

Clase Experimental I: Temperatura y Termometría

- Que es la temperatura
- Historia
- Escala de temperaturas
- Termometría (termómetros y medición)
- Termómetros de expansión térmica
- Termómetros de resistencia eléctrica
- Termómetros de termoelectrónicos
- Termómetros de radiación

Que es la TEMPERATURA

- Intuitivamente la Temperatura es una forma de registrar una sensación de frio o calor (RELATIVO)
- La temperatura es una magnitud o PROPIEDAD FÍSICA que dos objetos tienen en común cuando alcanzan el EQUILIBRIO TERMICO térmico luego de estar en contacto por un periodo largo de tiempo.
- La Temperatura es la tasa o velocidad de cambio de la energía interna respecto al cambio de entropía

$$\left(\frac{dU}{dS}\right)_V = T \quad \left(\frac{dH}{dS}\right)_P = T$$

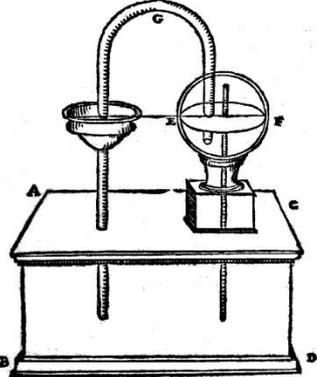
El Principio Cero de la Termodinámica: Si dos sistemas están por separado en equilibrio térmico con un tercero, entonces están en equilibrio térmico entre sí.

- La Temperatura es una medida de la energía cinética PROMEDIO de las partículas que componen un objeto: cuando la temperatura aumenta \leftrightarrow aumenta el movimiento de las partículas.
La temperatura y la energía térmica NO SON LO MISMO: Energía térmica es la energía interna de un objeto asociado al movimiento de sus partículas/la temperatura esta relacionada con la energía cinética promedio de estas partículas, no con la energía total de ellas o el sistema (ESTADISTICA)
Si tienen la misma TEMPERATURA, NO necesariamente tienen la misma ENERGIA TERMICA
No tiene sentido hablar de T de una partícula

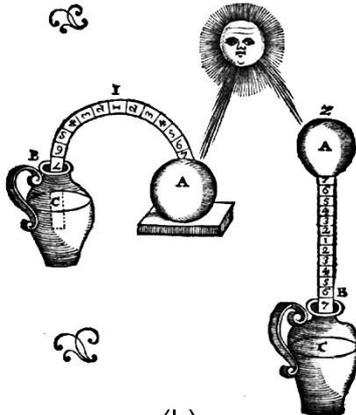
Historia

Fuente del Heroe. Fuente Solar y Termoscopio

Mediciones atmosféricas



(a)

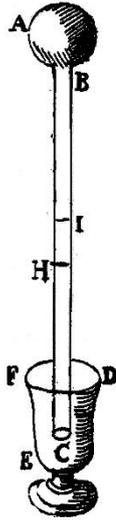


(b)



(c)

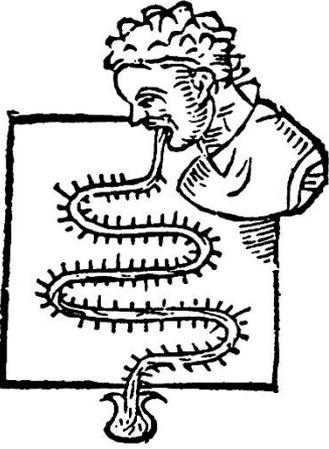
1600's Termoscopios de (d) Galileo and (e-f) Sanctorius (medico)



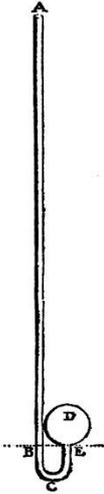
(d)



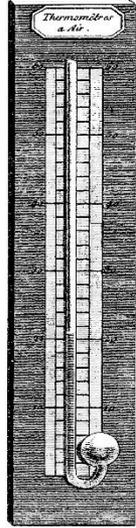
(e)



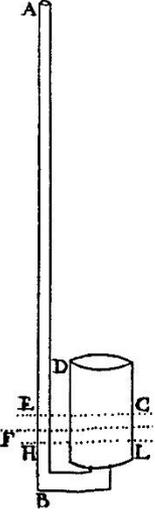
(f)



(g)



(h)



(i)



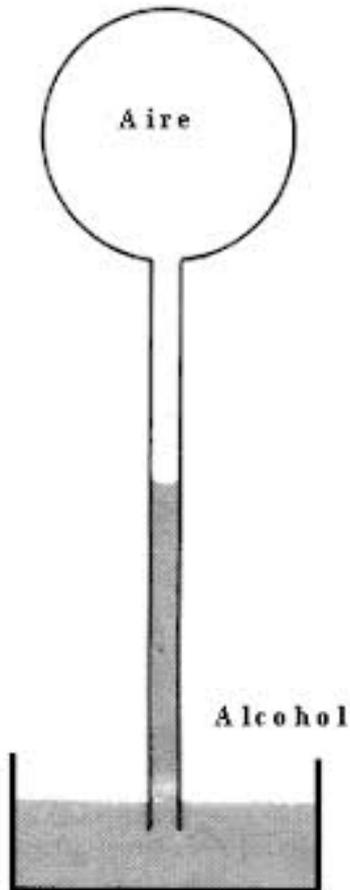
(j)

Termómetros de aire de (g) y (h) Amontons, (i) Poleni (j) Stancari

Historia

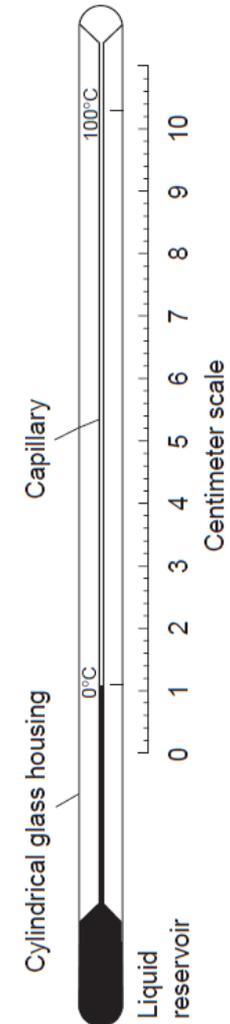
Termómetro de Líquido (Medio termométrico: Mercurio)

Termoscopios
(Medio termométrico: aire)



La Temperatura es una medida de la cantidad de energía térmica que posee un objeto, es una propiedad RELATIVA → ESCALA basada en una medición exacta de una temperatura o estado de referencia

Para definir ESCALA se necesitan al menos 2 puntos de referencias



Historia

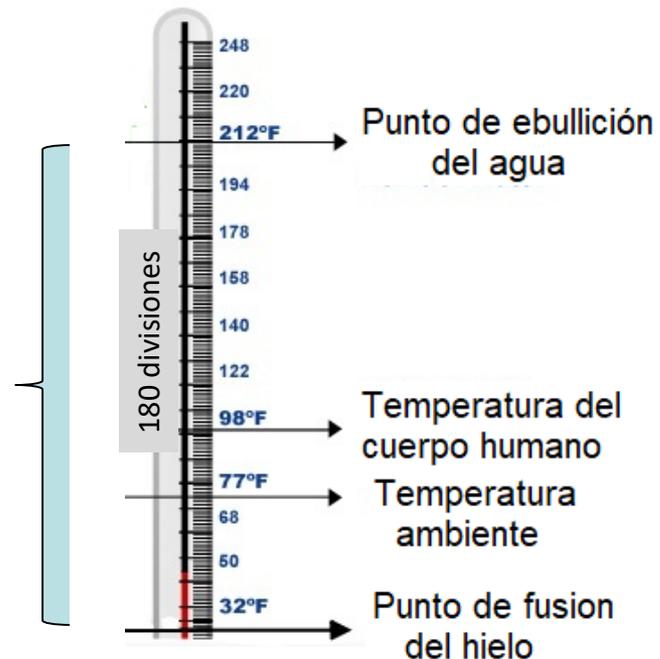
1724-Fahrenheit

mercurio como líquido termométrico.

Punto A = 0: termómetro en una mezcla de sal de amonio o agua salada, hielo y agua

Punto B = 30: termómetro en una mezcla de hielo y agua (sin sal)

Punto C = 96: termómetro en la boca para adquirir el calor del cuerpo humano.



F°
FAHRENHEIT

Historia

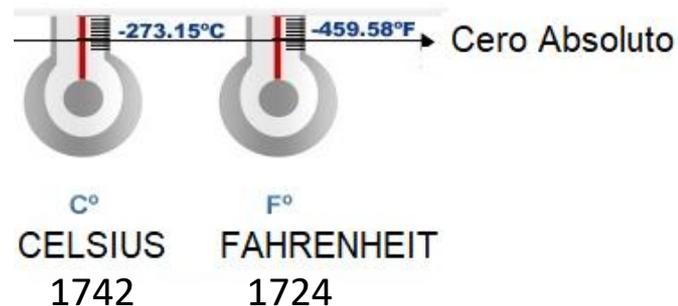
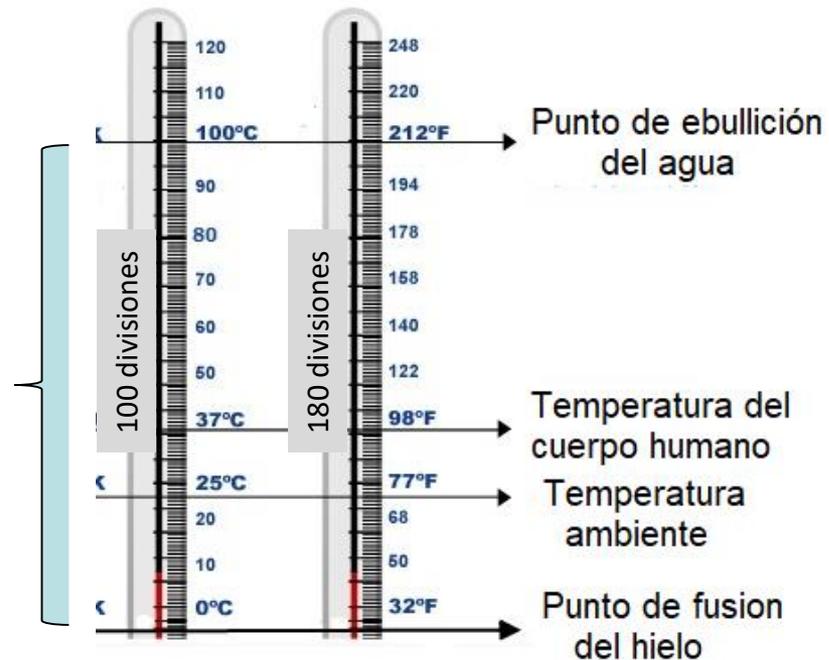
1745-C. Linneo de Upsala
Punto A = 0: Punto de ebullición del agua.

