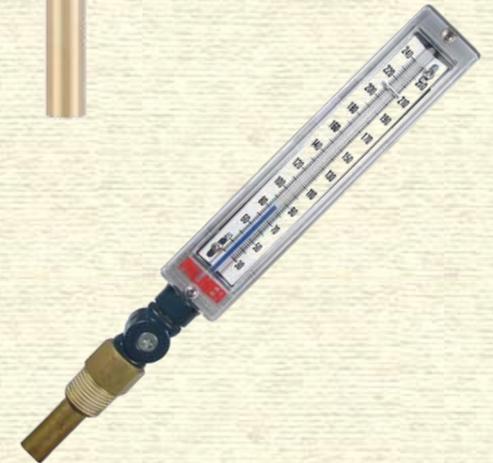


TERMÓMETROS DE VIDRIO

Se utilizan otros líquidos Aparte del mercurio, según las temperaturas que se deben medir.

Fluido	Valor mínimo °C	Valor máximo °C
Mercurio líquido	-35	280
Mercurio, tubo capilar con gas	-35	450
Pentano	-200	20
Alcohol	-110	50
Tolueno	-70	100

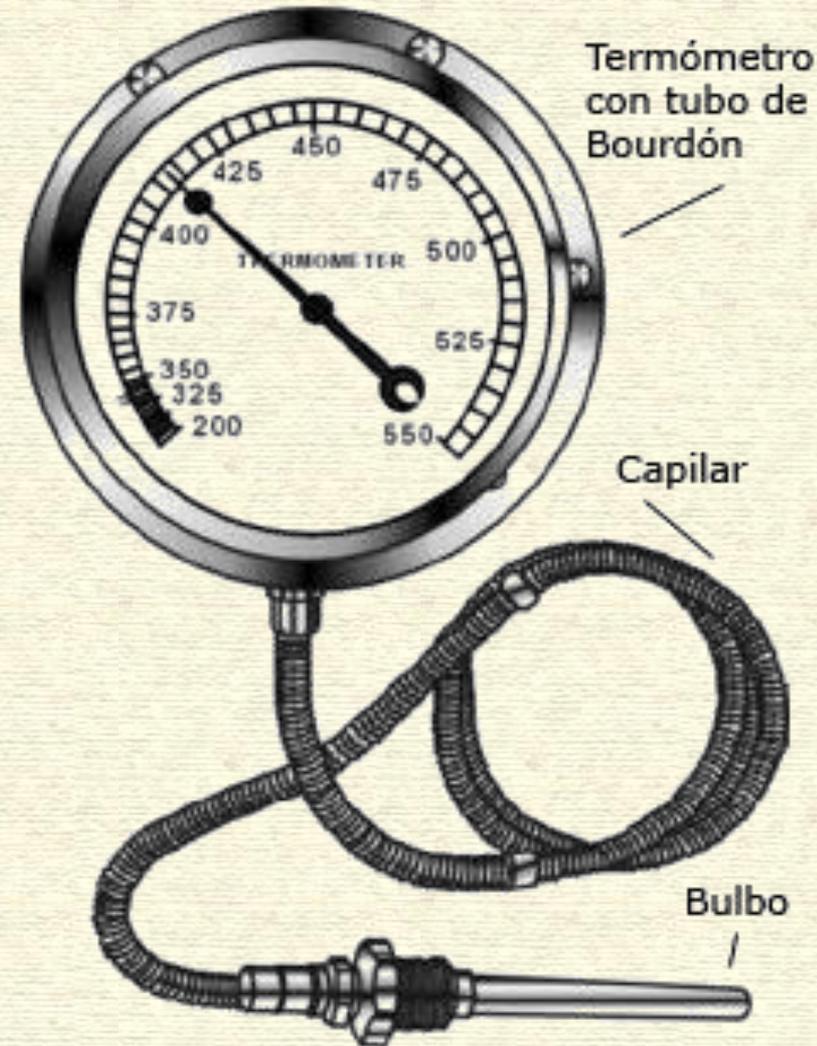
Con estos termómetros solo se puede tener **indicación local** de la variable.



SISTEMAS TÉRMICOS LLENOS (de bulbo y capilar)

Un **sistema lleno** detecta la temperatura a través de una **variación de volumen o presión de un fluido** que acompaña a una variación de temperatura.

El acondicionamiento de la señal de presión generada a través de la dilatación del líquido o el aumento de presión del gas o vapor, se realiza a través de tubos de Bourdon. Éstos se desenrollan y mueven la aguja indicadora sobre el dial (o pantalla de sistema neumático)

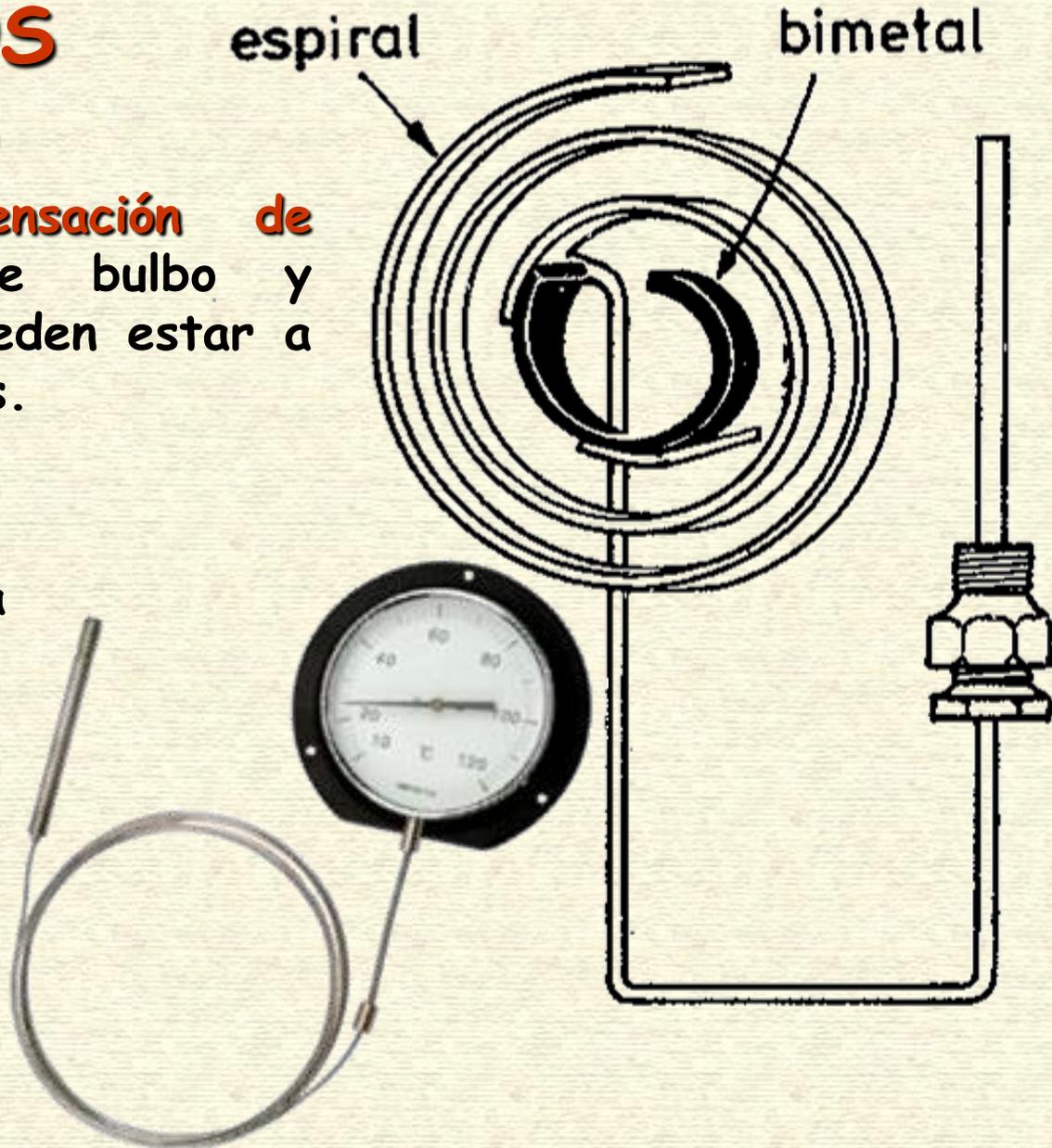


Termómetro de lectura a distancia

SISTEMAS TÉRMICOS LLENOS

Se requiere **compensación de temperatura** ya que bulbo y elemento receptor pueden estar a distintas temperaturas.

Con capilares de longitudes menores a 5 metros se compensa sólo el elemento de medición, por medio de un bimetetal se compensa la variación de temperatura del liquido por efecto del medio ambiente.

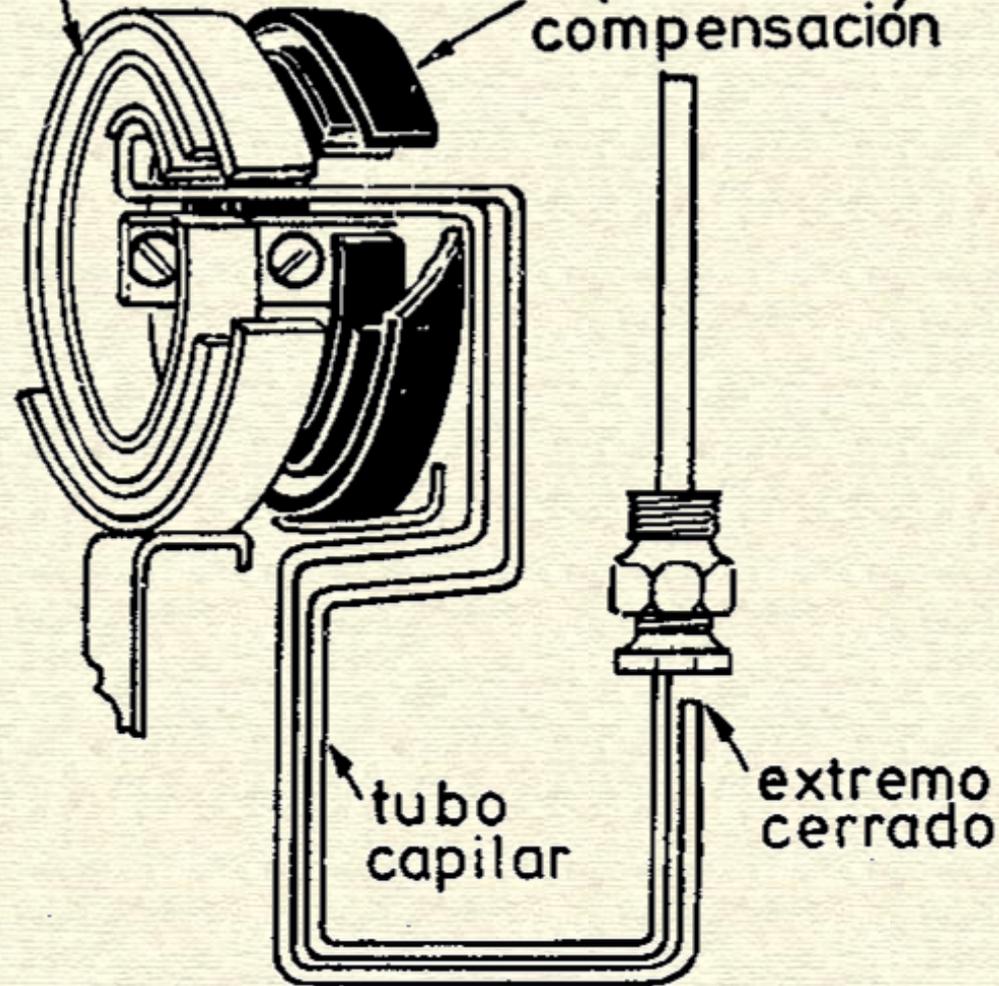


SISTEMAS TÉRMICOS LLENOS

Cuando el tubo capilar es largo, se usa un segundo tubo capilar sin bulbo, cerrado en el extremo correspondiente al bulbo (paralelo al tubo capilar) desde el bulbo y acciona un Bourdon helicoidal idéntico en la caja del instrumento, de tal modo enlazado con el elemento original, que cualquier dilatación en este capilar corrector se resta del otro sistema y corrige toda dilatación, excepto la del bulbo medidor.

