

# SENSORES DE TEMPERATURA

## Referencias bibliográficas

Transducers for Biomedical Measurements: Principles and Applications,  
R.S.C. Cobbold, Ed. John Wiley & Sons

Sensores y acondicionamiento de señal, R. Pallás Areny, Ed. Marcombo

# SENSORES DE TEMPERATURA

## Aplicaciones

Temperatura corporal

Neumografías (ritmo de respiración por diferencia de  $T^a$  entre aire frío inspirado y caliente expirado)

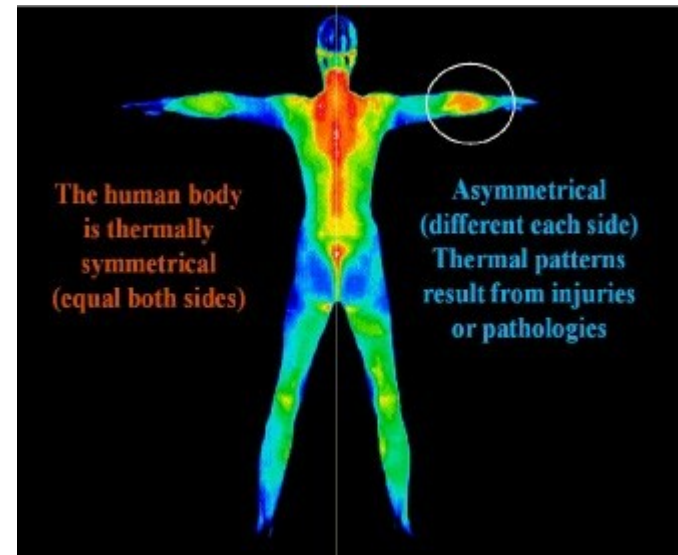
Termografías (imagen de la temperatura en diferentes regiones del cuerpo)

Incubadoras

Climatización

Conservación criogénica

Control experimental

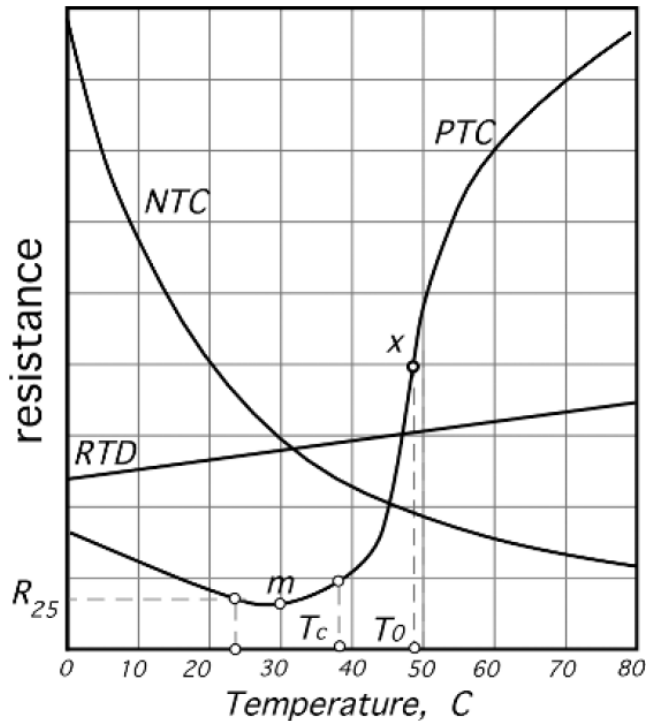


# SENSORES DE TEMPERATURA

<b>Efecto físico</b>	<b>Ejemplo</b>
<i>Expansión térmica</i>	Termómetro de mercurio, tira bimetálica
<i>Termoquímico</i>	Cristales líquidos, transición sólido-líquido
<i>Termorresistivo</i>	Termómetro de platino, termistor
<i>Termocapacitivo</i>	Termómetro de cuarzo
<i>Uniones p-n</i>	Termómetro de circuitos integrados
<i>Termoeléctrico</i>	Termopar, termopila
<i>Radiación</i>	Detectores fotovoltaicos y fotoconductores, termopila, termistor
<i>Piroeléctrico</i>	Detectores de titanato-zirconato