Punto B= 100: Punto de congelamiento del Agua

1742-A. Celsius

usó la escala al revés

Mantuvo la división de 100

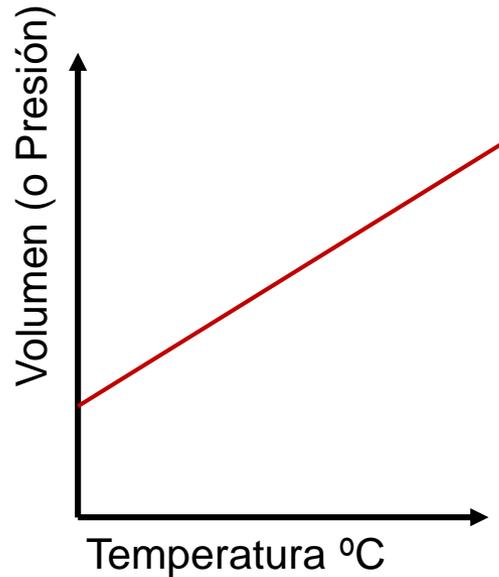


Historia

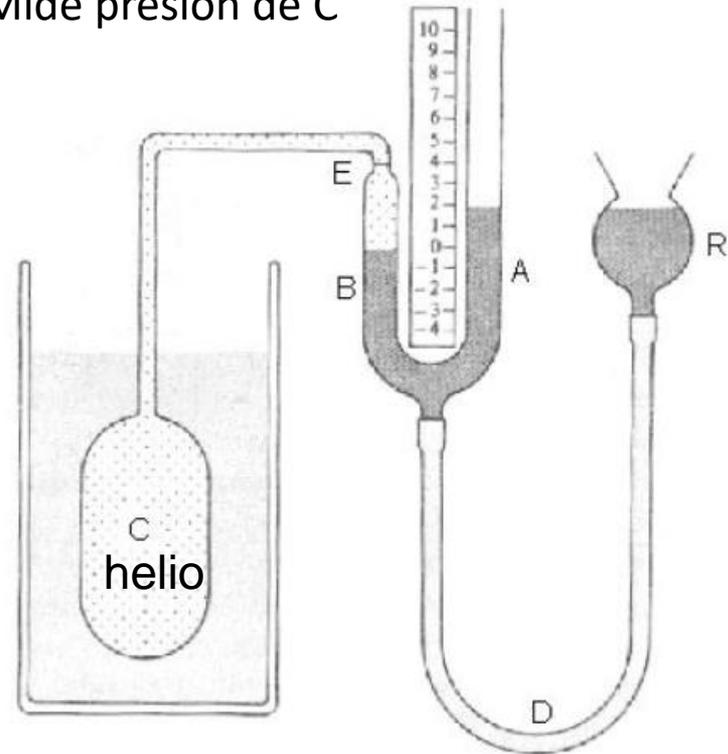
Termometro de GAS

1780- J. A. C. Charles

Curvas V-T (o P-T) de gas



manómetro de mercurio de rama abierta:
Mide presión de C



A medida que aumenta la temperatura del gas, éste se dilata y obliga al mercurio a bajar en el tubo B y ascender en el tubo A.

Los tubos A y B se comunican a través de un tubo de caucho D, con un depósito de mercurio R.

Al elevar R el nivel de mercurio en B puede enrasarse con la marca de referencia E (gas a $V = cte$)

Se mide un punto de referencia (punto triple del agua y se refiere con respecto a ese punto.)

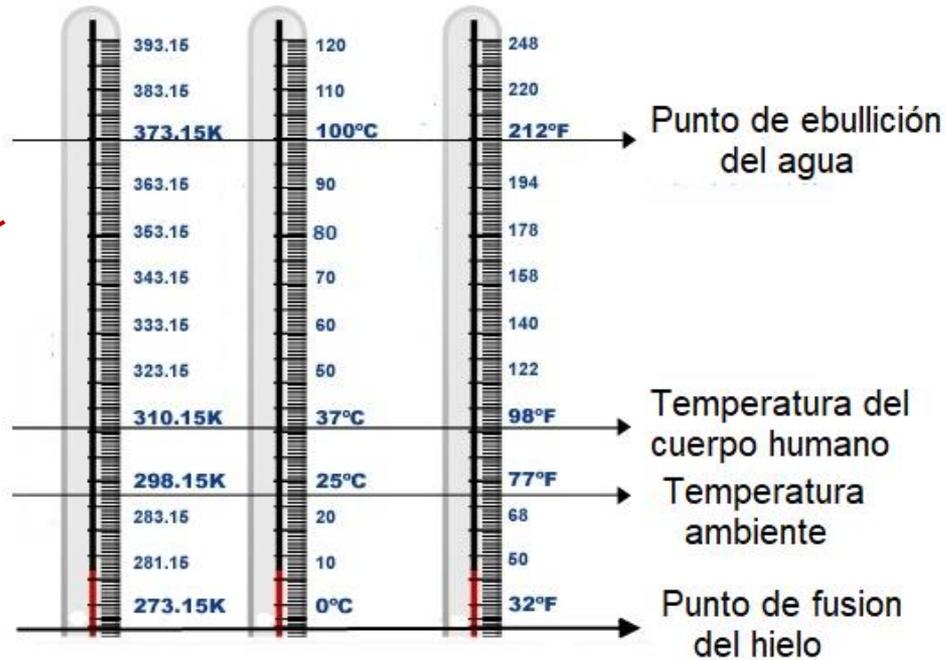
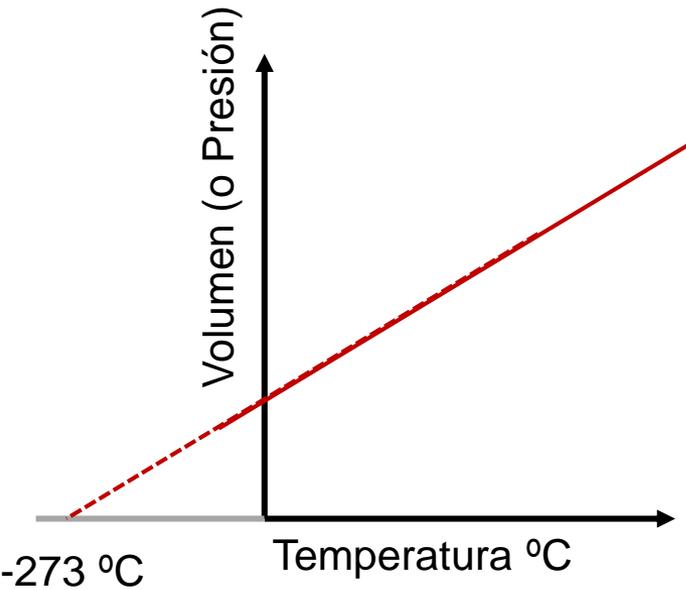
Con esto es posible establecer una escala de temperatura basada en un solo punto fijo en vez de dos.

Sensibilidad, exactitud de medición y reproductibilidad. Pero es LENTO!

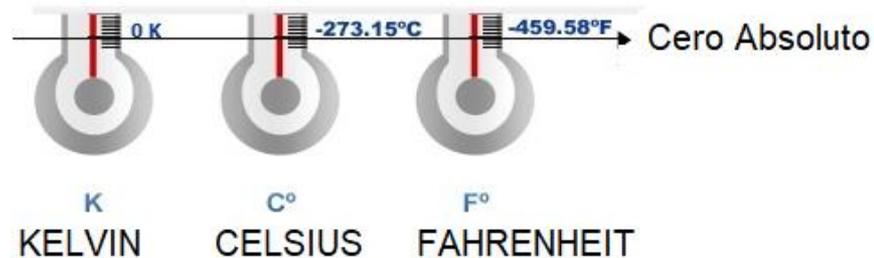
Historia-Escalas de Temperatura

1854- Lord Kelvin (Williams Thompson)

Curvas V-T (o P-T) de gas



1871-Sir William Siemens
 termómetro resistivo -medio
 termométrico Platino
 -260° C a 1235° C.



Historia-Escala de temperaturas

- El termómetro de gas no es práctico (lento y voluminoso)
- No hay un Kelvin patrón, las convenciones para medir temperatura se basan en fenómenos físicos y puntos fijos.

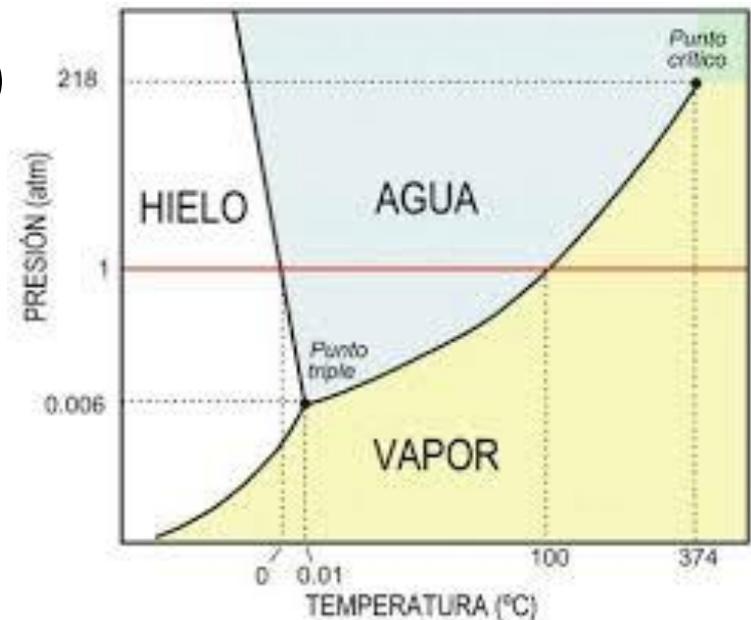
1933- científicos de 31 naciones adoptan una nueva escala con puntos fijos y principios termodinámicos: International Temperature Scale ITS

Objetivo: proporcionar una escala práctica de temperaturas, fácil y exactamente reproducible, y con la máxima aproximación las temperaturas termodinámicas.

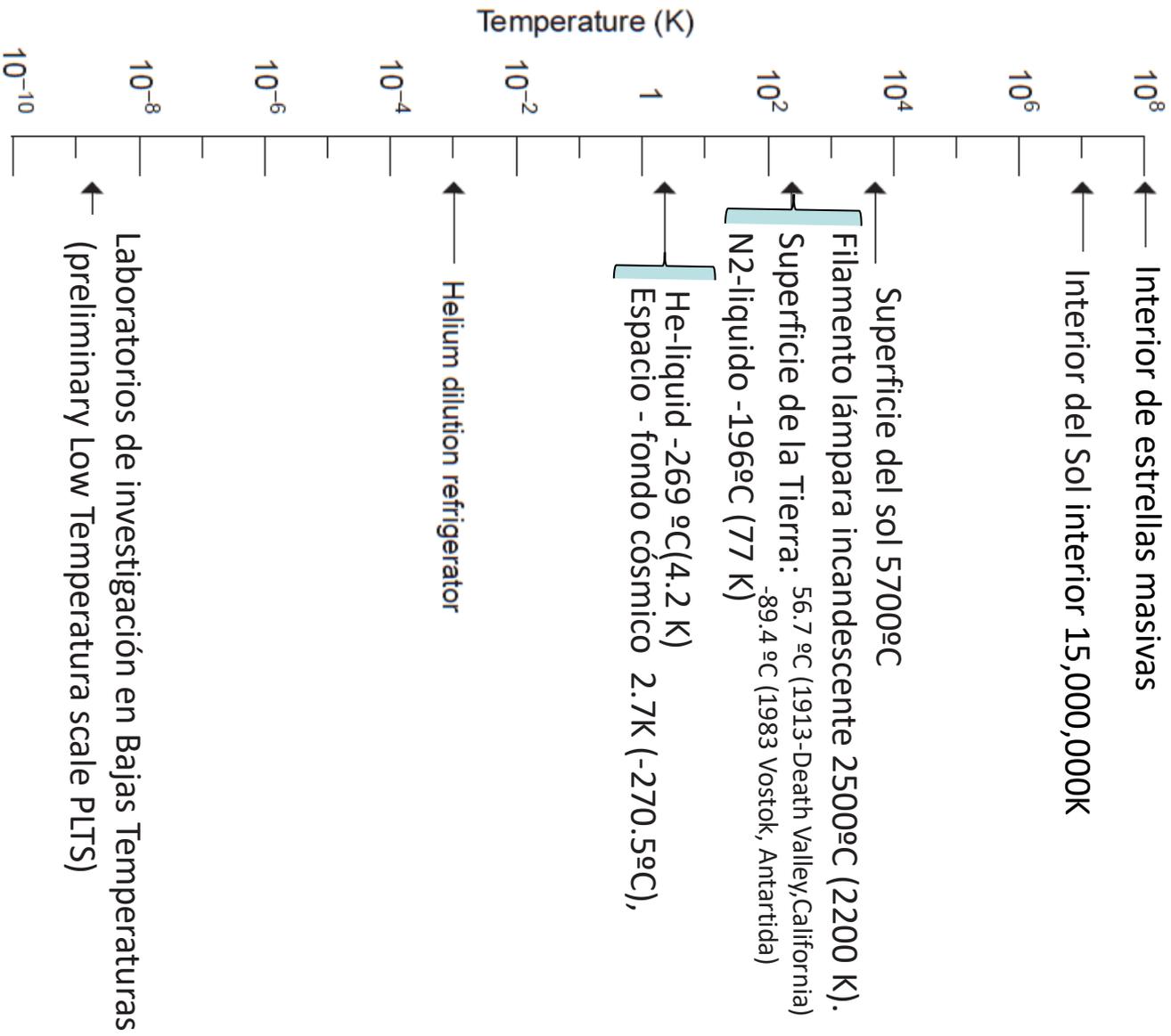
1954- Punto triple del agua 273.16K (611.73Pa)