espiral de medida

espiral de compensación



tubo capilar

extremo cerrado

SISTEMAS TÉRMICOS LLENOS

Tipos de dispositivos clasificados por SAMA



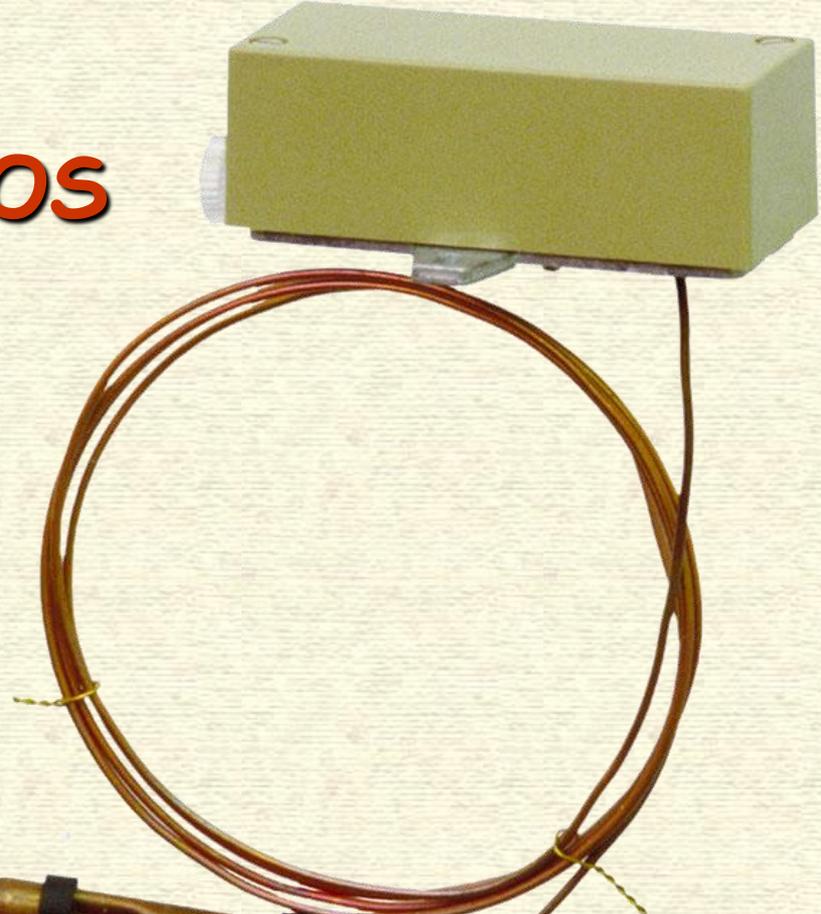
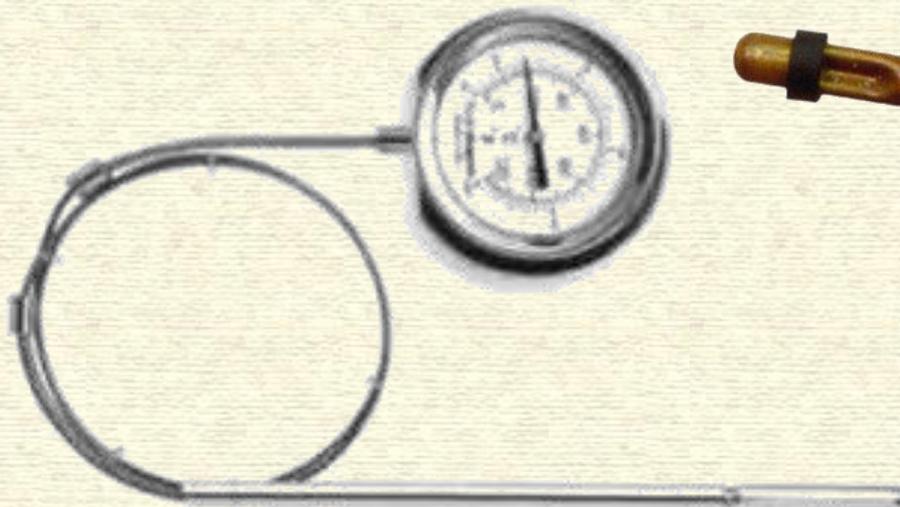
Clase SAMA .	I	II	III	V
Fluido	Líquido	Vapor	Gas	Mercurio
Principio de funcionamiento	Variación de volumen	Variación de presión	Variación de presión	Variación de presión
Rango de temperaturas	-30 a 315°C	-45 a 315°C	-195 a 315°C	-35 a 650°C
Exactitud, % del alcance	±0,5% 215°C ±0,75 215°C	±0,5 en los 2/3 del alcance superiores	±0,5% 330°C ±0,75% 330°C	±0,5 500°C ±0,75 500°C
Alcances de temperatura más cortos y más largos	25°C 330°C	40°C 215°C	65°C 550°C	30°C 665°C
Respuesta: 1= la más rápida 7= la más lenta	7	IIA=1 IIB=3 IIC=4 IID=5	2	6
Capacidad de sobrerango	Media	La menor	La mayor	Media
Linealidad de escala máxima	Lineal	Alineal	Lineal	Lineal
Longitud de capilar estándar, en m	IA =30 IB =6	45	30	VA:30 VB:15
Tamaño típico de sensor para un alcance de 110°C, D. E. x longitud, en mm	El menor 10 x 50	Entre Clase I y Clase V 10 x 50	El mayor 15 x 200	Entre Clase II y Clase III 10 x 100

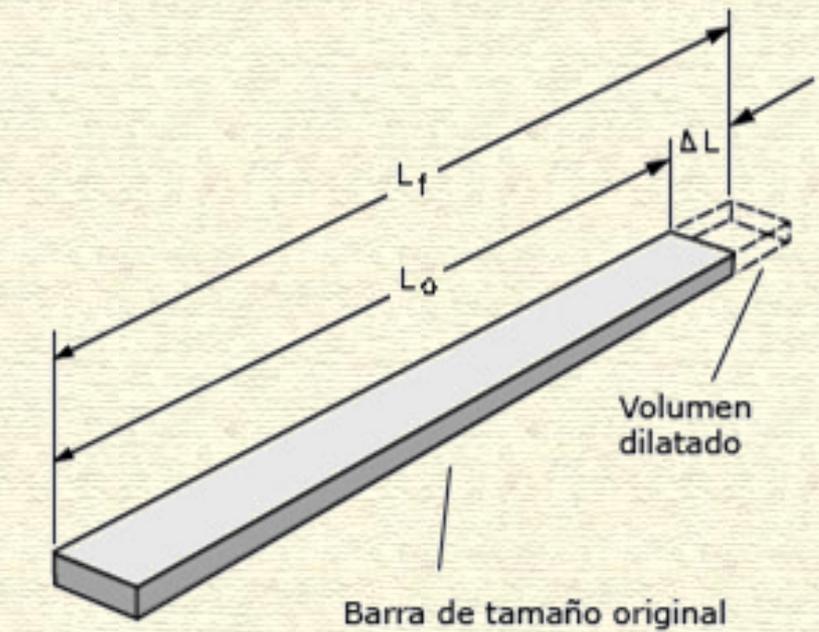
A Con plena compensación
B Con compensación parcial

SISTEMAS TÉRMICOS LLENOS

Estos dispositivos están siendo desplazados como elementos industriales de medición.

Se los emplea para indicación, como interruptor y también como transmisores (usualmente neumáticos)





BIMETÁLICOS

Este termómetro consiste en una cinta hecha de **dos metales (o aleaciones) de coeficientes de dilatación térmica muy diferente**, tales como el Invar y el latón, soldados cara con cara en toda su longitud.

Una elevación de temperatura cambia la curvatura de la cinta.

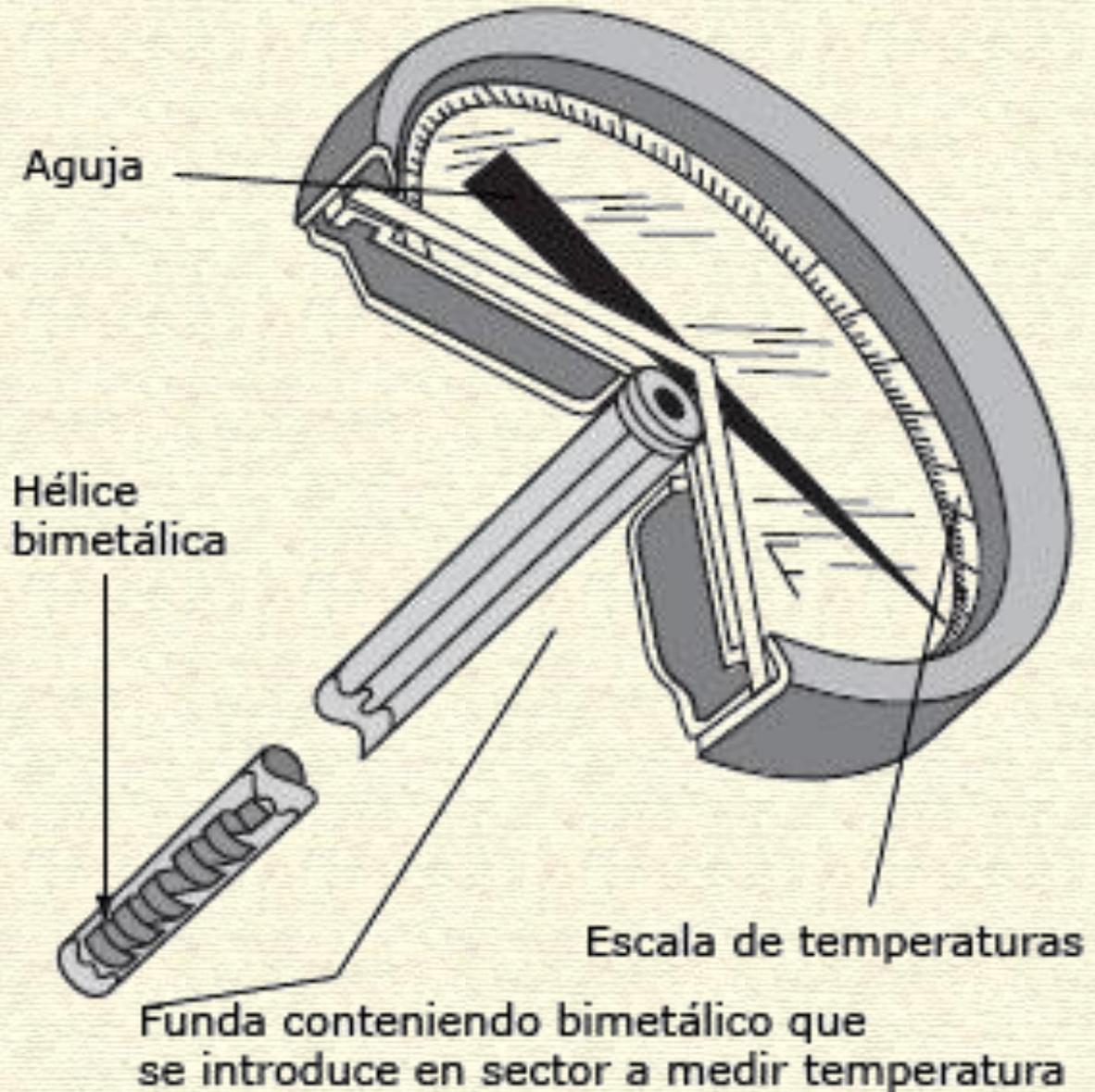
Las cintas bimetálicas se emplean para actuar sobre contactos eléctricos, o para indicación.

BIMETÁLICOS

Son muy adecuados para **indicación local**. La aguja va directamente vinculada al bimetálico en forma Mecánica.

Los bujes permiten un giro con bajo nivel de rozamiento.

Los valores de incertidumbre de estos instrumentos no son bajos (alrededor del 1% del span)



BIMETÁLICOS

Los indicadores locales tiene gran versatilidad para ser montados en campo.