# SENSORES TERMORRESISTIVOS

## Dependencia de la resistencia con la temperatura



Coeficiente de temperatura  $\alpha = \frac{1}{R_T} \frac{dR_T}{dT}$

### RTD: Resistive Temperature Detectors

metálicos: comportamiento lineal ( $\alpha \sim 0,004/^\circ\text{C}$ )

### Silistores

silicio dopado  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  ( $\alpha \sim 0,007/^\circ\text{C}$ )

### NTC: Negative Temperature Coefficient

óxidos metálicos semiconductores: no lineal ( $\alpha \sim -0,05/^\circ\text{C}$ )

### PTC: Positive Temperature Coefficient

titanato de bario y estrónicio: brusca conmutación ( $\alpha \sim 0,1/^\circ\text{C}$ )

### \* Autocalentamiento:

$$I^2 R_T = \delta \Delta T$$

I: intensidad de corriente

$R_T$ : resistencia eléctrica

$\delta$ : coeficiente de disipación térmica

$\Delta T$ : autocalentamiento

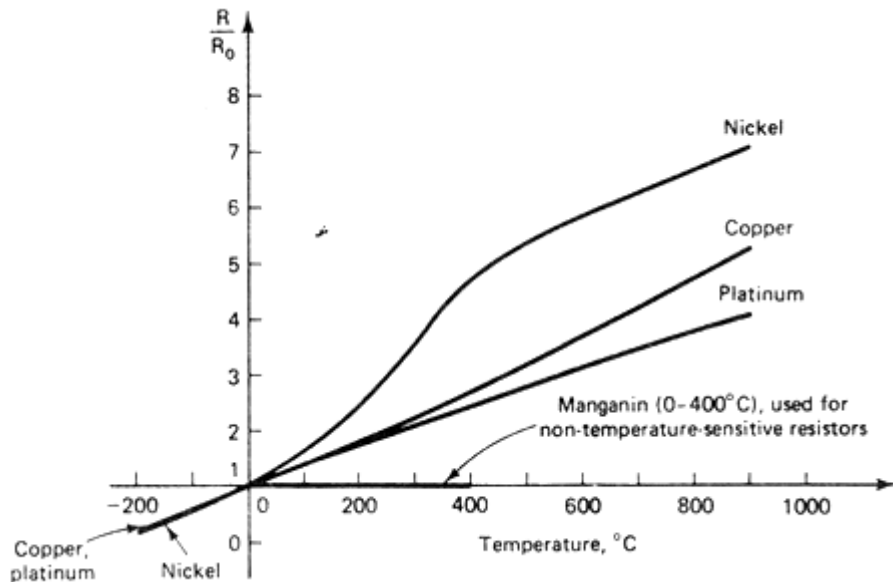
# SENSORES TERMORRESISTIVOS

## Fundamento físico:

Cambio en la resistencia eléctrica de ciertos metales y semiconductores

$$R_T = R_0 [ 1 + \alpha ( T - T_0 ) ]$$

$R_0$ : resistencia a la  $T^a T_0$   
 $\alpha$ : coeficiente de  $T^a$  de  $R$  a  $T_0$



**SPRT** (Standard Platinum Resistance Thermometer)

Callendar-Van Dusen Equation  
(-183 ~ 630 $^{\circ}\text{C}$ )

$$R_T = R_0 \alpha [ T - \delta (0.01T - 1)(0.01T) - \beta (0.01T - 1)(0.01T)^3 ]$$

$$\alpha = 0.00392 \text{ } ^{\circ}$$

$$\delta = 1.49$$

$$\beta = 0(T \geq 0), 0.11(T < 0)$$

$$R_0 = 100\Omega$$

# SENSORES TERMORRESISTIVOS

## TERMISTORES

Característica básica

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

$R_0$ : R a  $T_0$  (298,15K)

$\beta$  : Temperatura caracterísitca

(1500 ~ 6000K, generalmente 4000 K)

$R_T$  en el rango de pocos  $\Omega$  ~ 10M $\Omega$

Ecuación de Steinhart-Hart

$$\frac{1}{T} = A + B \ln R + C(\ln R)^3$$

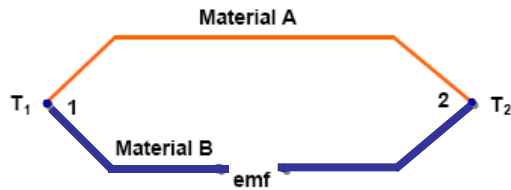
donde A,B,C se determinan conociendo tres valores de R y T.