1968 (ITS68)

1990 (ITS90)- 0.65K



RANGO de TEMPERATURAS



RANGO de TEMPERATURAS

Temperatura mas
baja obtenida
artificialmente
Ordenamiento de
momentos
nucleares

100pK

Vida cotidiana

Plasma en
reactores de fusión
500 MK

LHC 5.5 GK
Large Hadron Collider

Teoría, 10^{-44} s
despues del Big
Bang

10^{-10}

10^0

10^{10}

10^{20}

10^{30}

Temperatura (K)



Preliminary Low Temperature Scale
0.9mK ↔ PLTS-2000 ↔ 1K

International Temperature Scale
0.65K ↔ ITS-90 ↔ 1358K

Historia-Escala de temperaturas de REFERENCIA

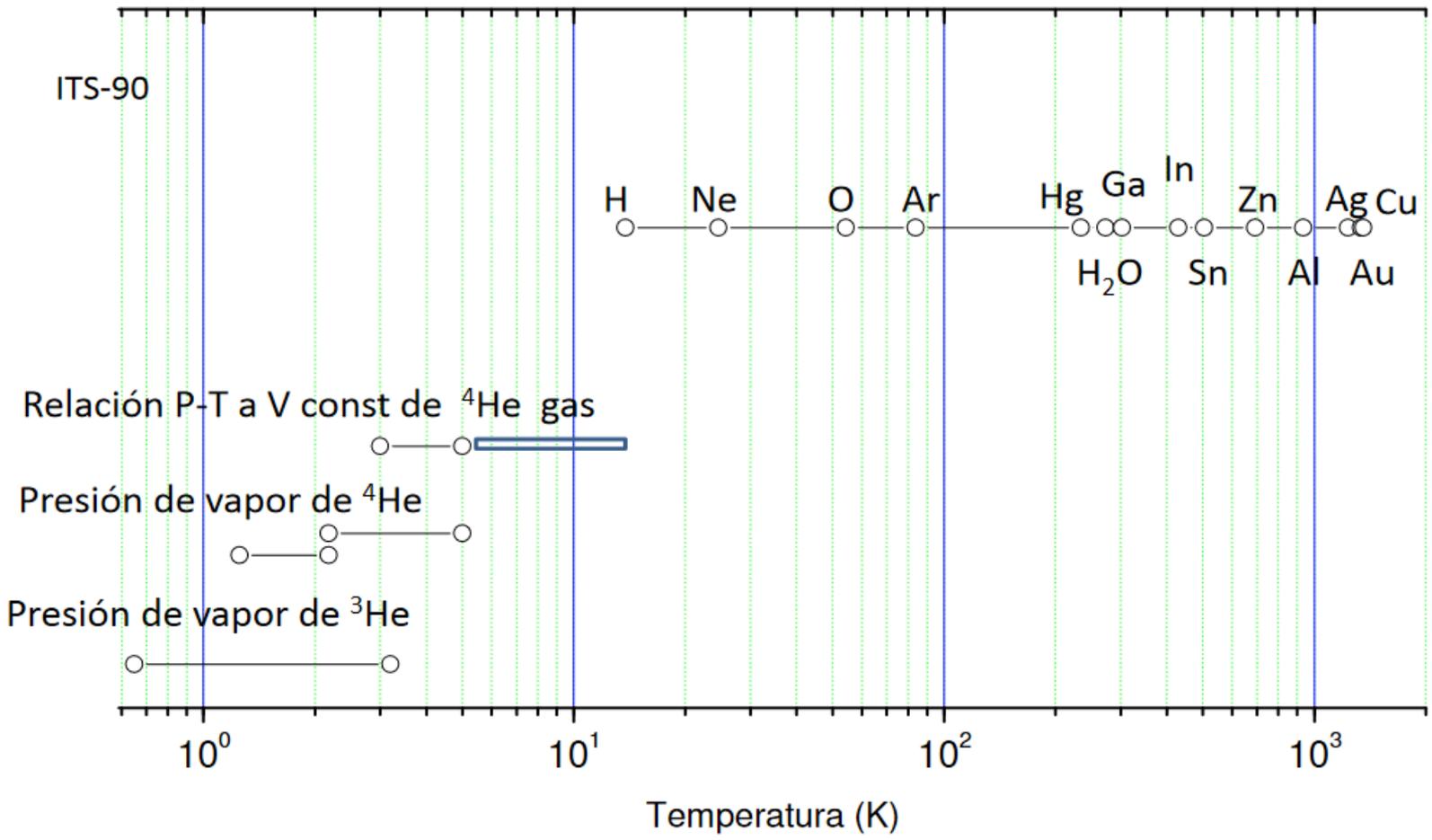
ITS-90:

- Definen los **puntos fijos termométricos** o estados de equilibrio térmico, correspondientes a cambios de fase de sustancias puras, a los cuales asigna un valor de temperatura termodinámica. Estos puntos fijos son utilizados por esta escala como referencias de temperatura.

Escala de temperaturas de Referencia-ITS-90

Punto fijo	Temp. (K)	Temp. (C)
Relación P_{vap} -T del helio-3	0,65 a 3,2	-272,50 a -269,95
Relación P_{vap} -T del helio-4 por debajo de su punto lambda	1,25 a 2,1768	-271,90 a -270,9732
Relación P_{vap} -T del helio-4 por encima de su punto lambda	2,1768 a 5,0	-270,9732 a -268,15
Relación P_{vap} -T del helio	3 a 5	-270,15 a -268,15
Punto triple del hidrógeno	13,8033	-259,3467
Hidrógeno a 32,9 kPa	17	-256,15
Hidrógeno a 102,2 kPa	20,3	-252,85
Punto triple del neón	24,5561	-248,5939
Punto triple del oxígeno	54,3584	-218,7916
Punto triple del argón	83,8058	-189,3442
Punto triple del mercurio	234,3156	-38,8344
Punto triple del agua	273,16	0,01
Punto de fusión del galio	302,9146	29,7646
Punto de fusión del indio	429,7485	156,5985
Punto de fusión del estaño	505,1181	231,928
Punto de fusión del zinc	692,73	419,527
Punto de fusión del aluminio	933,473	660,323
Punto de fusión de la plata	1234,93	961,78
Punto de fusión del oro	1337,33	1064,18
Punto de fusión del cobre	1357,77	1084,62

Escala de temperaturas de Referencia-ITS-90



Escala de temperaturas de Referencia-ITS-90

Puntos fijos de la ITS-90 que posee el INTI

<https://www.inti.gov.ar/areas/metrologia-y-calidad/patrones-nacionales-temperatura>

Puntos fijos	t ₉₀ /(°C)	Incertidumbre (k=2)(mK)
Punto triple de argón (Ar)	-189,3442	1,3
Punto triple de mercurio (Hg)	-38,8344	0,7
Punto triple de agua	0,01	0,4
Punto de fusión de galio (Ga)	29,7646	0,7
Punto de solidificación del indio (In)	156,5985	2,2
Punto de solidificación del estaño (Sn)	231,928	2,3
Punto de solidificación del zinc (Zn)	419,527	4
Punto de solidificación del aluminio (Al)	660,323	7
Punto de solidificación de la plata (Ag)	961,78	14
Punto de solidificación del oro (Au)	1064,18	*

Los valores de incertidumbre informados corresponden a las mejores capacidades de medición (CMC's) para la calibración de un termómetro de resistencia de platino patrón, en los valores de temperatura indicados.

(*) Actualmente la diseminación de la porción superior de la ITS-90 ($t \geq 961,78 \text{ °C}$) está referida a lámparas pirométricas calibradas en el exterior.

Referencia	Intervalo de temperaturas(°C)	Longitud de onda(nm)	Incertidumbre (k=2)(°C)
Lámpara evacuada, de alta estabilidad, con filamento de tungsteno.	800 a 1500	~ 650	0,00075.t/(°C)
Lámpara con gas, de alta estabilidad, con filamento de tungsteno.	1500 a 2200	~ 650	0,0024.t/(°C)

En el rango de temperaturas superiores 961,78 °C y hasta 2200 °C, la referencia nacional de temperatura la constituyen diversas lámparas pirométricas, que disponen de trazabilidad a la ITS 90. Para la diseminación de esta porción de la escala se utiliza además un termómetro de radiación como comparador de radiancia.

Los valores de incertidumbre informados corresponden a las mejores capacidades de medición (CMC's) para la calibración de lámparas pirométricas, en los valores.

Escala de temperaturas de Referencia-ITS-90

ITS-90:

- Definen los **puntos fijos termométricos** o estados de equilibrio térmico, correspondientes a cambios de fase de sustancias puras, a los cuales asigna un valor de temperatura termodinámica. Estos puntos fijos son utilizados por esta escala como referencias de temperatura.
- Determina el **tipo de termómetro** que se debe usar, según la porción de la escala que se desea implementar.
- Proporcionan **leyes de interpolación y extrapolación**, que permiten obtener valores de temperatura diferentes a aquellos correspondientes a los puntos fijos.

Termometría

Para determinar las temperaturas de diferentes sistemas, el procedimiento más sencillo es definir arbitrariamente uno de los sistemas como un indicador del equilibrio térmico entre él y los demás sistemas (termómetro)

El termómetro debe:

- perturbar mínimamente el estado de los sistemas con los que se ponga en contacto.
- presentar alguna variable de estado (propiedad termométrica) fácilmente medible y que varíe apreciablemente ante un cambio pequeño de la temperatura.

Medición de la TEMPERATURA requiere contacto Según la característica del contacto entre termómetro y medio a evaluar

-**Invasivo**. Contacto DIRECTO entre el termómetro y el medio ej. Termómetro de mercurio en agua.

-**Semi-invasivo**: el medio que se quiere medir se trata con algo (ej. recubrimiento superficial) cuyo color cambia con la temperatura

- **No Invasivo**: El medio de interés se observa de forma remota. Es especialmente importante a muy alta temperatura o en medio químicamente reactivos en los cuales se puede degradar el instrumento de medición. Ej. Termografía infrarroja

TERMOMETRIA

Las propiedades de un termómetro :

sensibilidad (la propiedad termométrica debe cambiar de manera apreciable ante un cambio pequeño de la temperatura)

exactitud en la medición de la propiedad termométrica

reproductibilidad.

-rapidez para alcanzar el equilibrio térmico con otros sistemas.