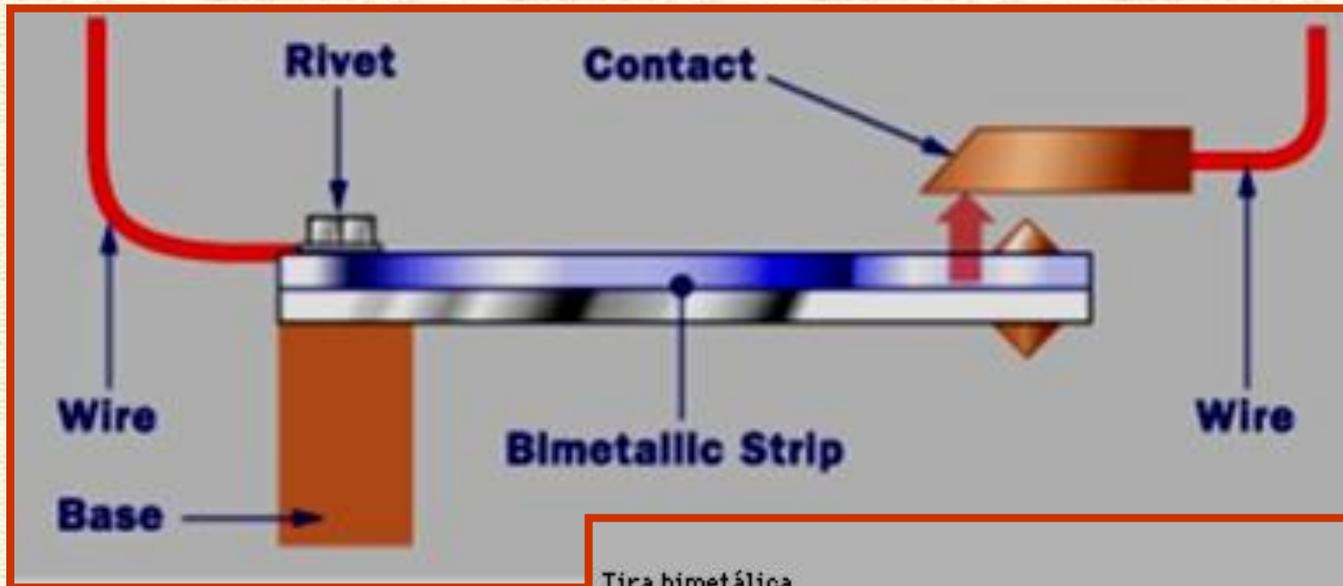
Conexión posterior



Conexión inferior

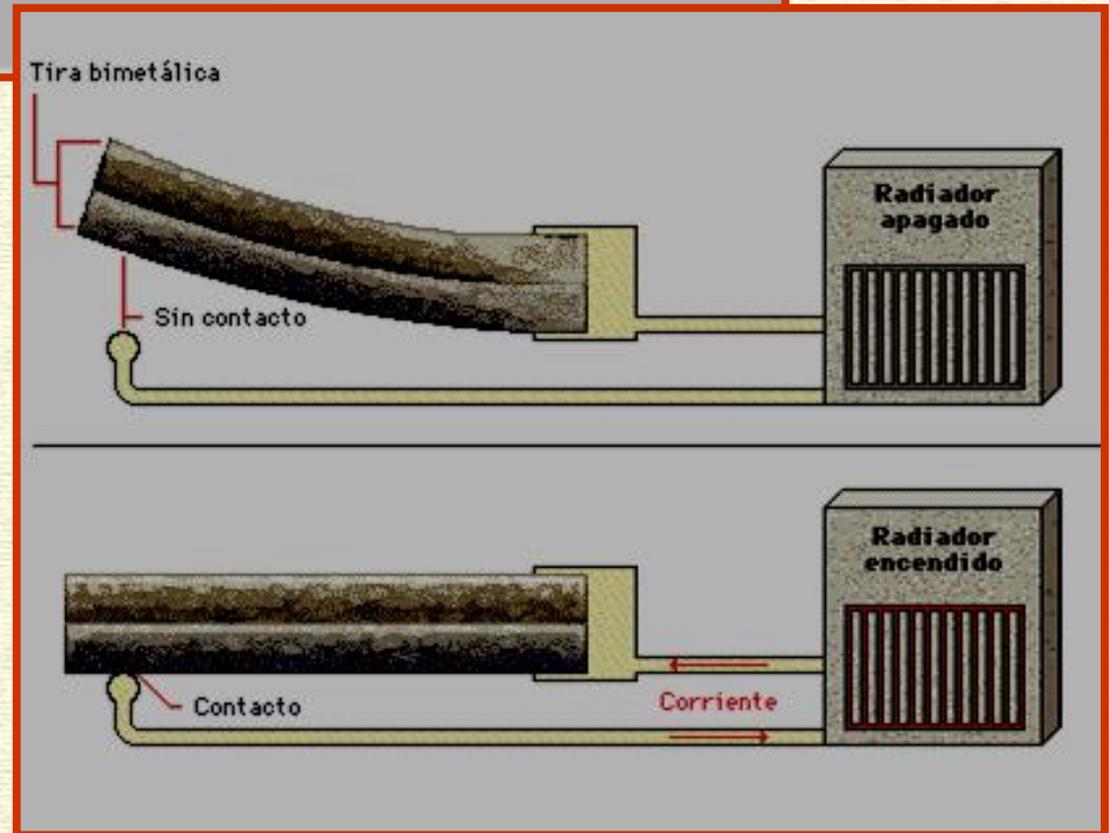


Conexión en ángulo variable



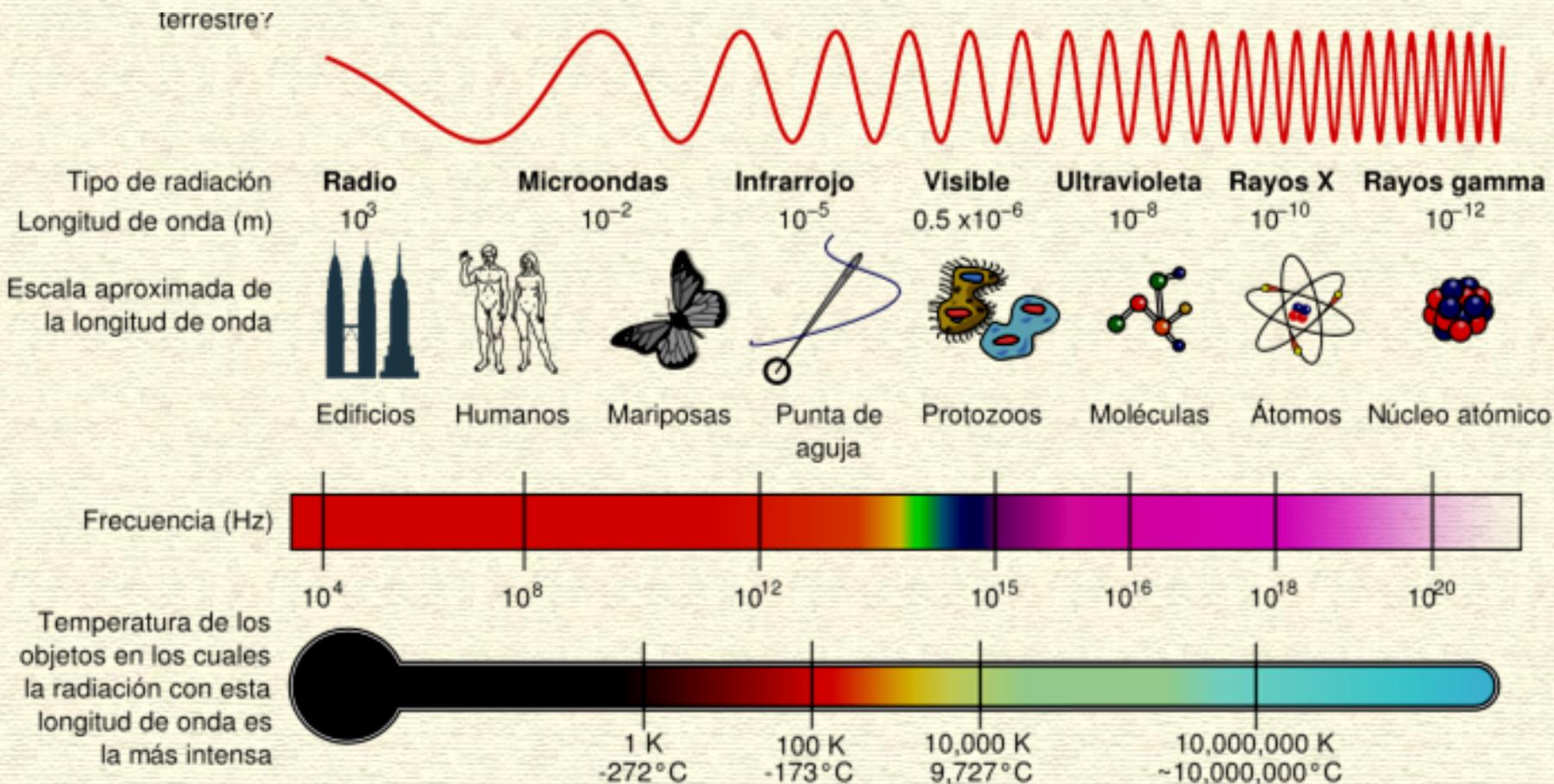
Se usan
extensamente
para
interruptores

BIMETÁLICOS



PIRÓMETROS - Radiación

Todo cuerpo emite radiación electromagnética en todas las longitudes de onda. La radiación electromagnética es clasificada en **"bandas"**, de acuerdo a su longitud de onda.



PIRÓMETROS - Radiación

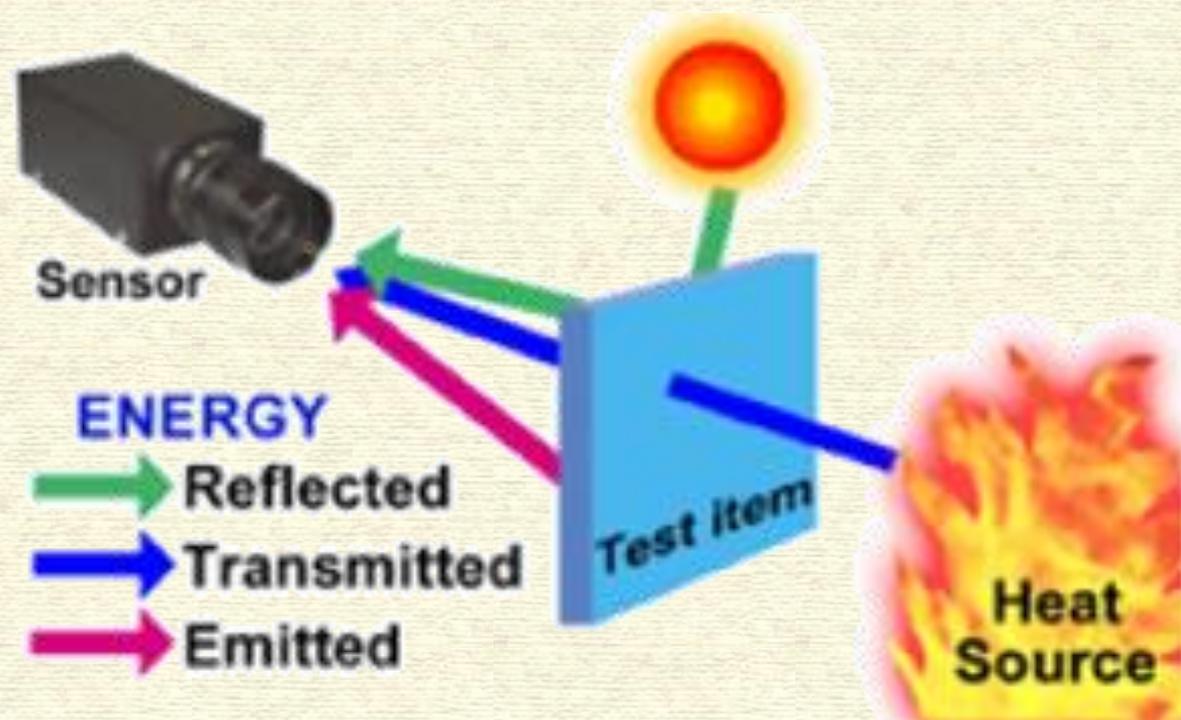
Ley de Kirchhoff

Cuando un cuerpo está en equilibrio térmico la cantidad de energía que **absorbe es igual a la que emite.**

Balance de Energía

En el equilibrio la energía que absorbe es igual a la que entrega.

La **energía incidente es igual a la suma de la energía que se refleja, más la que se absorbe más la que se transmite.**



PIRÓMETROS - Radiación

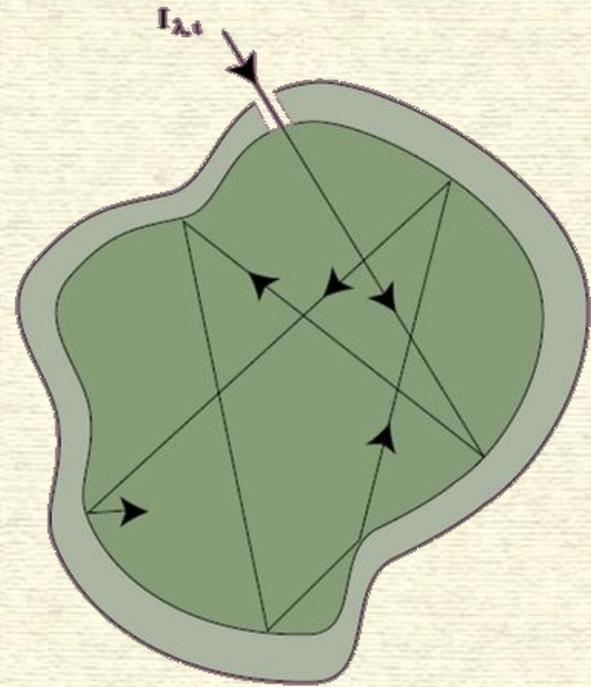
Cuerpo Opaco

El cuerpo opaco no transmite nada, pues la radiación no lo atraviesa. Un vidrio común es opaco al infrarrojo. El coeficiente de emisión es igual al de absorción

Cuerpo Negro

Cuerpo negro es un cuerpo ideal que absorbe toda la energía radiante que le llega. No refleja nada de la energía que le llega.