Accuracy < 0.01°C

# SENSORES TERMOELÉCTRICOS

## Fundamento físico:

*Efecto Seebeck* Diferencia de potencial creada cuando existe una diferencia de temperatura entre las uniones de dos materiales distintos



## Termopar

$$V = \alpha ( T_1 - T_2 ) + \gamma ( T_1^2 - T_2^2 )$$

V: diferencia de potencial

(depende de la diferencia y valor absoluto de  $T_1$  y  $T_2$ )

$\alpha$  y  $\gamma$  : constantes para cada par de materiales A, B

$T_1$  y  $T_2$ : temperatura de las uniones

$$S = dV/dT_1 = \alpha + 2 \gamma T_1 \sim \alpha$$

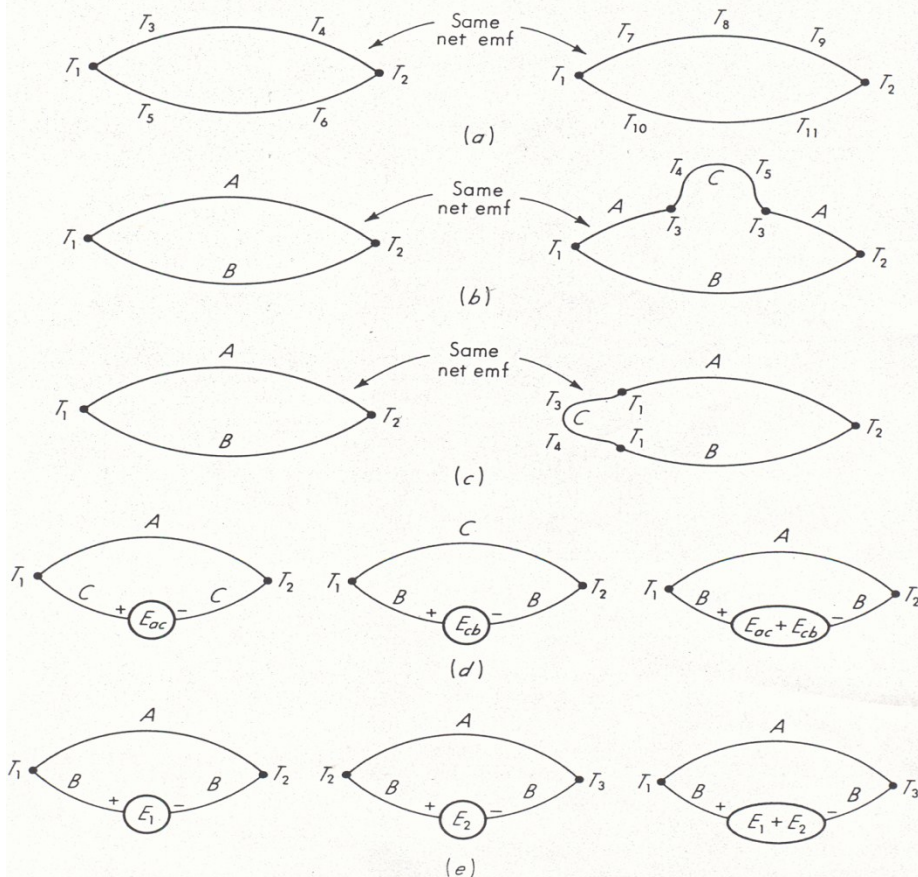
S : coeficiente Seebeck

La relación V- $T_1$  normalmente se expresa en forma tabular para  $T_2 = 0^\circ\text{C}$

*Efecto Peltier* Al pasar una corriente por dos metales distintos se absorbe o libera calor dependiendo de la dirección de la corriente

# SENSORES TERMOELÉCTRICOS

## Leyes de los termopares



### LEY DE LOS CIRCUITOS HOMOGÉNEOS:

La fem de un termopar con uniones a  $T_1$  y  $T_2$  no se modifica por la temperatura en cualquier otro punto del circuito si los dos metales (A y B) usados son homogéneos (Fig a).