Propiedad termométrica (x) varía linealmente con la temperatura, de manera que:

$$T(x)=ax+b.$$

PROP. TERMODINAMICAS

- El volumen de un gas mantenido a presión constante
- La presión de un gas mantenido a volumen constante
- El volumen de un líquido en un capilar
- La longitud de una varilla

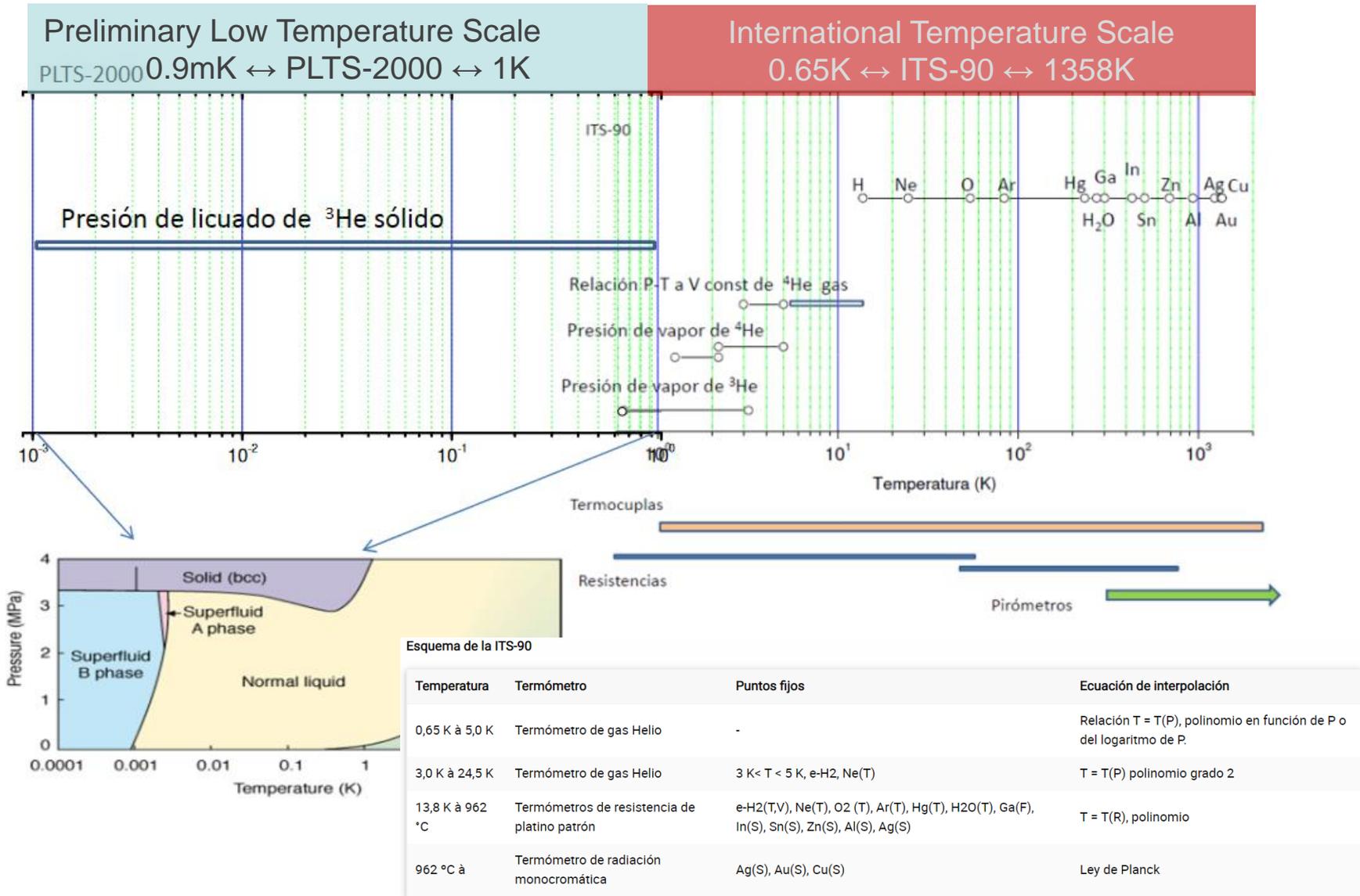
PROP. TERMOELECTRICAS

- La resistencia eléctrica de un alambre
- El voltaje eléctrico (o FEM) generada por un termopar

PROP. TERMOESPECTRALES

- El color
- La radiación térmica

TERMOMETRIA



TERMOMETRIA

Termómetros que se usan en el laboratorio

1- Expansión térmica de sólidos, líquidos o gases:

1.a. Termómetro de gas

1.b. Termómetro de líquido en vidrio

1.c. Termómetro Bimetálicos

2- Resistencia eléctrica de metales o semiconductores

2.a. RTD Resistance Temperature Detector-Pt

2.b. Termistores

3. Poder termoeléctrico:

3.a. Termocuplas

4. Termómetros de Radiación

4.a. Pirómetros Ópticos

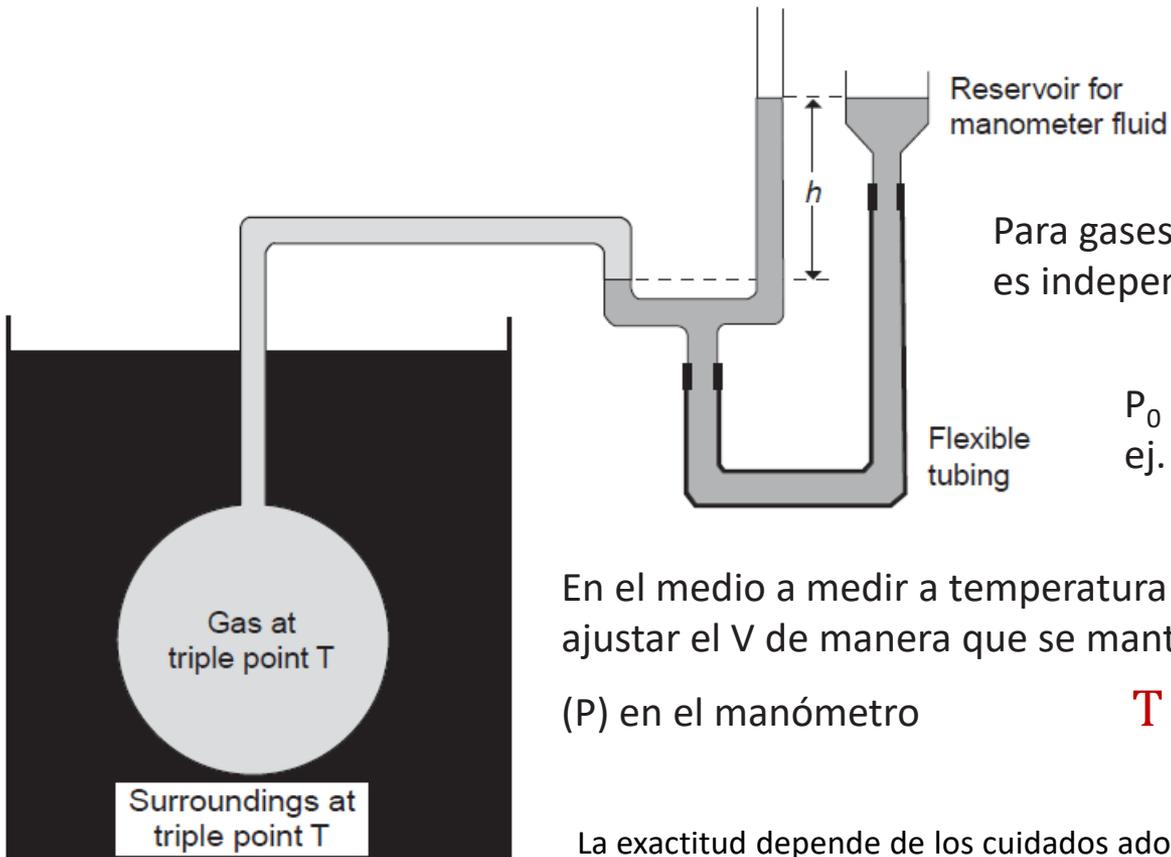
4.b. Termómetros Infrarrojos

TERMOMETRIA-EXPANSION TERMICA

de sólidos, líquidos o gases

INVASIVAS

TERMOMETRO DE GAS A VOLUMEN CONSTANTE



Para gases “ideales” (baja presión) la medición es independiente del gas.

$$PV = nRT$$

P_0 presión del gas en el punto de ref.
ej. pto. Triple del agua $T_0 = 273.16$ K

En el medio a medir a temperatura (T), acomodamos rama flexible para ajustar el V de manera que se mantenga constante, medimos la presión (P) en el manómetro

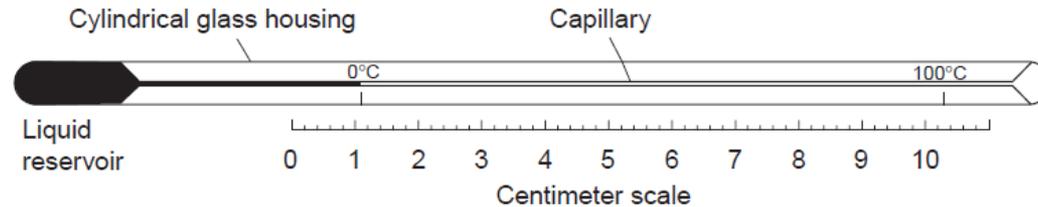
$$T = 273,16 \frac{P}{P_0}$$

La exactitud depende de los cuidados adoptados y el rango de T (0.5 mK e/ 0.5 y 30 K). Método caro, lento, requiere mucho cuidado experimental, se usa para calibraciones.

TERMOMETRIA-EXPANSION TERMICA

de sólidos, líquidos o gases
INVASIVAS

TERMOMETRO DE LIQUIDO EN VIDRIO



$$\alpha_V = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \approx \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta T}$$

$$\alpha = \frac{1}{AL} \frac{AdL}{dT} \approx \frac{1}{L} \frac{\Delta L}{\Delta T}$$

$$T = T_0 + \frac{(L - L_0)}{\alpha L_0}$$



Supuesto

A_0 constante
a lo largo del tubo

Mercurio: $\alpha = 1.8 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$

-39 °C (punto de congelación del mercurio) a 357 °C (punto de ebullición)

Alcohol coloreado: $\alpha = 1.01 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$

-112 °C (punto de congelación del alcohol) a 78 °C (punto de ebullición)

Ventajas: portátiles y permiten una lectura directa.

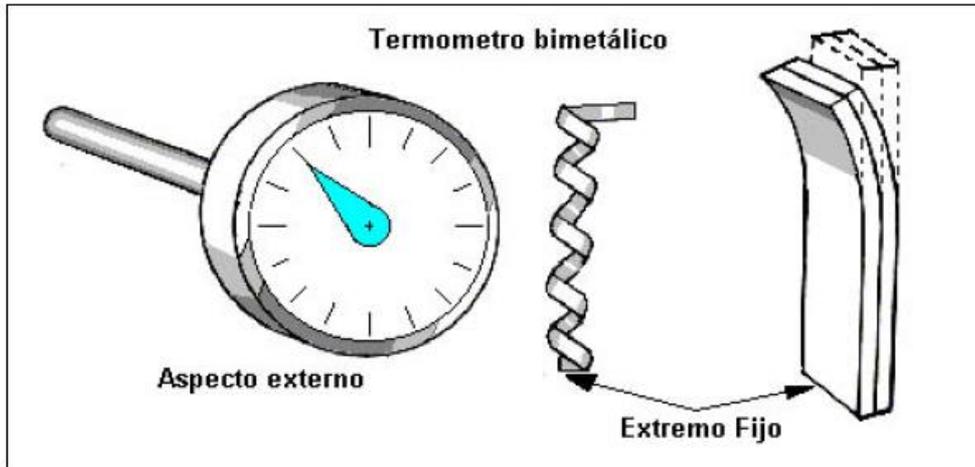
Desventaja: No son muy precisos.

TERMOMETRIA-EXPANSION TERMICA

de sólidos, líquidos o gases

INVASIVAS

TERMOMETRO BIMETALICO



cinta de dos metales de coeficientes de dilatación térmica muy diferente, soldados cara con cara en toda su longitud.

$$T = T_0 + \frac{(L_{M1}-L_0)}{\alpha_{M1}L_0} = T_0 + \frac{(L_{M2}-L_0)}{\alpha_{M2}L_0}$$

$$L_{M1} > L_{M2}$$

Forma en espiral da mas sensibilidad

Indicador unido al extremo libre se mueve sobre una escala graduada en temperaturas.