No transmite nada de la energía que le llega. Emite energía y en el equilibrio será iguala la que le llega.



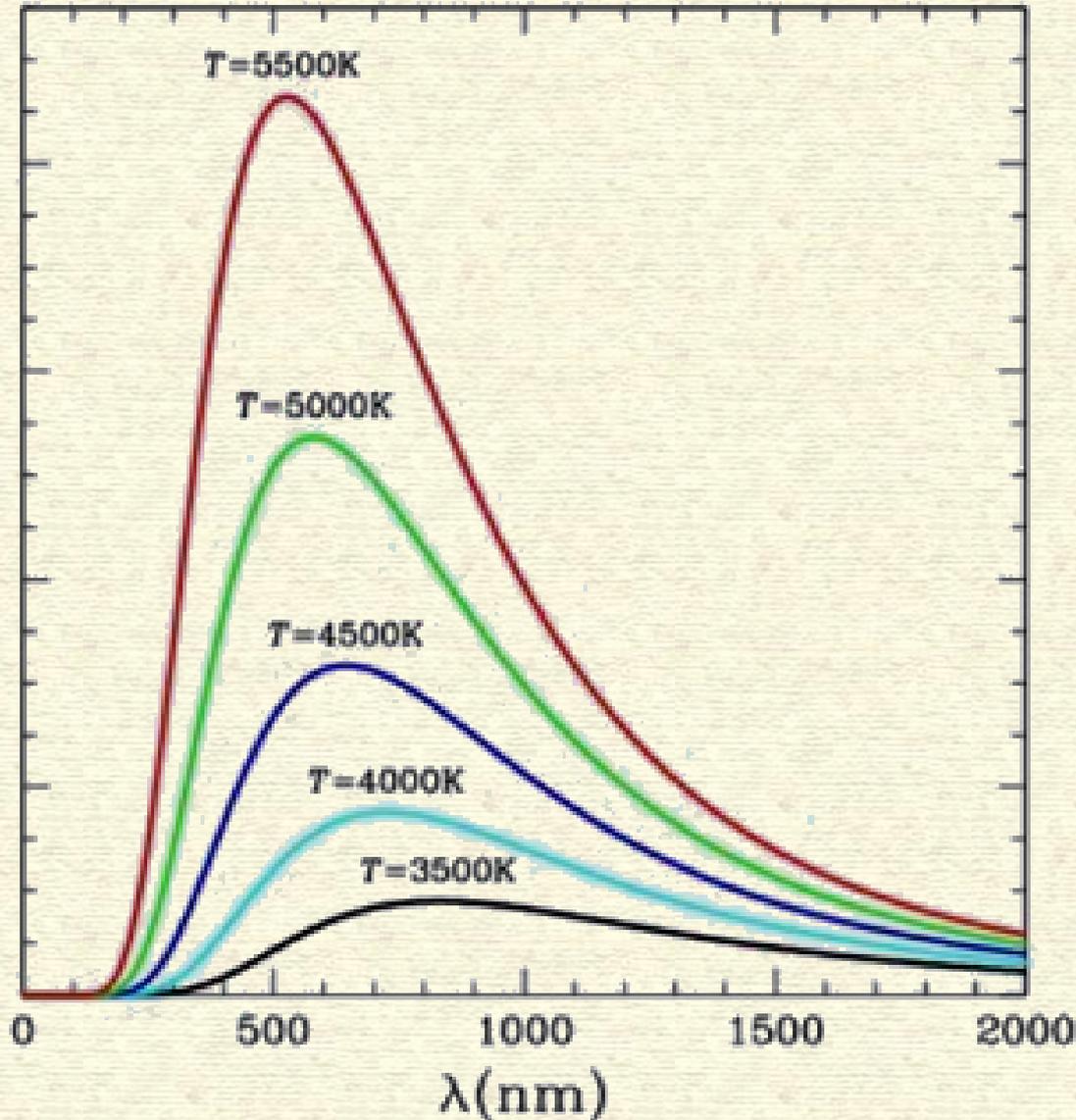
PIRÓMETROS - Ley de Plank

La Densidad de Flujo Radiado W (potencia por unidad de área y por unidad de longitud de onda) se vincula con la longitud de onda λ y con la emisividad ε del objeto con la expresión

$$W_{\lambda} = \frac{\varepsilon(\lambda)C_1}{\pi\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)}$$

$$C_1 = 3.74 \times 10^{-12} \text{ Wcm}^2$$

$$C_2 = 1.44 \text{ cmK}$$



PIRÓMETROS - Ley de Wien

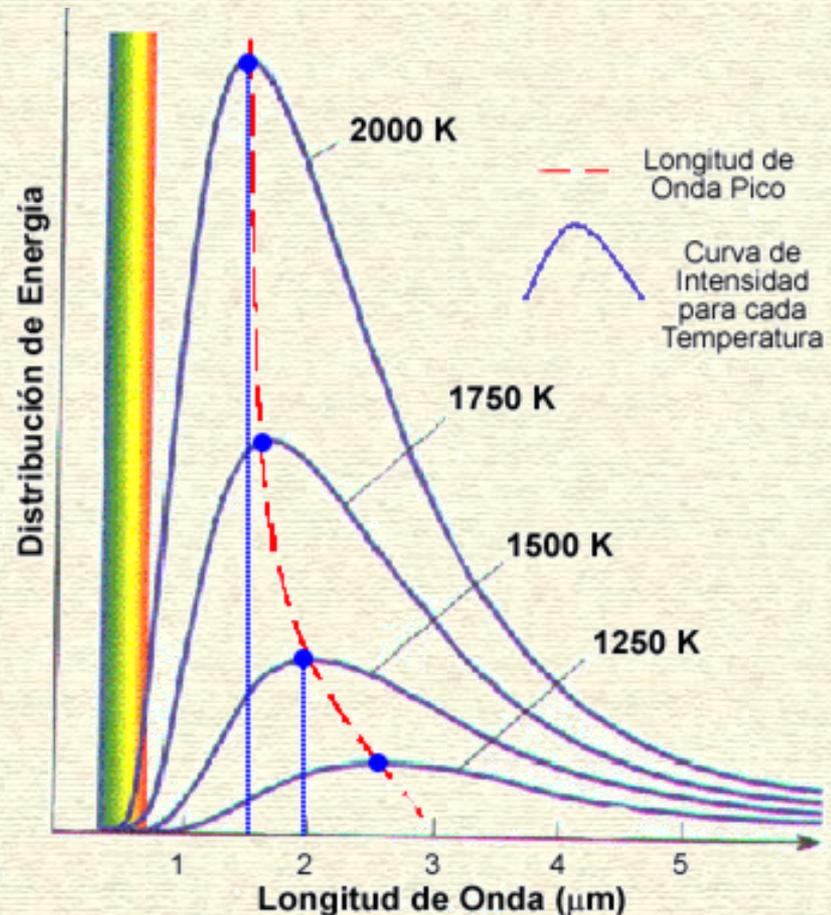
La **ley de Wien** describe el valor máximo de la curva de densidad de energía irradiada y muestra que este valor máximo varía en frecuencia e intensidad en función de la temperatura.

La longitud de onda correspondiente al máximo viene dado por:

$$\lambda_m = \frac{2898}{T}$$

Con la **Ley de desplazamiento de Wien** se puede evaluar en que longitudes de onda es conveniente hacer las mediciones

$$W_\lambda = \frac{C_1}{\pi} \varepsilon(\lambda) \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}$$



PIRÓMETROS

Ley de Stefan-Boltzmann

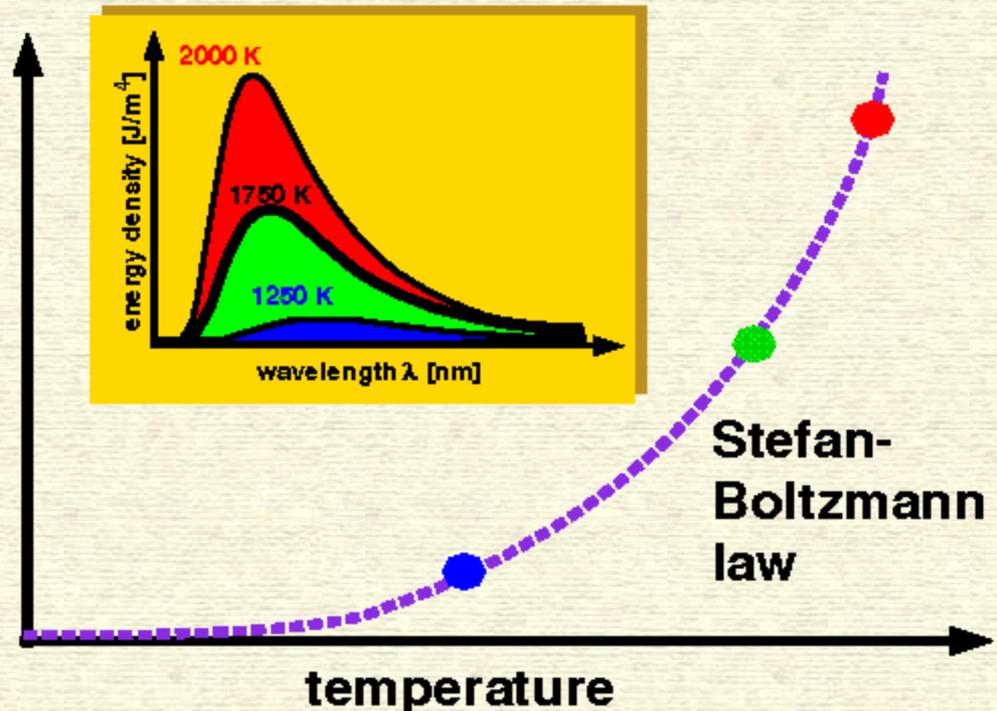
Relaciona la potencia total (en todas las longitudes de onda) por unidad de área emitida por un cuerpo y su temperatura. Resulta de integrar la ecuación de Plank:

$$E_b = \int_0^{\infty} \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)} d\lambda$$

El resultado es una expresión sencilla y es el **fundamento de la medición**:

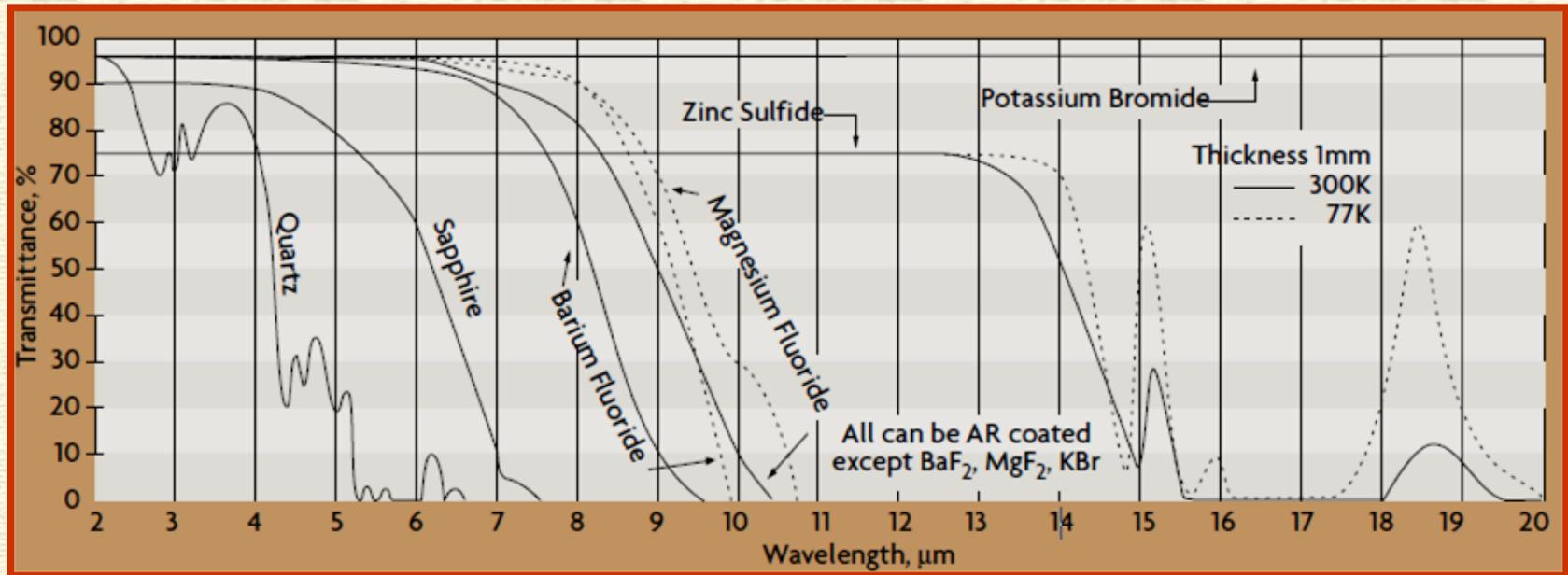
$$E = \epsilon \cdot \sigma \cdot T_e^4$$