### LEY DE LOS METALES INTERMEDIOS:

Si un tercer metal homogéneo, C, se inserta en uno de los brazos del circuito (Fig b) o en una de las uniones entre A y B (Fig. c), la fem neta no se modifica si las uniones con C (AC y CA o AC y CB) se mantienen a la misma temperatura, independientemente de la temperatura en otros puntos de C

Si la fem entre los metales A y C es  $E_{AC}$ , y entre los metales C y B es  $E_{CB}$ , la fem entre los metales A y B es  $E_{AC} + E_{CB}$  (Fig d). (Basta tener las fem calibradas respecto a un metal común para conocer la de cualquier par de materiales. El Pt se usa como metal de referencia)

### LEY DE LAS TEMPERATURAS SUCESSIVAS O INTERMEDIAS

Si un termopar produce una fem  $E_1$  cuando las uniones están a  $T_1$  y  $T_2$ , y  $E_2$  con las uniones a  $T_2$  y  $T_3$ , producirá una fem  $E_1 + E_2$  cuando las uniones están a  $T_1$  y  $T_3$  (Fig e). (Basta con conocer la fem respecto a una temperatura de referencia, para conocerla en cualquier otro rango. Se usa  $0^\circ\text{C}$  como temperatura de referencia)

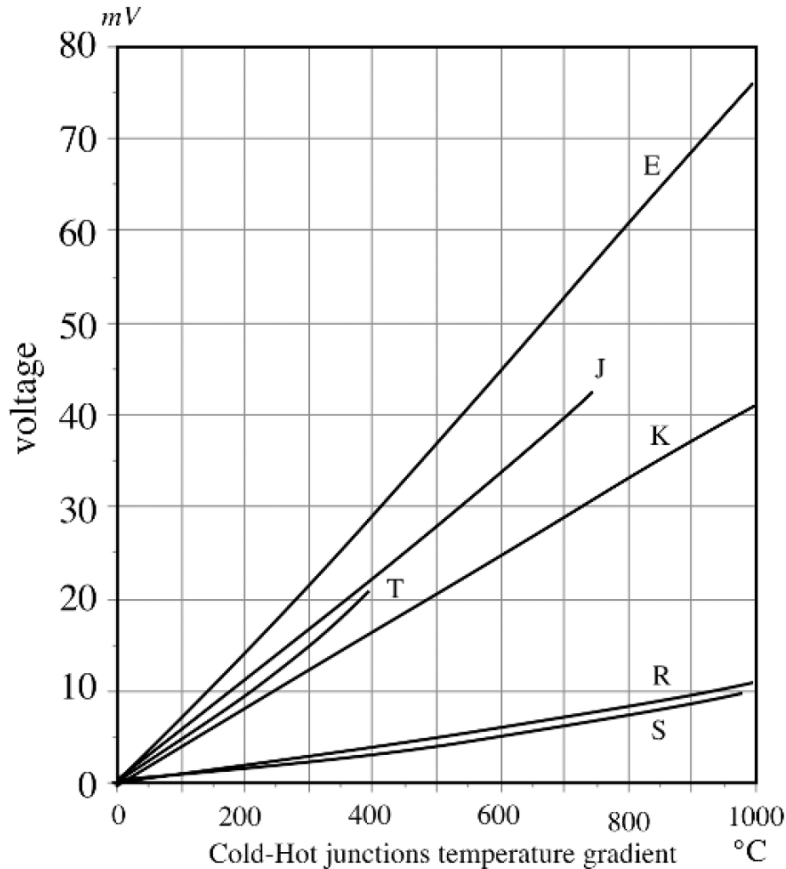
From: Doebelin, E. O., "Measurement Systems: Application and Design," Third Edition, p 590-591, McGraw-Hill, New York, 1983