Se usan en termostatos, o sistemas de control

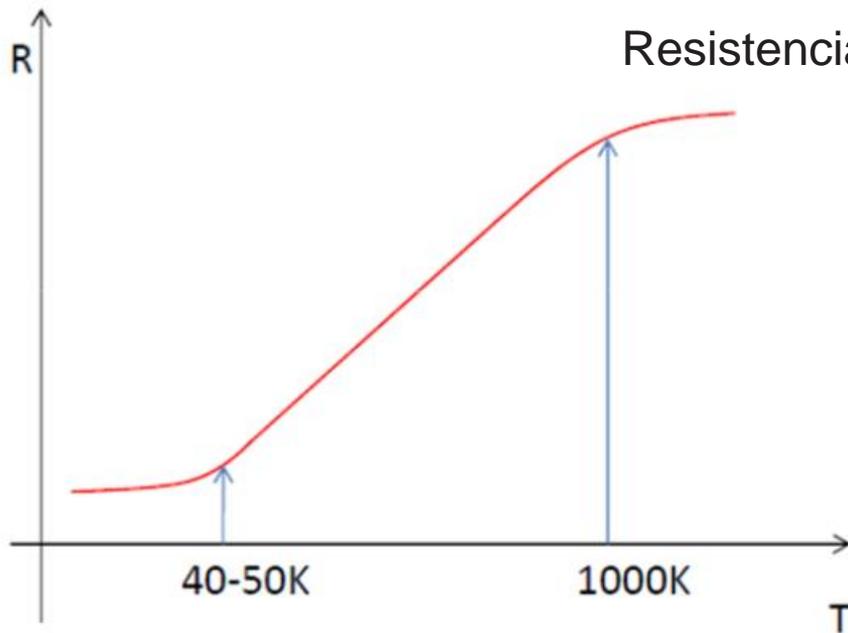
Las combinaciones mas usuales son

Par Bimetalico	Temperatura máxima de utilización
Aluminio - Invar	250°C
Níquel - Cuarzo	600°C
Bronce - Invar	600°C
Níquel Cromo - Porcelana	1000°C

TERMOMETRIA-RESISTENCIA ELECTRICA

INVASIVAS

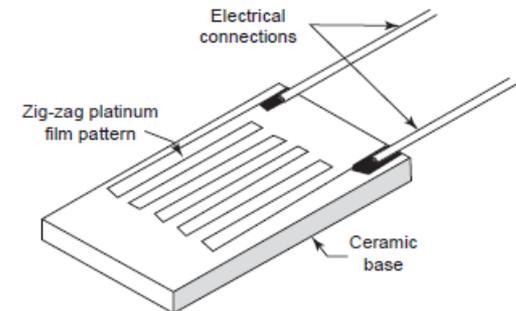
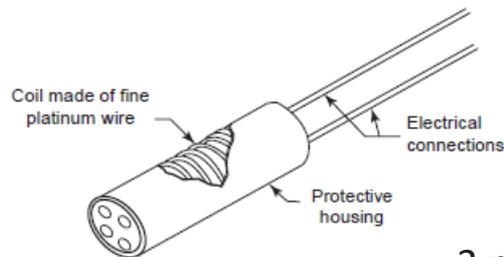
TERMOMETRO RTD de Pt (Pt100 Resistance Temperature Detector)



$$\rho = \rho_0(1 + \alpha T)$$

TABLE III. Values of resistivity (at 293 K) and temperature coefficient of resistance for a variety of materials (Ref. 55).

Material	Resistivity ($\Omega \text{ m}$)	Temperature coefficient of resistance (K^{-1})
Copper	1.7×10^{-8}	3.9×10^{-3}
Silver	1.6×10^{-8}	4.0×10^{-3}
Nickel	59×10^{-8}	6.0×10^{-3}
Platinum	11×10^{-8}	3.85×10^{-3}
Gold	2.4×10^{-8}	3.4×10^{-3}



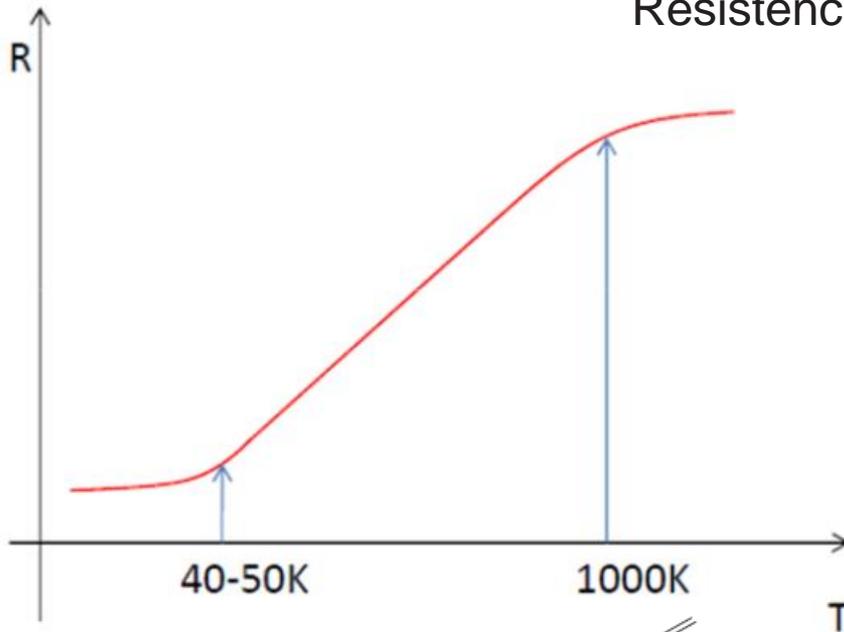
TERMOMETRIA-RESISTENCIA ELECTRICA

INVASIVAS

TERMOMETRO RTD de Pt (Pt100 Resistance Temperature Detector)

Resistencia $R=R(T)$

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha T)$$



0,385Ω/°C
Standard Europeo

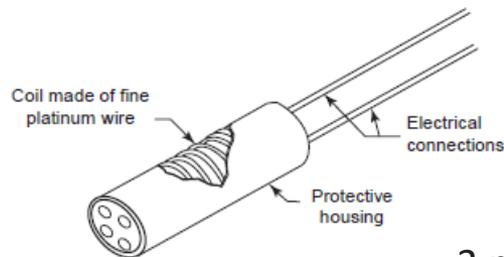
0,392Ω/°C
Standard Americano

Platino-facil obtenerlo puro
no se oxida facilmente,
T fusion 1772°C.

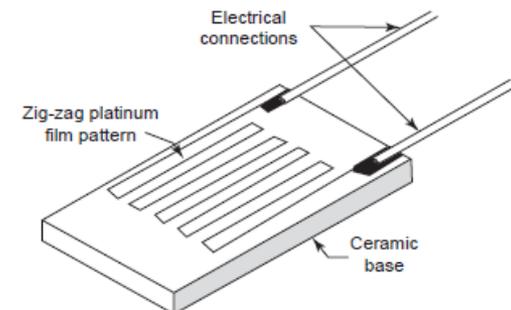
facil de calibrar y reproducible

Se usan en el ITS-90 en amplio rango ((lineal polinomio)

Tipicamente R=100 ohms a 0°C (Pt100)



3 mm



2x2x0.5 mm

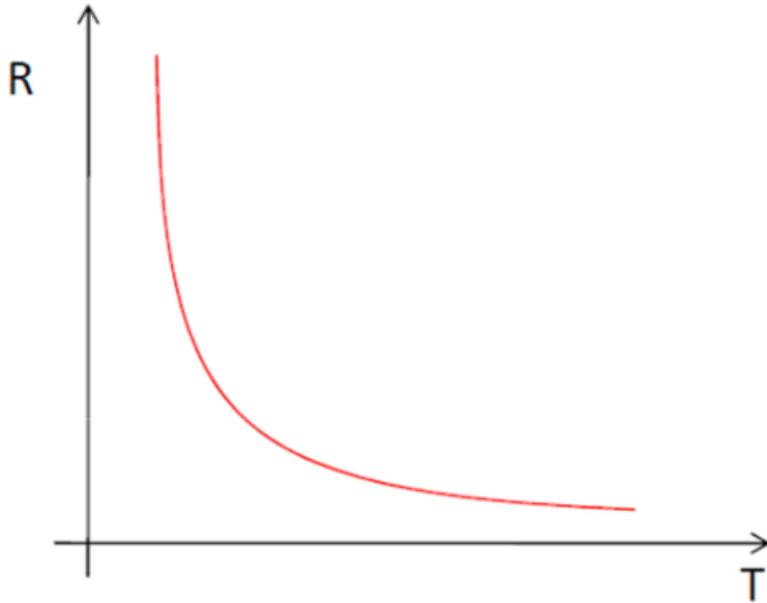
TERMOMETRIA-RESISTENCIA ELECTRICA

INVASIVAS

TERMISTORES (semiconductores)

Resistencia $R=R(T)$

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

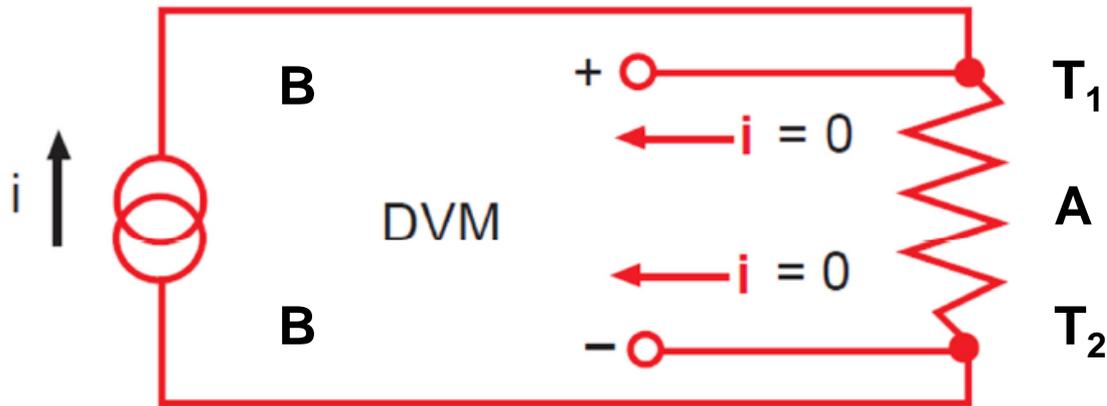
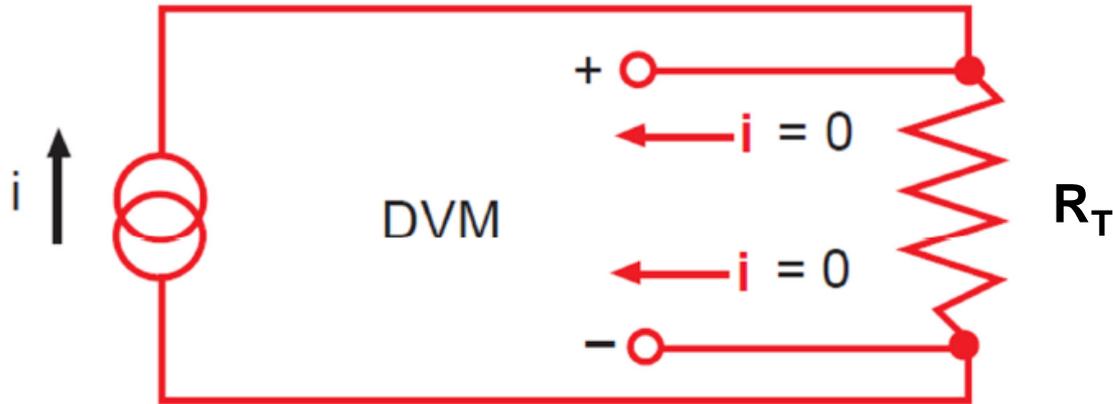


Suelen ser muy baratos (Oxidos de Ni, Mn, Cu, Ti)
Discos de 0.05mm
Respuesta rapida
Exactitud bastante buena (+/-0.01 a 1 °C)
No lineales, funcionan mejor a baja T (-100-150°C).
R (25°C) 470 Ω - 100 k Ω.