ϵ es una propiedad de la superficie denominada **emisividad**



PIRÓMETROS - Emisividad

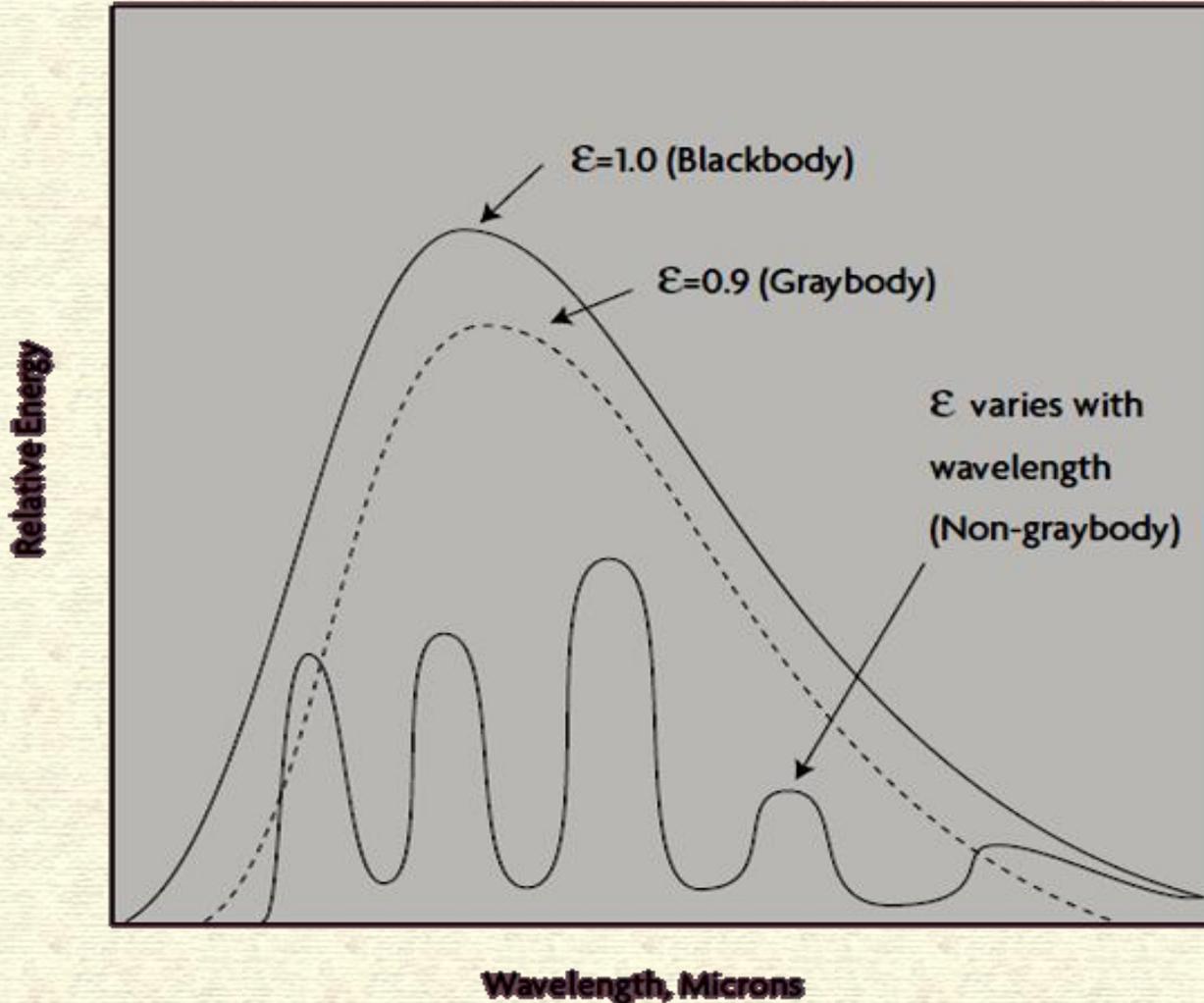
La **emisividad espectral** $\varepsilon(\lambda)$ es la relación entre la energía emitida en una determinada longitud de onda y la emitida por el cuerpo negro ($0 < \varepsilon(\lambda) < 1$). El calificativo de espectral es precisamente por que depende de la longitud de onda (Ley de Plank)



La **emisividad global o total** ε es la relación entre la energía total emitida por un cuerpo y la correspondiente a la de un cuerpo negro (Ley de Stefan-Boltzmann)

PIRÓMETROS - Cuerpo Gris

Un **cuerpo gris** es aquel que tiene una misma emisividad espectral para toda longitud de onda. Algunos materiales como el aluminio presentan esta característica.



Los **pirómetros** es un instrumento capaz de medir la temperatura de un cuerpo a partir de la radiación que emite. Se basan en la teoría cuántica de la radiación de cuerpo negro. Sirven para indicación, transmisión y como interruptores.

Para las mediciones industriales, las longitudes de onda abarcan desde 0.1μ (ultravioleta) hasta 12μ (infrarojo).

PIRÓMETROS



La emisividad del cuerpo cuya temperatura se mide **debe ser conocida**. Esto puede originar errores.

PIRÓMETROS - Características

- Pueden emplearse para objetos en movimiento
- Puede emplearse para medir a grandes distancias.
- Amplio rango de temperaturas, pudiendo medir valores muy superiores a las posibilidades con otros sensores.
- No requiere contacto con el objeto (mide "mirando"). Esto lo hace apto para aplicaciones en las que es difícil insertar otro dispositivo o resulta peligroso.



PIRÓMETROS - Tipos



Pirómetro de Banda Ancha o de Radiación Total

Los más simples y baratos. Responden a una zona muy amplia del espectro abarcando longitudes de onda desde $0,3 \mu\text{m}$ hasta $2,5 \mu\text{m}$ ó $20 \mu\text{m}$



Pirómetro de Banda Angosta

Tienen una respuesta en longitud de onda relativamente angosta y cuidadosamente seleccionada, a menudo para satisfacer requerimientos específicos. Los pirómetros ópticos se pueden considerar como un caso especial de esta categoría

Pirómetro de Relación

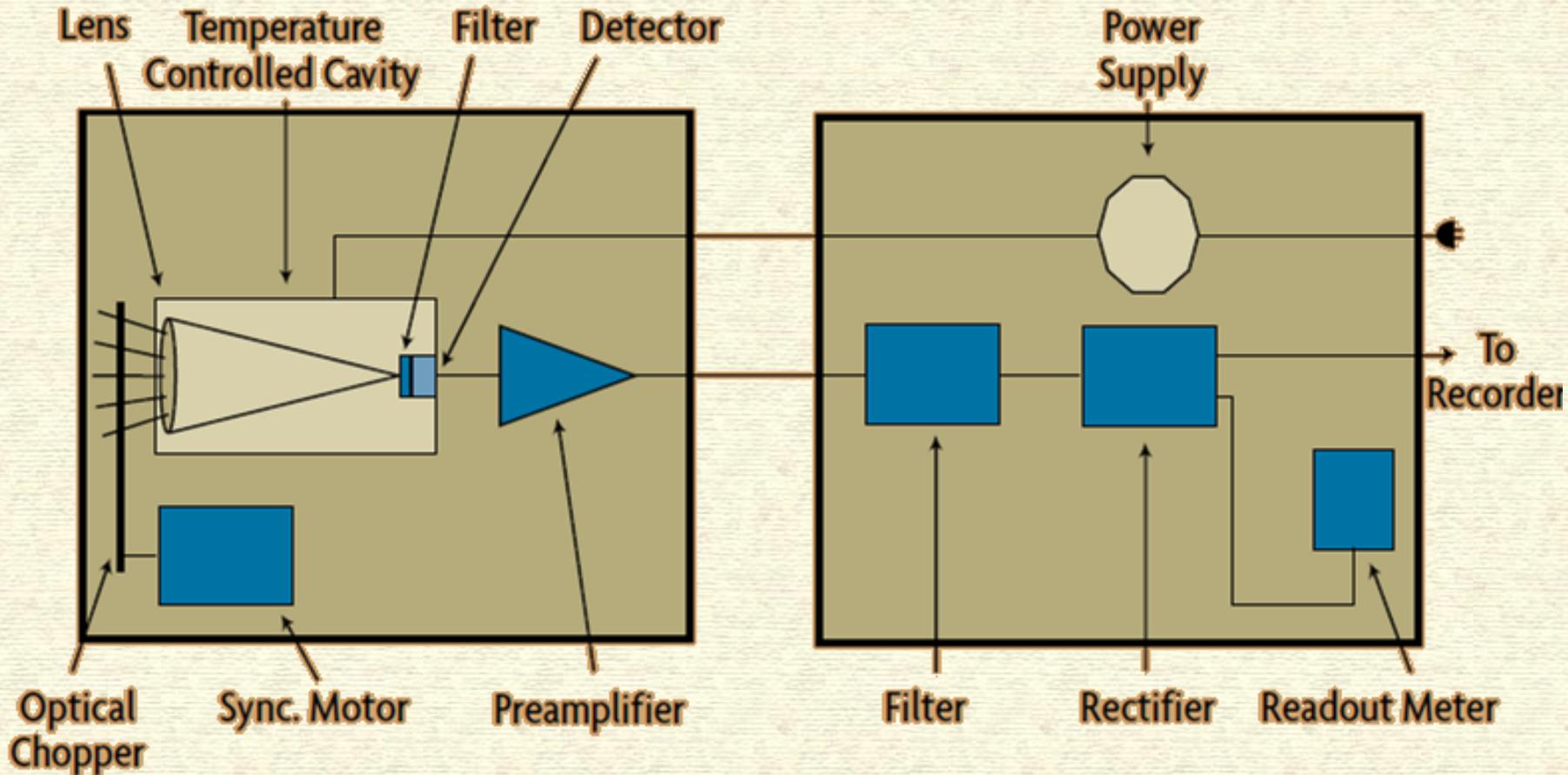
Son en esencia dos pirómetros combinados compartiendo elementos en común (lentes, detector, etc.) y que trabajan en longitudes de onda distintas. La medición es relativamente independiente del tamaño del objetivo, de su distancia y de su emisividad.



Evalúan la temperatura de acuerdo con la Ley de Stefan-Boltzman.

$$E = \epsilon \cdot \sigma \cdot T_e^4$$

PIRÓMETROS DE BANDA ANCHA



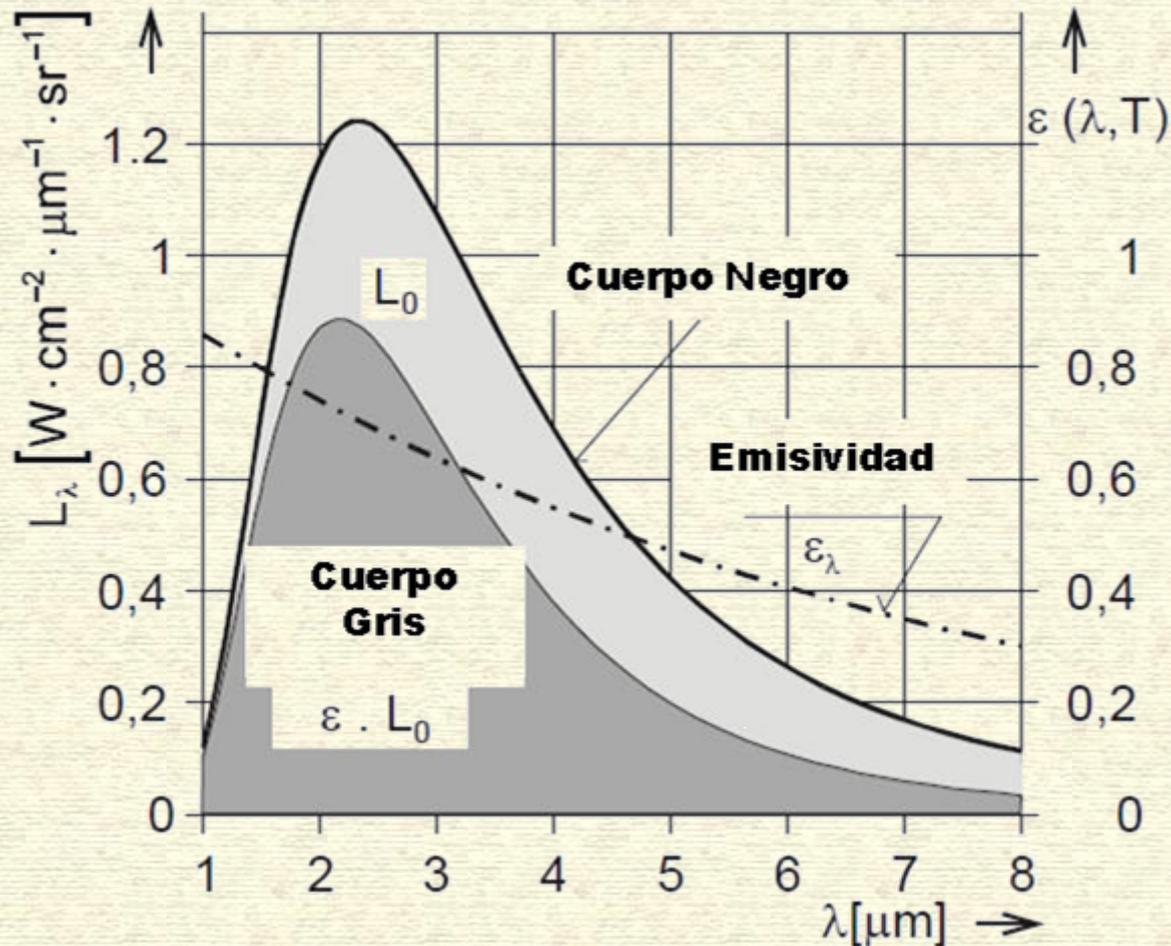
De acuerdo con la Ley de **Stefan-Boltzman**.

$$\sigma T^4 = \sigma \epsilon \tau_p T_S^4$$

$$T_S = T_0 \sqrt[4]{\frac{1}{\epsilon \tau_p}}$$

Donde τ_p es la transparencia de la atmósfera, T_0 la temperatura correspondiente al cuerpo negro.