Temperatures =  $T_i$ , Materials = A,B,C, Voltages =  $E_i$



# SENSORES TERMOELÉCTRICOS

## Termopares



Characteristics of Thermocouple Types

Junction Materials	Sensitivity (at 25°C) ( $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ )	Temperature Range ( $^\circ\text{C}$ )	Applications	Designation
Copper/constantan	40.9	-270 to 600	Oxidation, reducing, inert, vacuum; preferred below 0°C; moisture resistant	T
Iron/constantan	51.7	-270 to 1000	Reducing and inert atmosphere; avoid oxidation and moisture	J
Chromel/alumel	40.6	-270 to 1300	Oxidation and inert atmospheres	K
Chromel/constantan	60.9	-200 to 1000	Oxidation and inert atmospheres; avoid reducing atmosphere and metallic vapors	E
Pt (10%)/Rh-Pt	6.0	0 to 1550		S
Pt (13%)/Rh-Pt	6.0	0 to 1600	Oxidation and inert atmospheres; avoid reducing atmosphere and metallic vapors	R
Silver-Paladium	10.0	200 to 600	Used in thermopiles and micromachined sensors	
Constantan-tungsten	42.1	0 to 800		
Silicon-aluminum	446	-40 to 150		

**\* Temperatura de referencia constante o compensación de las variaciones de la temperatura de referencia con otro elemento sensor**

# TERMÓMETROS DE DIODO DE UNIÓN P-N

## Fundamento físico:

La tensión entre los terminales de un diodo alimentado con corriente constante varía linealmente con la temperatura.

## Corriente directa

$$I = I_s \exp ( qV / 2k_B T )$$

$I$ : corriente que circula por el diodo

$I_s$ : corriente de saturación  $I_s = k \cdot \exp (-E_g / 2k_B T)$

$E_g$ : energía del gap del semiconductor

$k_B$ : cte de Boltzmann

$V$ : tensión entre los extremos del diodo

## Voltaje vs. Temperatura

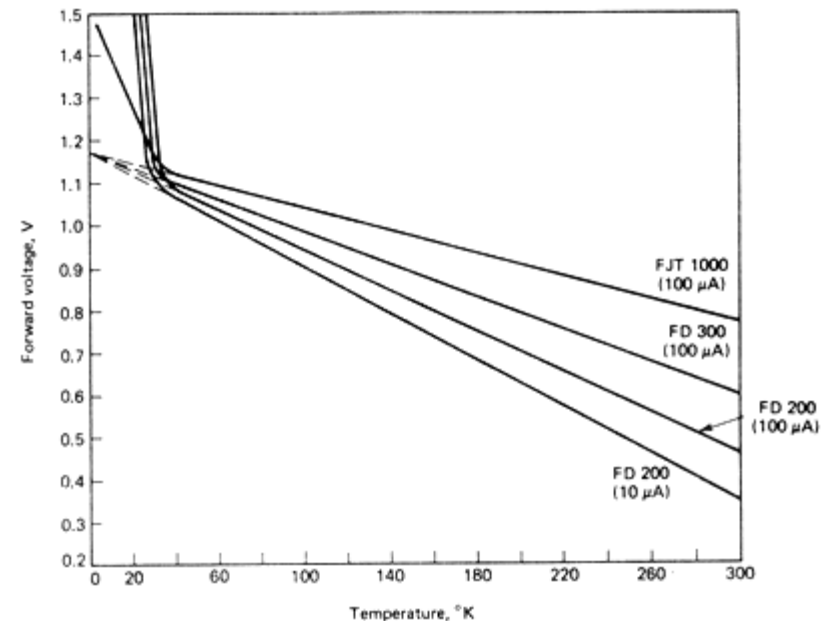
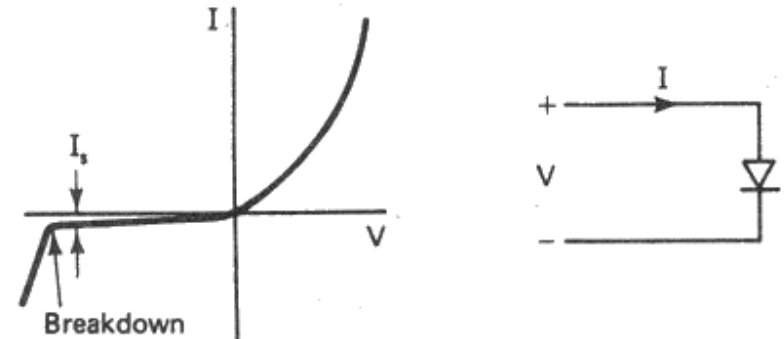
$$V = E_g / q - 2k_B T / q (\ln k - \ln I)$$