TERMOMETRIA-RESISTENCIA ELECTRICA

Medición de resistencias a 4 puntas?

RTD y Termistores



El paso de corriente puede generar calentamiento por efecto Joule que afecte la medición (especialmente a baja T)

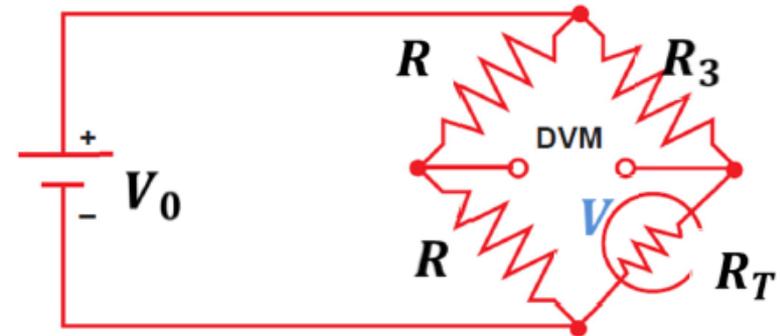
TERMOMETRIA-RESISTENCIA ELECTRICA

RTD y Termistores

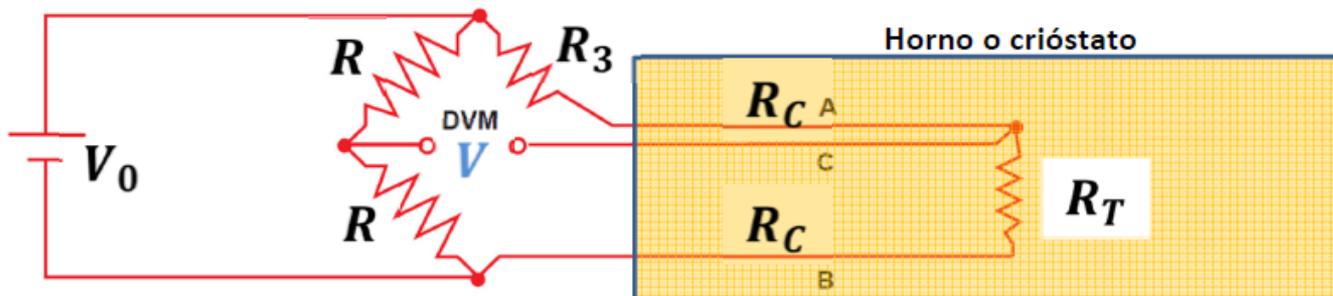
Se suele usar puentes de wheastone para medir resistencias a bajas temperaturas

- Evita la alta disipación (Joule) en el termómetro por la baja corriente con que es posible medir en esta configuración.

$$V = \frac{V_o (R_3 - R_T)}{2 (R_T + R_3)}$$



WHEATSTONE BRIDGE

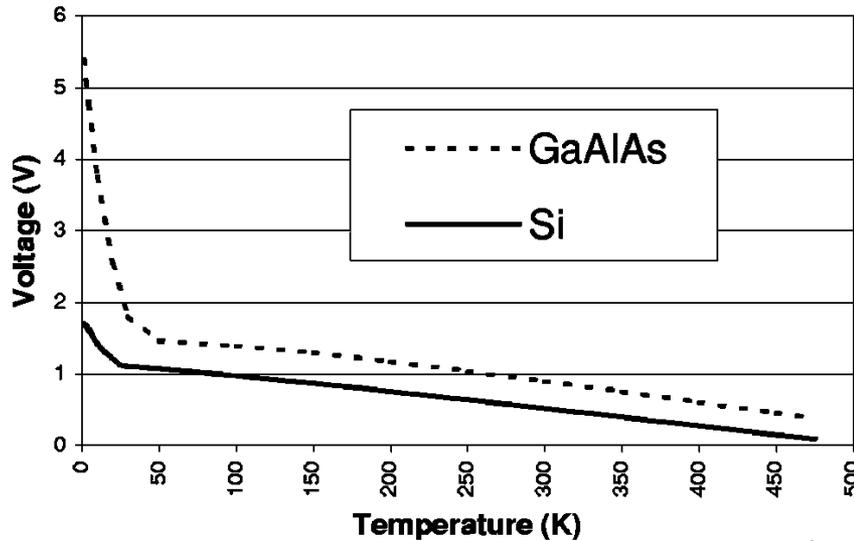


3-WIRE BRIDGE

$$V = \frac{V_o (R_3 + R_C - (R_T + R_C))}{2 (R_T + 2R_C + R_3)}$$

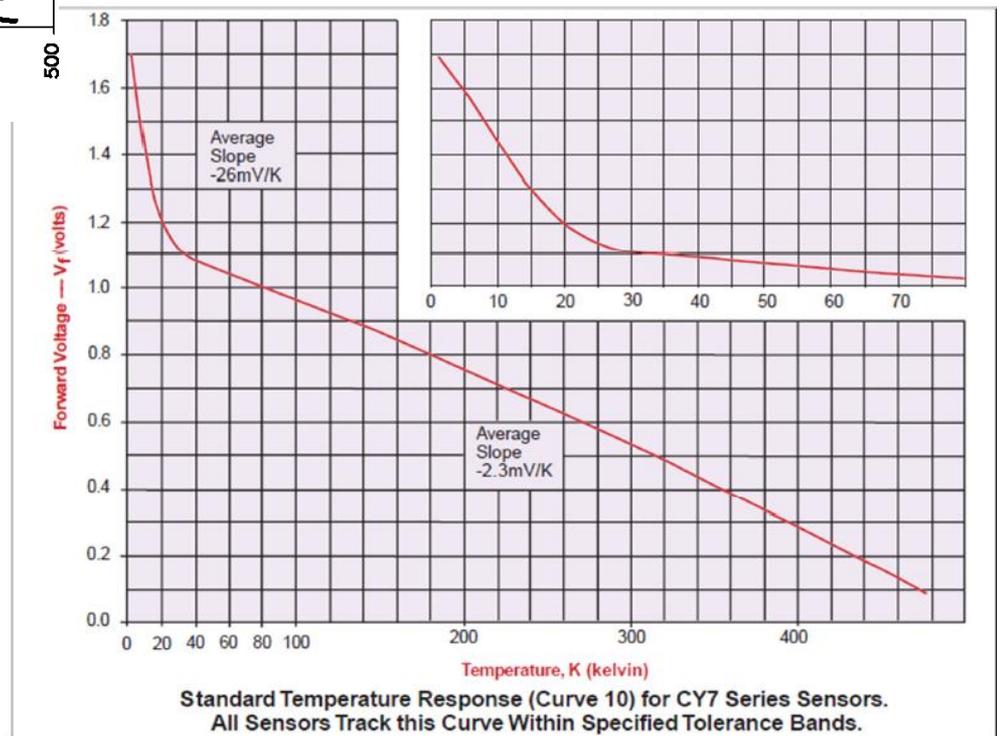
- El método de tres puntas evita errores sistemáticos por gradientes de temperatura en los cables.

Diodos (caída de voltaje en la juntura a p-n puede ser lineal)



En este caso la corriente, típicamente de microamperes debe ser muy estable.

- Estables en amplio rango de T (bajas T)
- Baratos
- Relación simple V-T
- NO necesita referencia
- Alta sensibilidad y exactitud ($\pm 50\text{mK}$)
- Se puede medir con DVM



TERMOMETRIA-Poder termoeléctrico: Termocuplas

INVASIVAS

Barra o alambre metálico



T_2

T_1

Efecto Seebeck

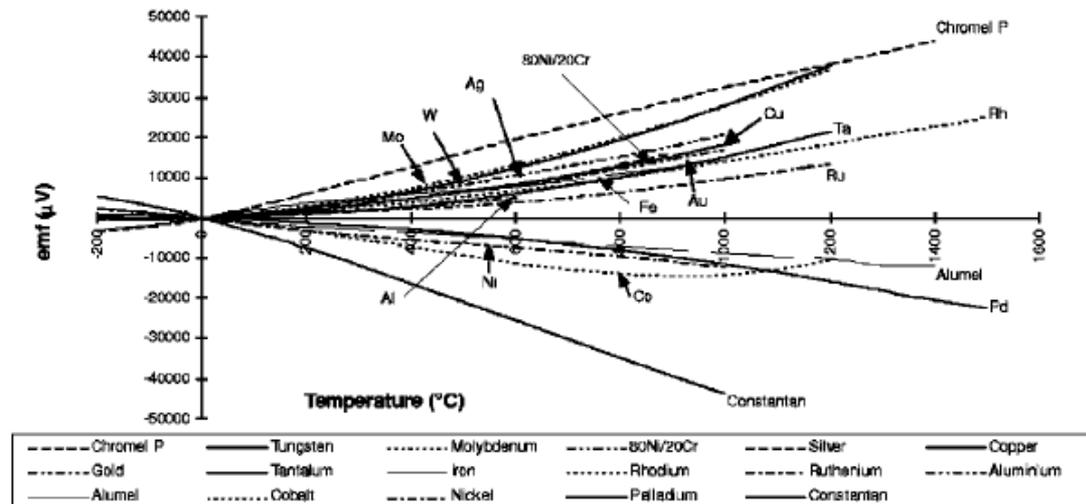
$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} + L_{ET} \vec{\nabla} T$$

$$\vec{E} = -\frac{L_{ET}}{\sigma} \vec{\nabla} T = -S \cdot \vec{\nabla} T$$

$$V = -\int_1^2 E \cdot dx = \int_1^2 S \cdot \frac{dT}{dx} \cdot dx = \int_{T_1}^{T_2} S \cdot dT$$

Coeficiente Seebeck = S

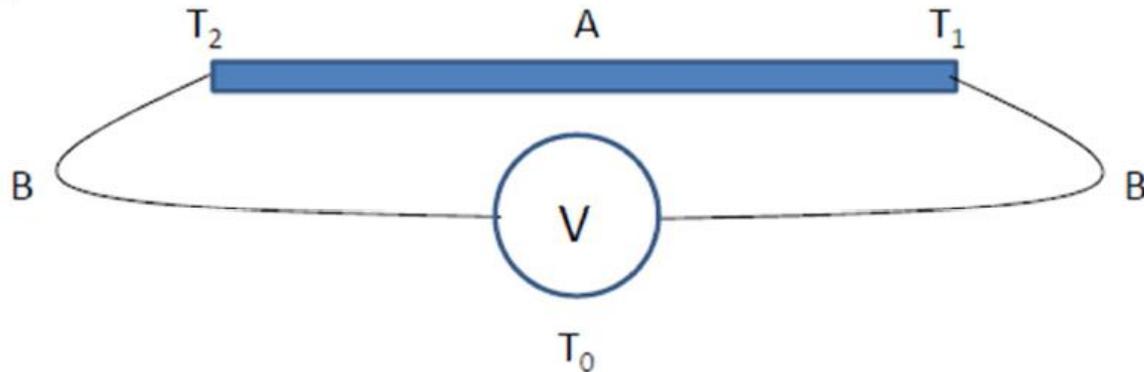
Poder termoeléctrico (FEM o V) vs T evaluados para diferentes materiales vs una referencia de Pt a 0 °C