PIRÓMETROS DE BANDA ANCHA



PIRÓMETROS DE BANDA ANCHA

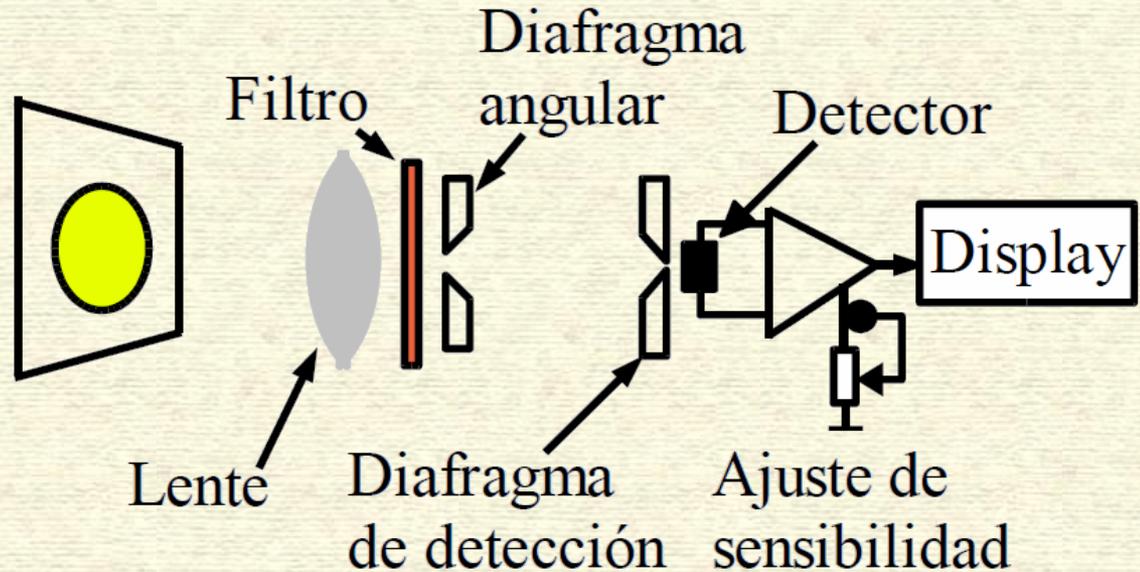
Características



- Amplio rango de longitudes de onda. De $0,3 \mu\text{m}$ hasta $2,5 \mu\text{m}$ ó $20 \mu\text{m}$
- Sensible al humo, humedad y otros gases que absorben radiación.
- Necesidad de un sistema óptico limpio
- Los alcances se ubican entre temperaturas ambiente y hasta los $4000 \text{ }^\circ\text{C}$.

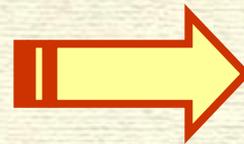
PIRÓMETROS DE BANDA ANGOSTA

Estos dispositivos trabajan en un estrecho rango de longitudes de onda, entre 0.5 a 25 μm aproximadamente. La longitud de onda se elige en función del rango de temperatura y el tipo de superficie a medir.



Se trabaja en la zona del pico de radiación y por lo tanto, aplicando la Ley de Wien

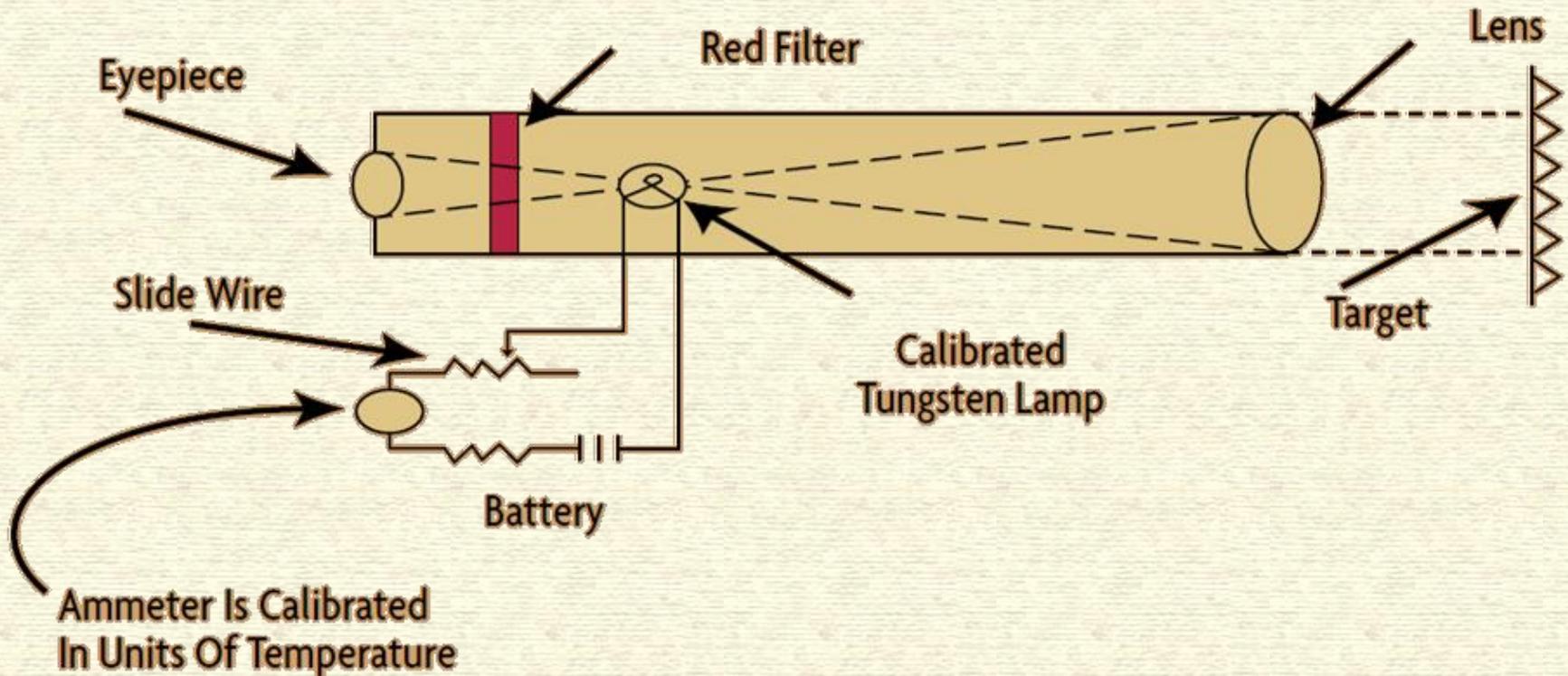
$$T_s = \frac{T_o c_2}{c_2 + \lambda T_o \ln(\epsilon_\lambda \tau_\lambda)}$$



$$\frac{dT_s}{T_s} = - \frac{\lambda T_s}{c_2} \frac{d\epsilon}{\epsilon_\lambda}$$

PIRÓMETROS DE BANDA ANGOSTA - ÓPTICO

Tienen una lámpara incandescente, generalmente de tungsteno, alimentada por una fuente que regula su luminosidad. Un sistema óptico se encarga de superponer la luz de la lámpara y la del objetivo para que puedan ser vistos simultáneamente. Un filtro rojo deja pasar la luz de $\lambda > 650$ nm. El ojo humano, proporcionan el intervalo de longitud de onda necesario



PIRÓMETROS DE BANDA ANGOSTA - ÓPTICO



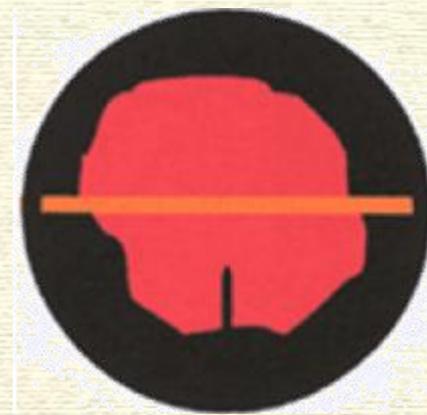
Para tomar una medición, se observa a través del ocular y se ajusta manualmente la intensidad de la lámpara hasta que ésta sea indistinguible de la radiación del objetivo.



Filamento más frío que el objetivo



Filamento y objetivo a la misma temperatura



Filamento más caliente que el objetivo

PIRÓMETROS DE BANDA ANGOSTA

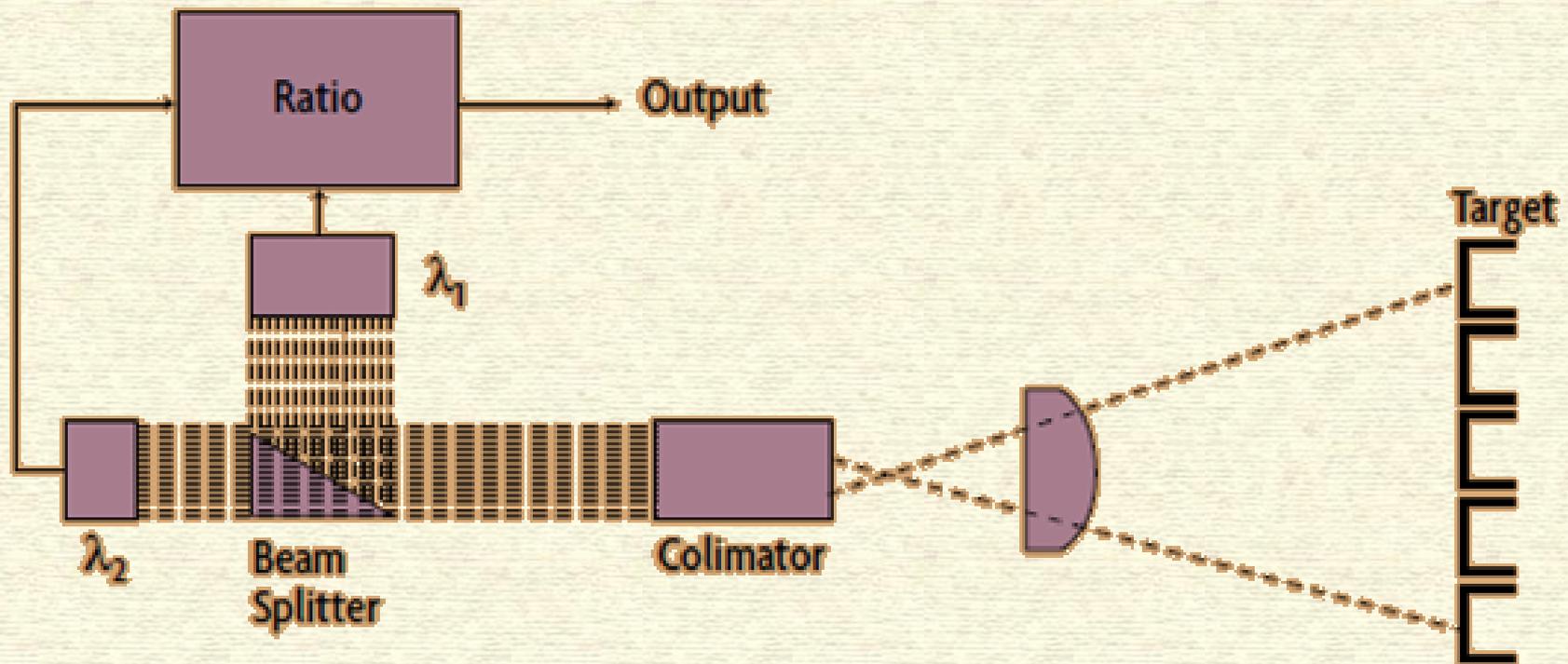
Características

- Se alcanza una buena precisión que puede estar entre ± 0.5 y ± 2 % Span
- El ancho de banda estrecho se logra con filtros apropiados. Cuando más estrecha la banda, más preciso es el instrumento
- La longitudes de onda se eligen para evitar la interferencia de la humedad o del dióxido de carbono de la atmósfera
- Una vez calibrado, cubre rangos de temperatura mucho más estrechos