$$dV / dT = - 2k_B / q (\ln k - \ln I)$$

Si, 1 mA -2.0 mV/°C

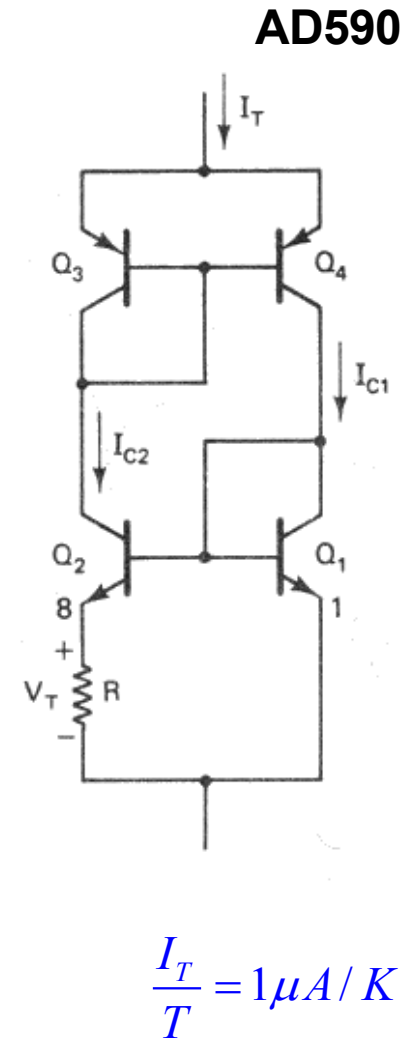
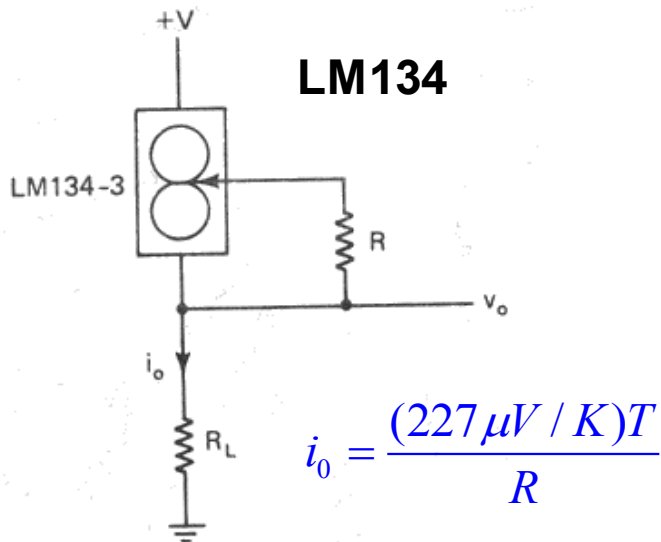
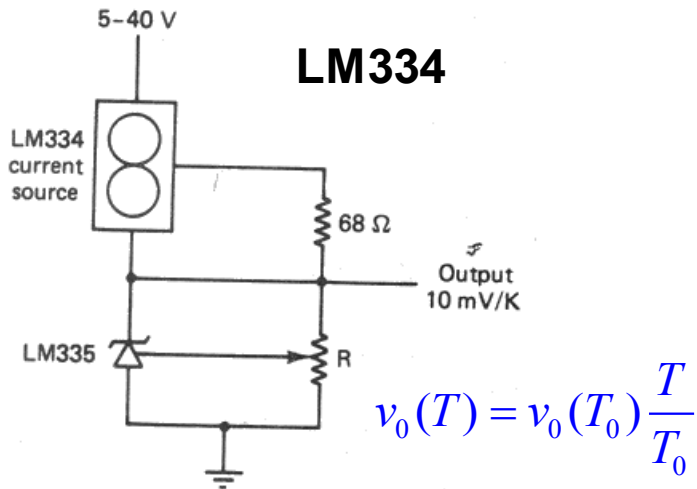
Si, 10  $\mu$ A -2.8 mV/°C