Se pueden encontrar rangos amplios de T donde $S \sim cte$

TERMOMETRIA-Poder termoeléctrico: Termocuplas

Termocuplas



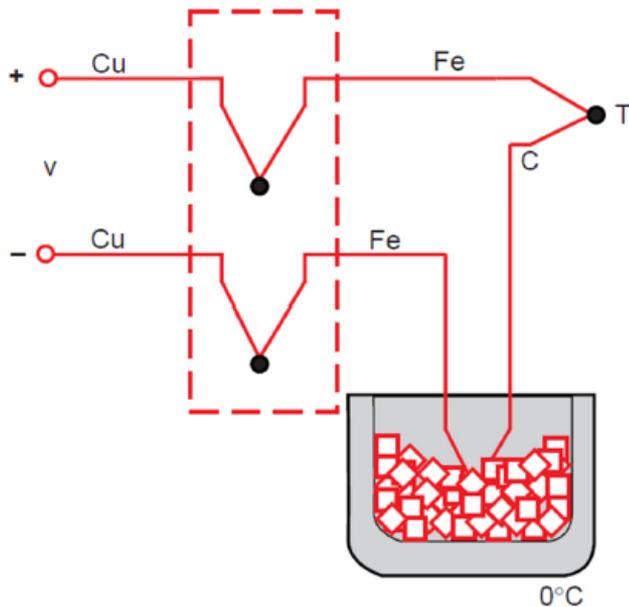
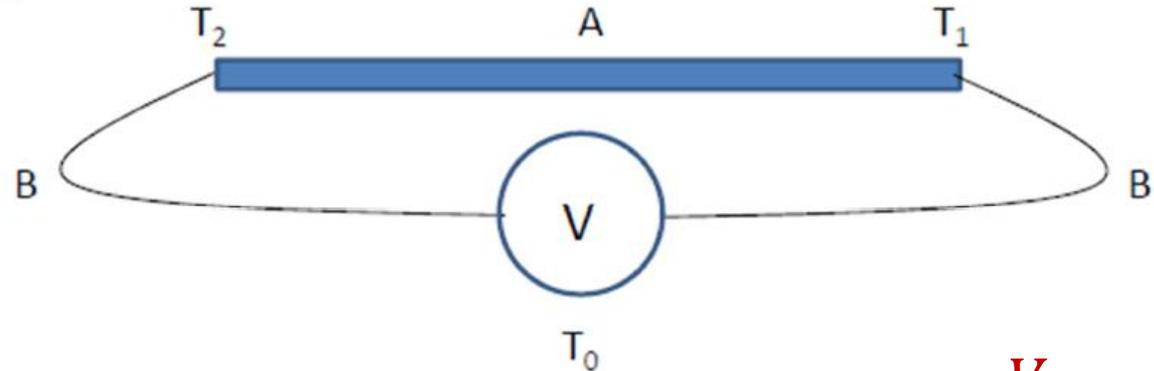
$$V = \int_{T_0}^{T_1} S_B \cdot dT + \int_{T_1}^{T_2} S_A \cdot dT + \int_{T_2}^{T_0} S_B \cdot dT = \int_{T_2}^{T_1} S_B \cdot dT + \int_{T_1}^{T_2} S_A \cdot dT$$

$$V = \int_{T_1}^{T_2} (S_A - S_B) \cdot dT = \Delta S \cdot (T_2 - T_1)$$

$$T = T_0 + \frac{V}{S_A - S_B}$$

TERMOMETRIA-Poder termoeléctrico: Termocuplas

Termocuplas

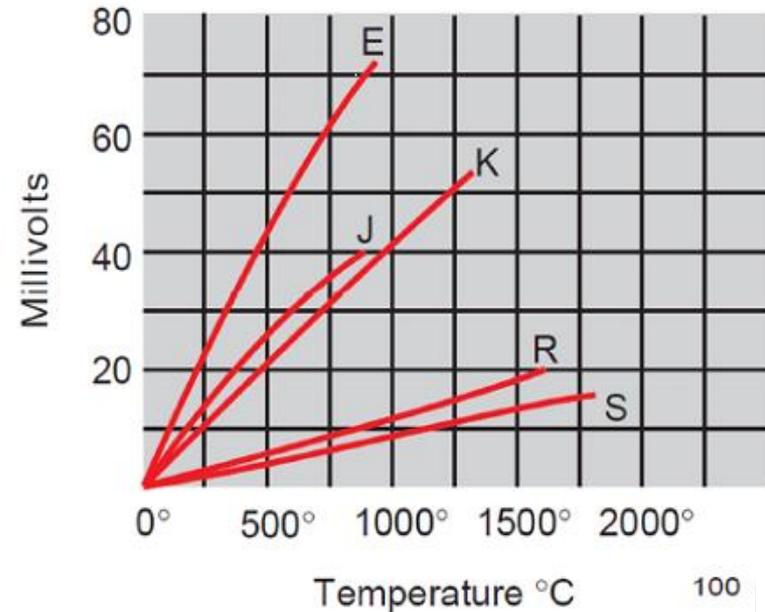
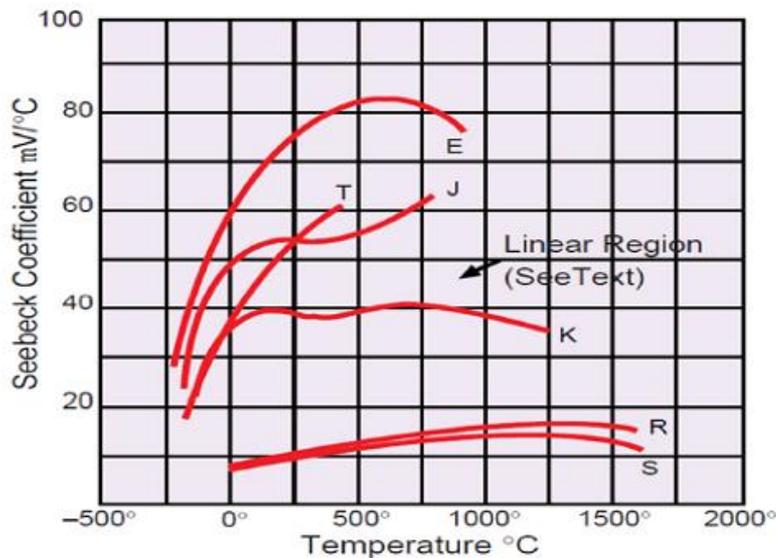


$$T = T_0 + \frac{V}{S_A - S_B}$$

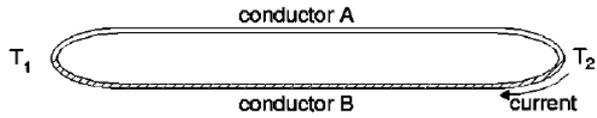
Amplio rango de trabajo -270 y 3000 °C.
Bajo costo, simples, robustas, pequeñas.
Son bastante sensibles y responden rápido
Son menos exactas que los RTD
Requieren un punto de referencia o Juntura fria

TERMOMETRIA-Poder termoeléctrico: Termocuplas

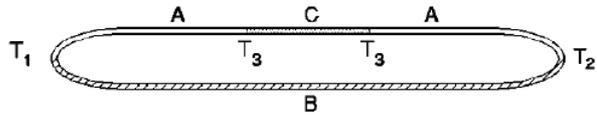
Tipo	Rango T (°C)	(+)	(-)
T	-250→350	Cobre	Constantan (Cu-Ni)
J	-150→550	Hierro	Constantan (Cu-Ni)
E	-250→800	Cromel (Ni-Cr)	Constantan (Cu-Ni)
K	-250→1100	Cromel (Ni-Cr)	Alumen (Ni-Al)
B	100→1800	Platino-30%Rh	Platino-6%Rh
S	0→1500	Platino	Platino-10%Rh
R	0→1600	Platino	Platino-13%Rh



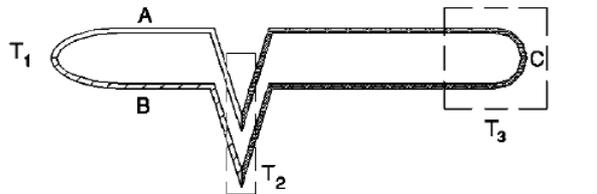
TERMOMETRIA-Poder termoeléctrico: Termocuplas



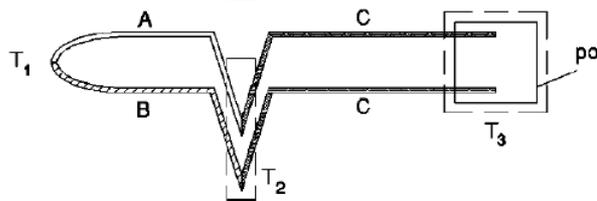
Circuito con metales A y B a $T_2 > T_1 \rightarrow V$



Agregamos metal C a $T_3 \rightarrow$ No modifica V

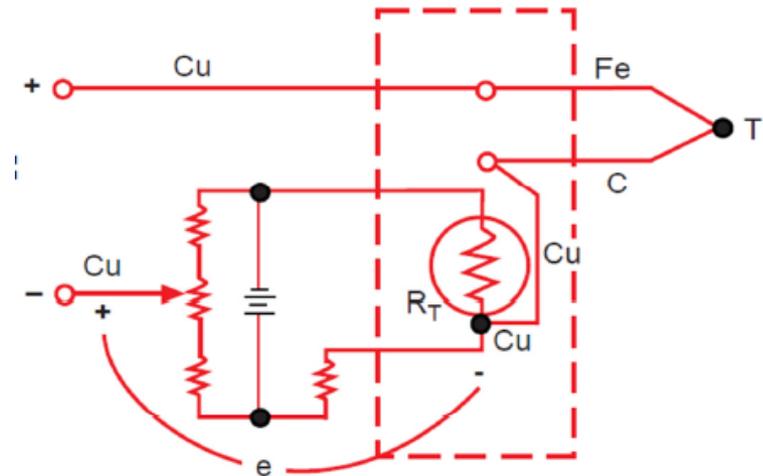
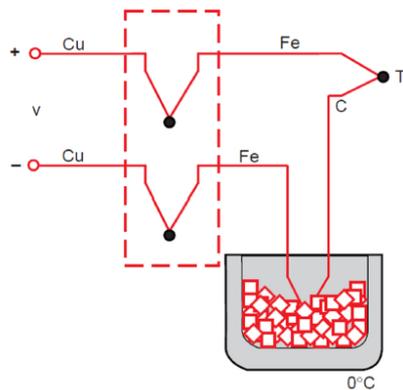


Modificamos la configuración \rightarrow en la zona enmarcada el metal C a T_3 modifica V