PIRÓMETROS DE RELACIÓN

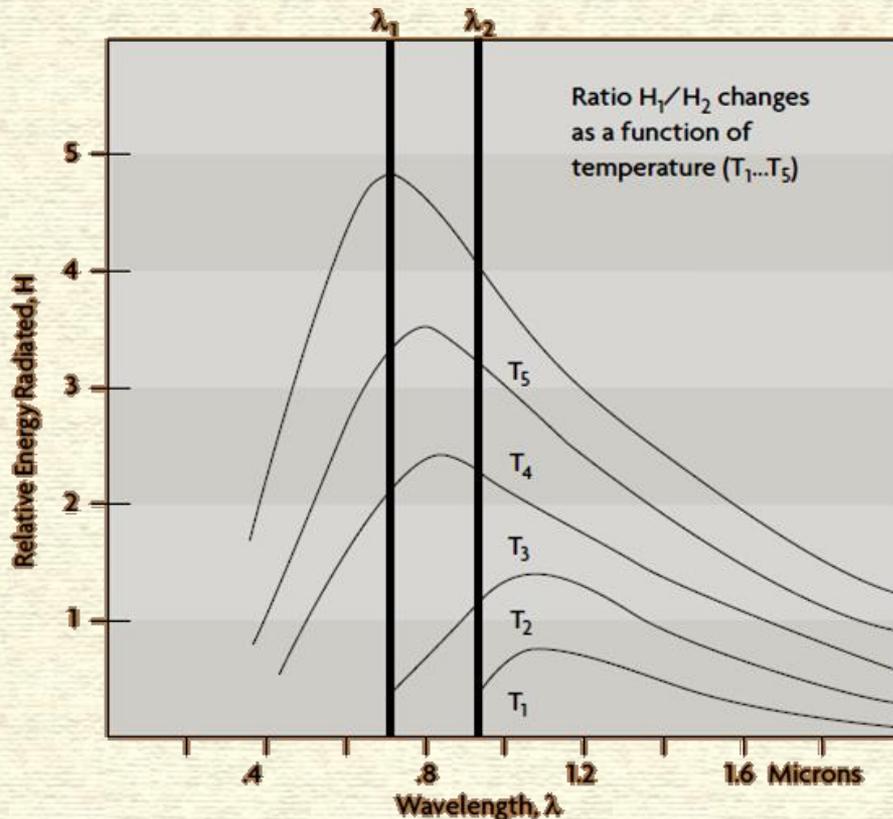
Hay dos sensores combinados con elementos en común (como las lentes y el detector), pero que trabajan con radiaciones de distinta longitud de onda. El dispositivo genera una señal que es el cociente de las respuestas individuales .



PIRÓMETROS DE RELACIÓN

Aplicando la Ley de Plank y haciendo el cociente, resulta:

$$\frac{1}{T_S} = \frac{1}{T_P} - \frac{1}{c_2} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \ln \frac{\epsilon_{\lambda_1}}{\epsilon_{\lambda_2}}$$



La idea es que la señal "cociente" depende de la temperatura, pero es relativamente independiente del tamaño y de la distancia al objetivo, a diferencia de los otros pirómetros.

Si la emisividad del objetivo es la misma para las dos longitudes de onda del instrumento, la medición resulta independiente de esta cantidad (o del cambio de la misma).

PIRÓMETROS DE RELACIÓN

Factores que afectan la medición



Emisividad desconocida o variable

Hay varias maneras de determinar la emisividad de un objeto. En caso de tratarse de materiales estándares, como aceros y plásticos, los valores de emisividad están **tabulados**:

Materiales no metálicos: 0,85 - 0,90

Metales no oxidados: 0,50 - 0,20

Aluminio, oro y plata: 0,02 - 0,04

De otro modo hay que hacer aproximaciones y para eso existen algunas **técnicas**:

- Por contraste con un termómetro de contacto.
- Usando una máscara de emisividad conocida en el objetivo

La emisividad tiene gran influencia en los pirómetros de radiación total

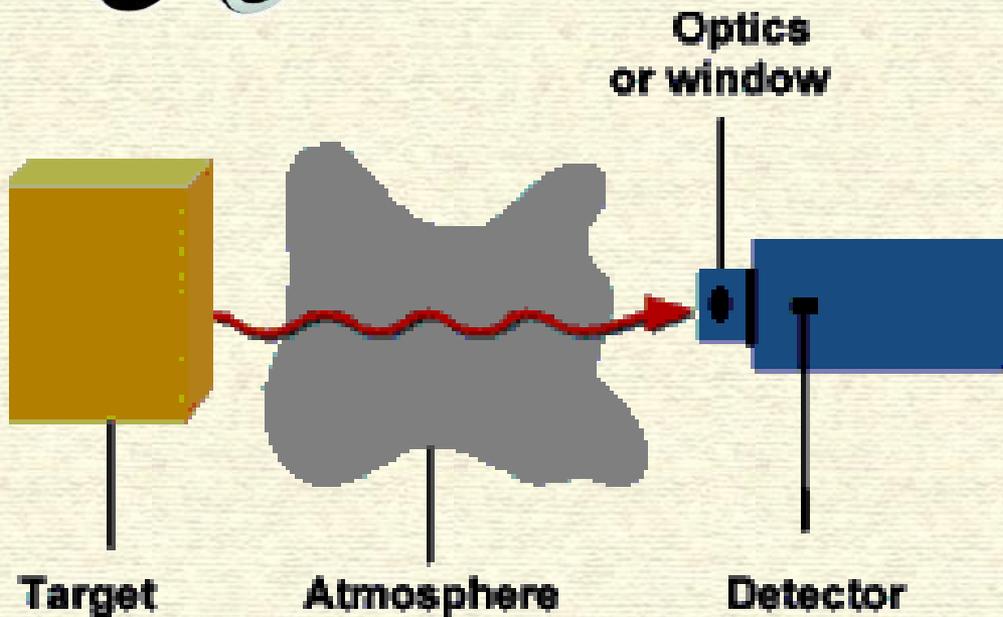
PIRÓMETROS DE RELACIÓN

Factores que afectan la medición

Interferencia en el campo de visión



La radiación del objetivo puede ser atenuada por: **obstrucción física** por humo, polvo o vapor, **absorción** por otros gases en el campo de visión, **bloqueo** intermitente por un cuerpo opaco frío que obstruye el campo de visión.

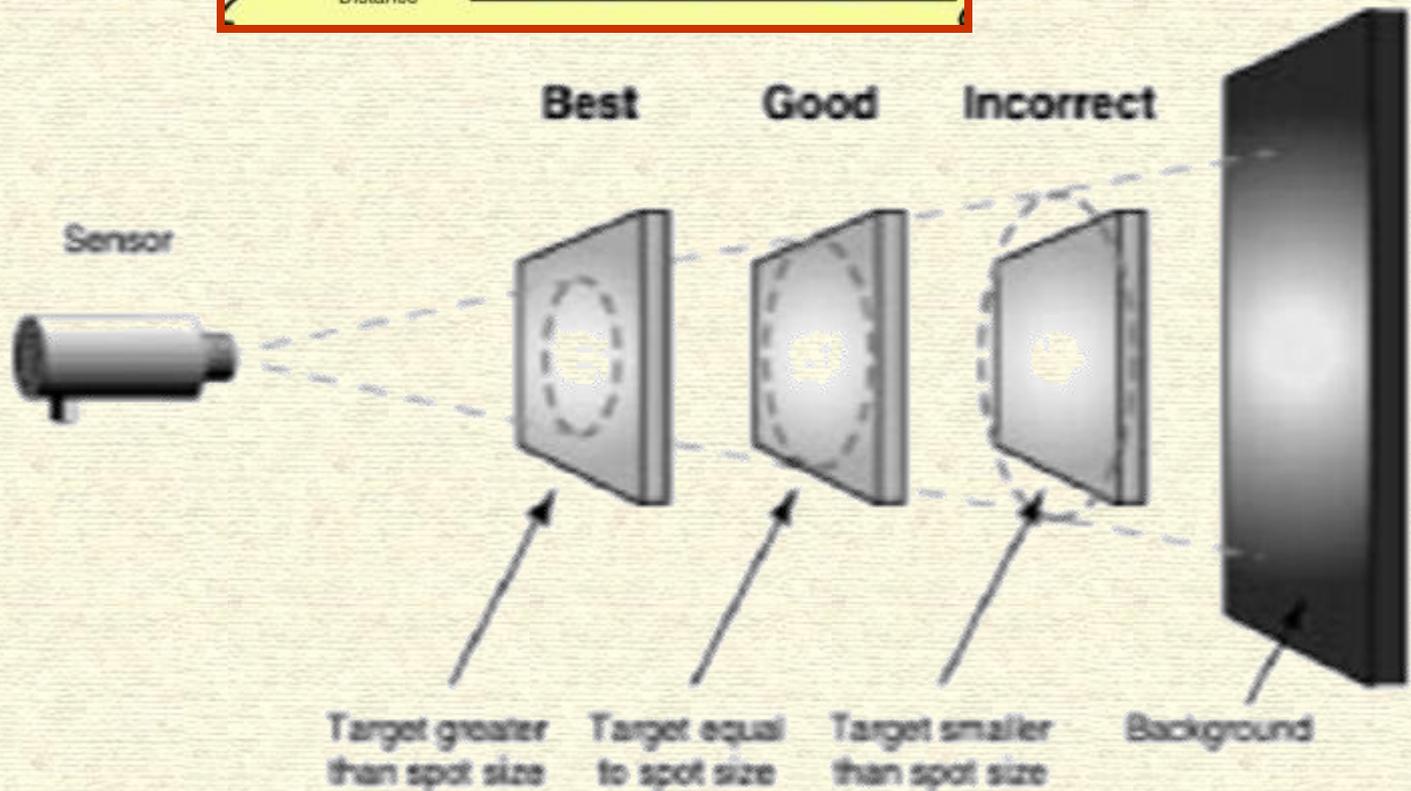
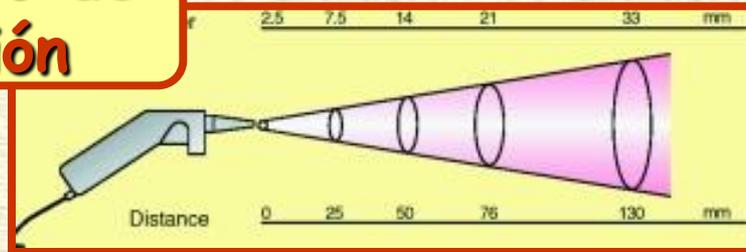


Conviene analizar el espectro de absorción de cualquier material que obstruye el campo de visión, para evitar emplear longitudes de onda que coincidan con las líneas de absorción

PIRÓMETROS DE RELACIÓN

Factores que afectan la medición

Angulo de visión



PIRÓMETROS - Detectores

Los elementos que miden la radiación proveniente del objeto pueden ser:.

Sensores fotoeléctricos

Elementos que generan señales eléctricas que cambian por efecto de la radiación infrarroja



Termopilas

Termocuplas en serie



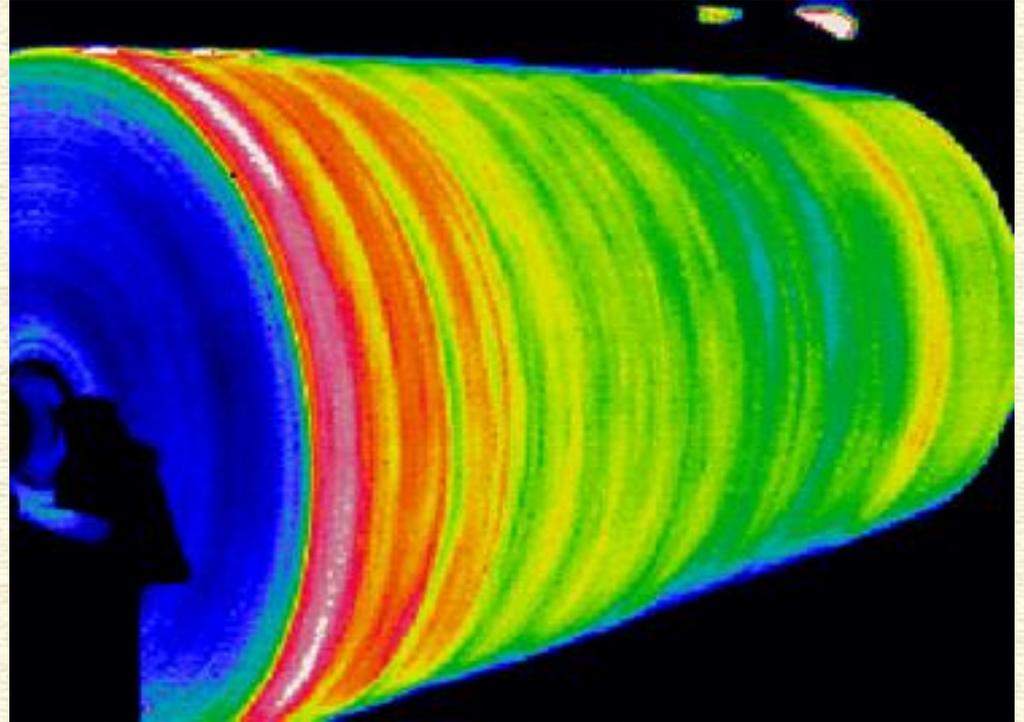
Bolómetro

Medidor de la radiación térmica basados en RTDs



PIRÓMETROS DE IMAGEN (Scan)

Hay **pirómetros** que **generan imágenes** de color que dan un mapa de las temperaturas sobre la superficie. Son de indicación.



INDICADORES, REGISTRADORES Y CONTROLADORES

INPUTS

T/C's: J, T, K, L, N, B, R, S, C; Pt Rh20%
vs. Pt 40% Rh

RTD: 3-wire, PT100

DC Linear (Scalable -1999 to +9999)

Volts: 0-5V, 1-5V, 0-10V, 2-10V

DC milliamps: 0-20mA or 4-20mA

DC millivolts: 0-50mV, 10-50mV

OUTPUTS

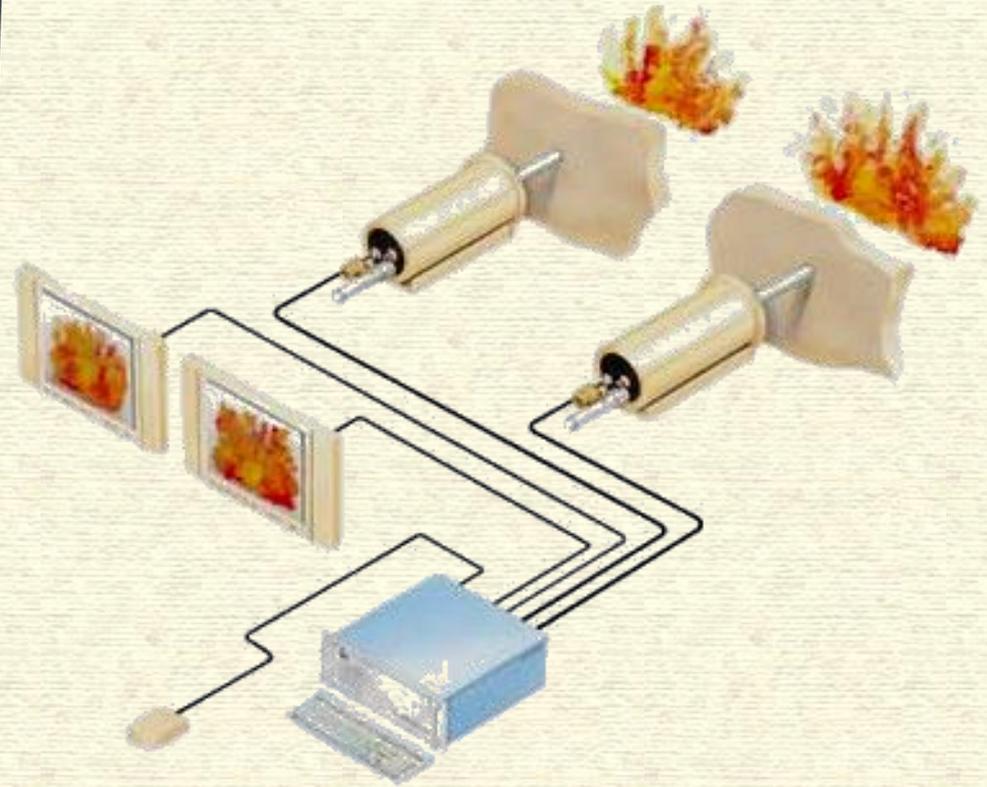
All outputs are user-selectable and customized based on desired application; choose from the following output types

Max # of Outputs: 4 for alarm, 24 VDC transmitter power supply or retransmit of process value

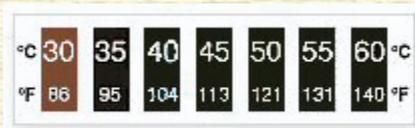
Single Alarm Relay: Optional SPDT; 240VAC 2A resistive; Lifetime >500,000 operations at rated voltage/current



INDICADORES, REGISTRADORES Y CONTROLADORES



INDICADORES VISUALES DE TEMPERATURA



Indicadores reversible



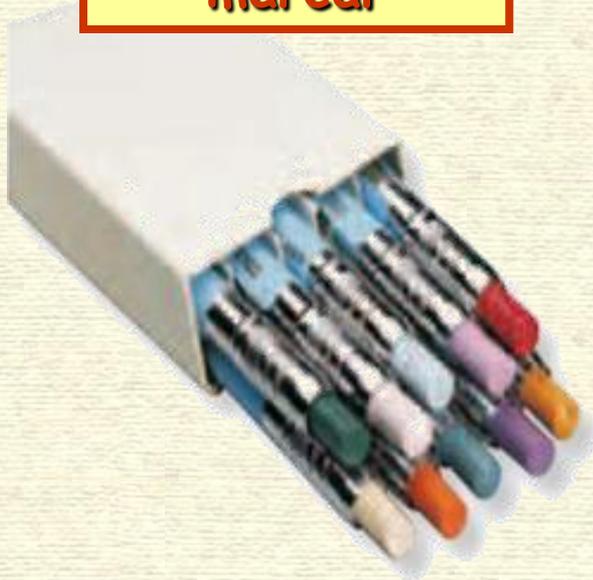
Indicador irreversible



Hay rótulos (autoadhesivos) con pigmentos que cambian de color en forma reversible o irreversible para indicación de niveles de temperaturas

INDICADORES VISUALES DE TEMPERATURA

Crayones para marcar



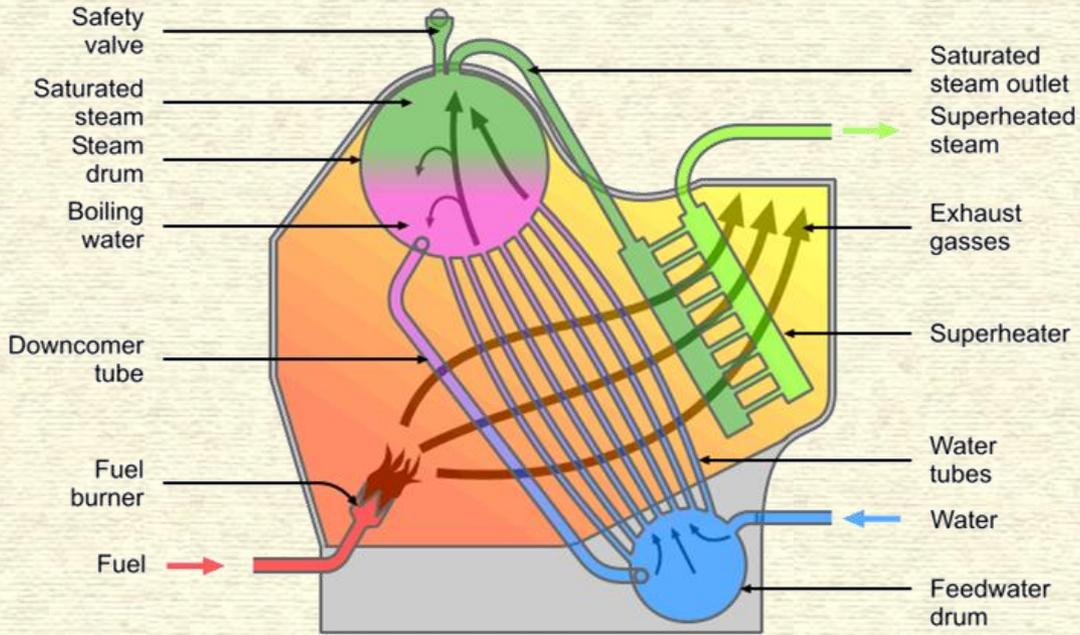
Initial crayon color	Temperature points			
	First color change		Second color change	
Light gray	Violet-blue	248°F (120°C)	—	—
Pink	Blue-violet	383°F (195°C)	Gray	563°F (295°C)
Pale blue	Light green	419°F (215°C)	White-buff	581°F (305°C)
Light purple	Bright blue	437°F (225°C)	Gray	608°F (320°C)
Orange-brown [†]	Black	473°F (245°C)	Light-gray	635°F (335°C)
Yellow-brown	Red brown	572°F (300°C)	—	—
Dark violet	Light violet	608°F (320°C)	White-buff	860°F (460°C)
Aqua green	White-buff	680°F (360°C)	—	—
Red	White	878°F (470°C)	—	—
Apple green	White	1112°F (600°C)	—	—

[†]Orange-brown crayon has a third color change at 941°F (505°C).

La variante es usar **pintura** o **crayones** con pigmentos **temrosensibles**

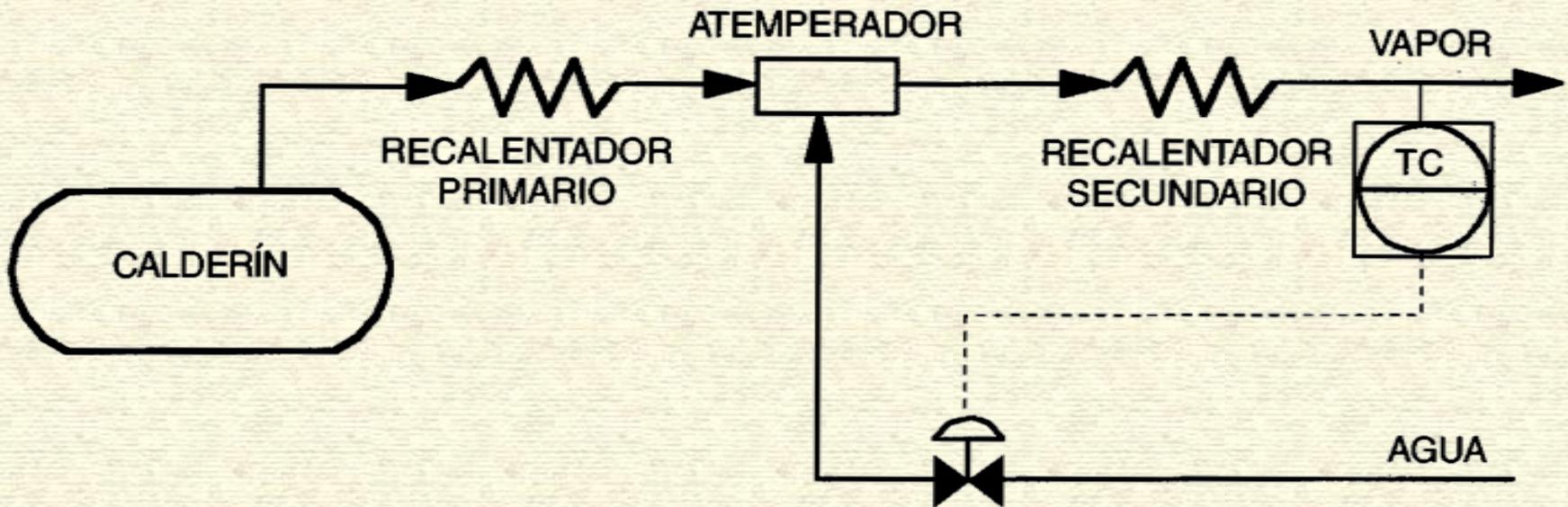
Pinturas





LAZO DE CONTROL DE TEMPERATURA

Temperatura de recalentamiento de una caldera



INSTRUMENTOS COMERCIALES

LAND

**LAND -Cyclops 390B
Furnace Pro**



<http://www.landinst.com/>

**General Purpose
Test Wells**



OMEGA

<http://www.omega.com/>


EMERSON
Process Management



**ROSEMOUNT
RTD Sensors**

<http://www2.emersonprocess.com/en-US/brands/rosemount/Temperature/>

INSTRUMENTOS COMERCIALES



**YTA110
Temperature
Transmitter**

<http://www.yokogawa.com/>



Power and productivity
for a better world™

**Tranmisor de Temperatura
TF212/TF212-Ex**



<http://www.abb.com/>



**Sensor de Temperatura
a Termoresistencia**

<http://www.conar.com>