Introducimos equipo de medición (ej.DVM) \rightarrow no modifica V

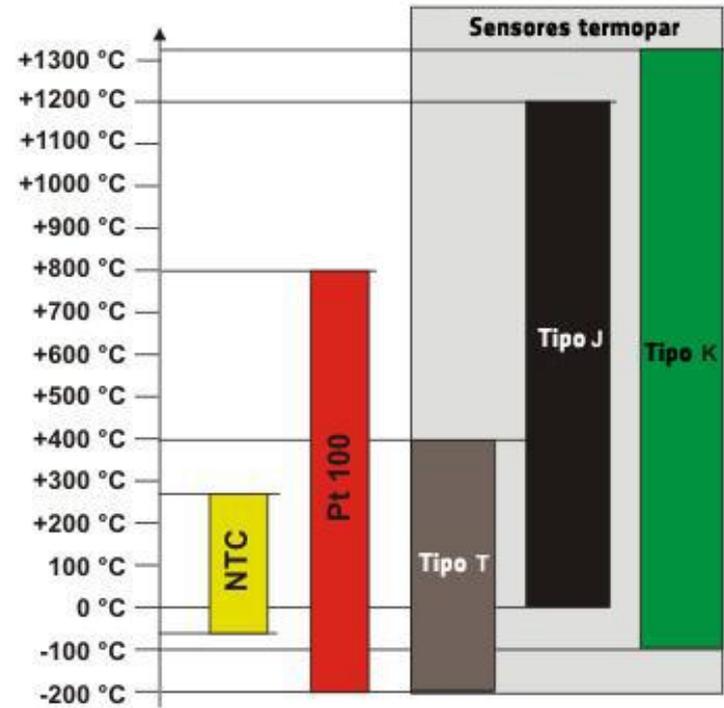
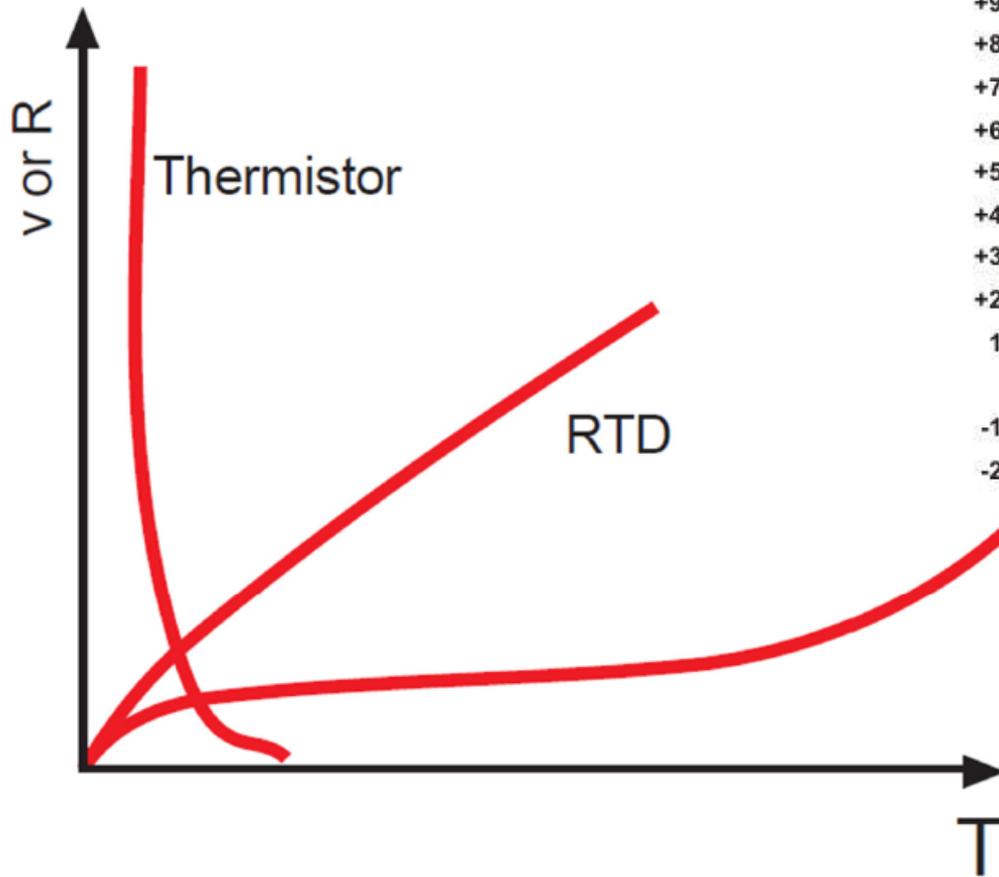
T_2 es la temperatura de referencia, o juntura fría 0°C
Se puede reemplazar con un cero electrónico (RT calibrada)



cero electrónico

TERMOMETRIA: RTD-Termistores-Termocuplas

INVASIVAS



Thermocouple

TERMOMETRIA-Termómetros de Radiación

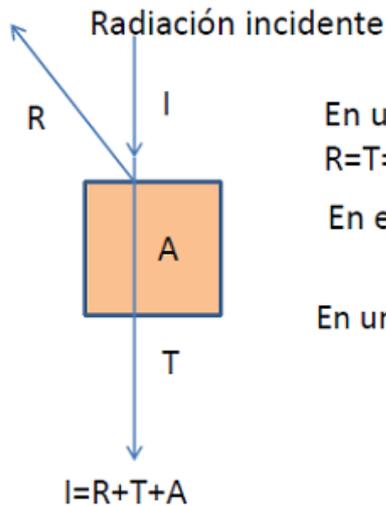
Termómetros infrarrojos

NO INVASIVAS

Monitorea radiación térmica en el espectro infrarrojo 50 a 6000 K.

Sistema: Fuente (o target a medir) + ambiente (medio transmite energía ej. gas)+Dispositivo(Sistema óptico+ detector+ Sistema control y análisis)

Se basan en la medición de la energía radiada por un cuerpo negro

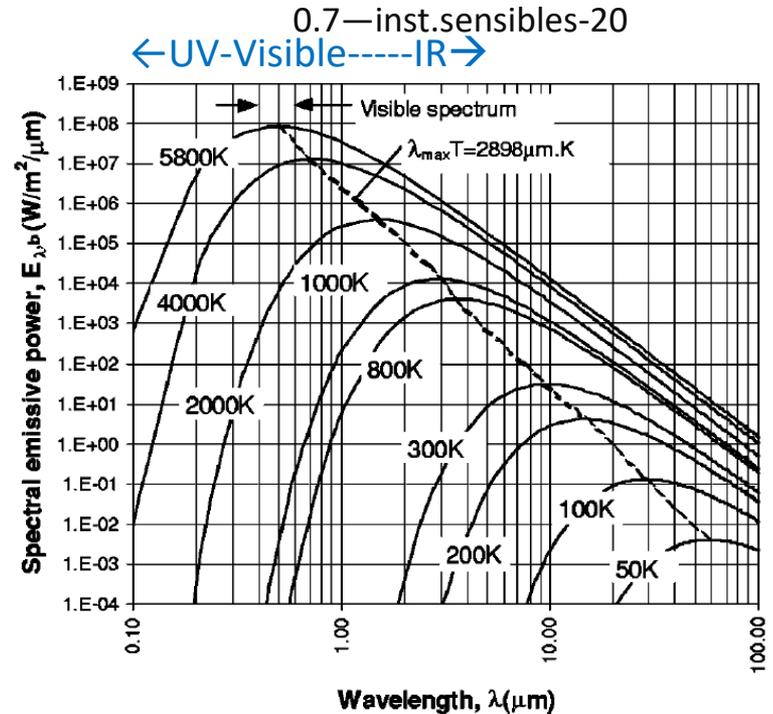


En un cuerpo negro
 $R=T=0$

En equilibrio $A = E$

En un cuerpo negro $E=1$

Toda la materia emite.



Distribución de Plank: Variación de intensidad radiada con la long. de onda para cuerpo negro.

$$E_{\lambda,b} = \frac{2 \pi h c^2}{\lambda^5 [\exp(hc/\lambda kT) - 1]} \text{ (W/m}^3\text{)}.$$

TERMOMETRIA-Termómetros de Radiación

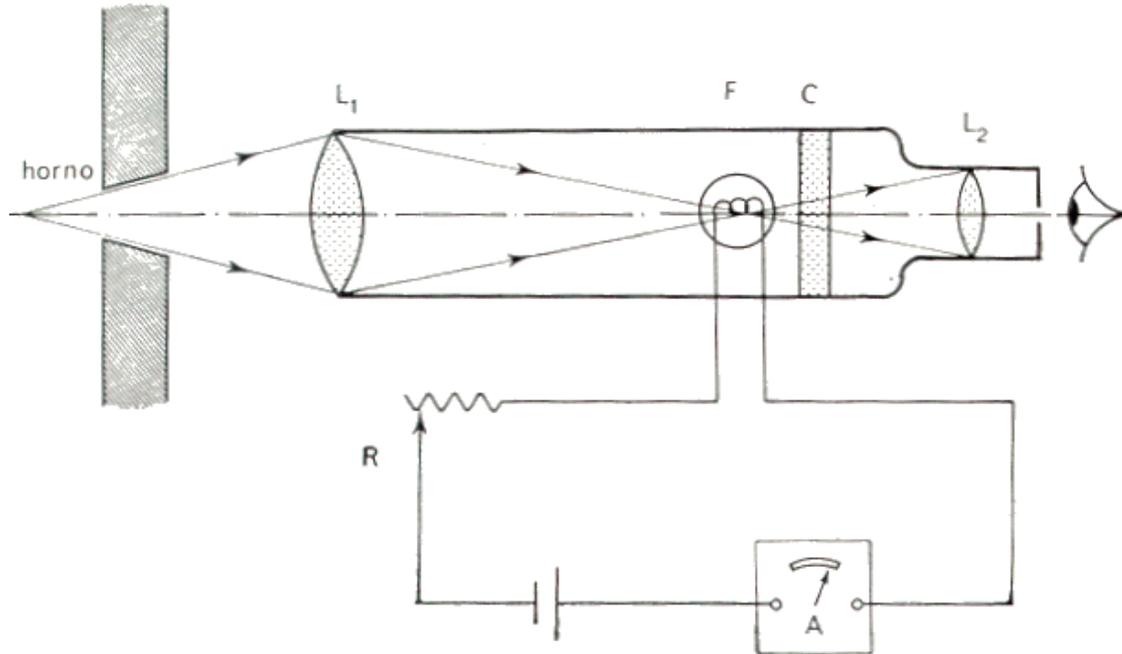
La fracción de emisión del cuerpo negro en una banda espectro entre λ_1 y λ_2 .

$$\frac{\int_0^{\lambda_2} E_{\lambda,b} d\lambda - \int_0^{\lambda_1} E_{\lambda,b} d\lambda}{\sigma T^4}$$

Con esta información se selecciona el detector apropiado:

- pirómetros ópticos (filamento)
- detectores térmicos
- detectores cuánticos y de fotones

Pirómetros



Filamento Tungsteno (W) calentado electricamente y ubicado en plano focal entre el objetivo y el ojo. Se ajusta la corrinete para igualar filamento al target

Filtro rojo: monocromático evita efecto por dif. de color.
+/- 1°C a 775 °C o +/- 5 °C at 1225 °C.

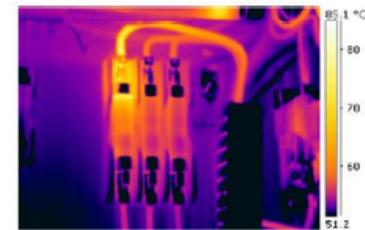
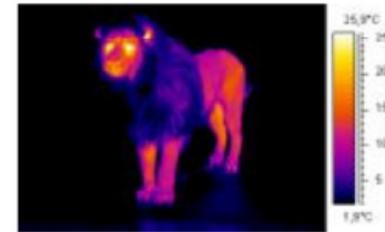
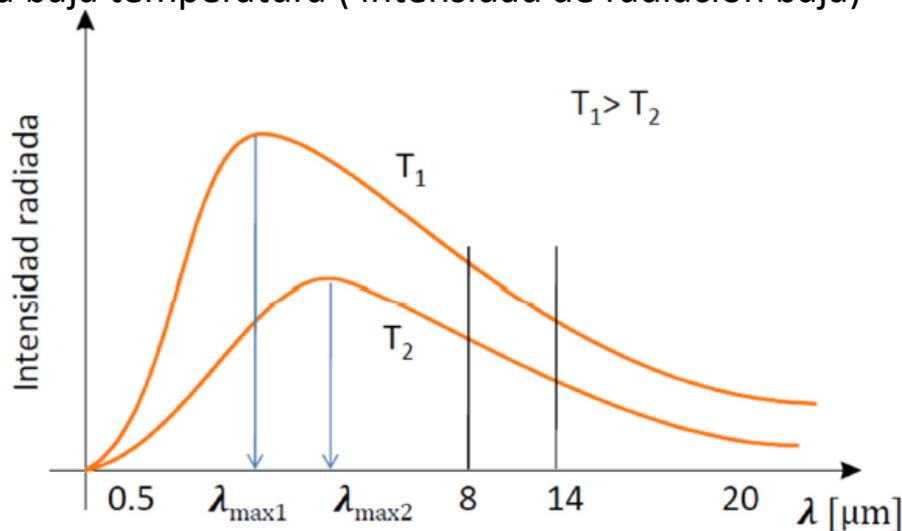
TERMOMETRIA-Termómetros de Radiación

Con esta información se selecciona el detector apropiado:

- pirómetros ópticos (filamento)
- detectores térmicos
- detectores cuánticos y de fotones

Detectores Térmicos:

Convierten radiación electromagnética → energía térmica → Propiedad sensible a calor (R, V , etc)
Son útiles a baja temperatura (intensidad de radiación baja)



Detectores cuánticos, de fotones o fotoeléctricos:

Miden directamente la excitación de e- a la banda de conducción producida por fotones incidentes (fotoemisión, fotoconducción, fotovoltaico).

Muy sensibles, amplio rango y rápida respuesta.

Temperatura mas
baja obtenida
artificialmente
Ordenamiento de
momentos
nucleares