Ge, 1mA -1.95 mV/°C



# SENSORES DE TEMPERATURA IC

Circuitos integrados con salida proporcional a la temperatura absoluta



# TERMÓMETROS DE CAMBIO DE FRECUENCIA

## Fundamento físico:

Cambio de la capacidad de ciertos condensadores cerámicos con la  $T^a$  colocados en circuitos LC oscilantes. Su frecuencia de oscilación cambia de forma proporcional con la  $T^a$  para variaciones pequeñas de  $T^a$ .

Frecuencia de resonancia de un cristal de cuarzo  $-50^{\circ}\text{C} < T < +250^{\circ}\text{C}$

$$f(T) = f(0) [ 1 + a T + b T^2 + c T^3 ]$$

$f(T)$ : frecuencia de resonancia a  $T$

$f(0)$ : frecuencia de resonancia a  $0^{\circ}\text{C}$

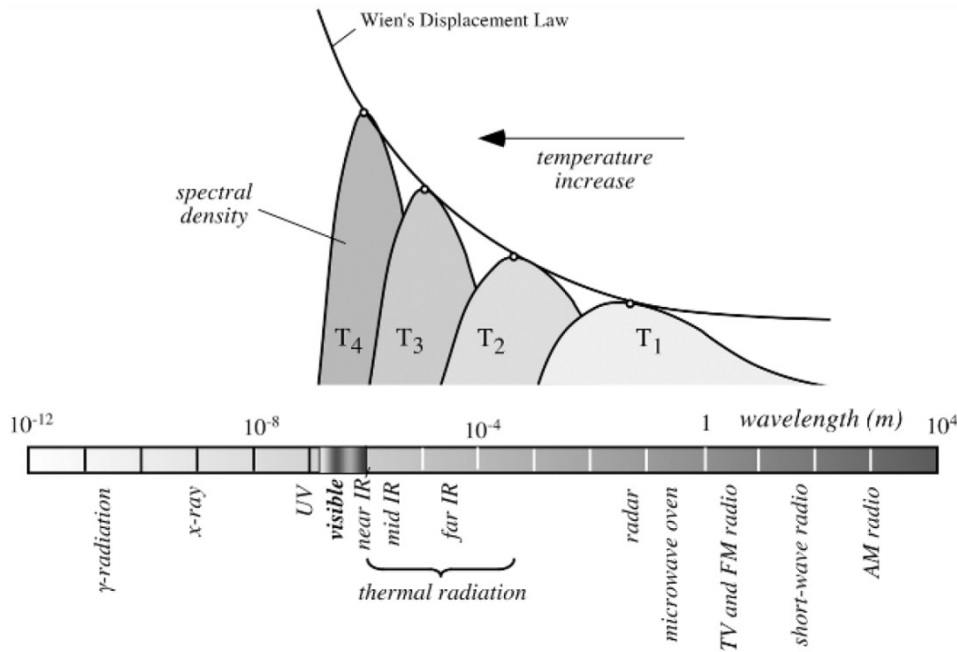
$a, b, c$ : constantes

$b, c$  pueden ser 0 en ciertas orientaciones cristalográficas y  $a = 35.4 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$

# TERMOMETRÍA DE RADIACIÓN

## Fundamento físico:

Todos los cuerpos radian energía en forma de ondas electromagnéticas.



Ecuación de Planck :

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

$W_{\lambda}$ : flujo radiante emitido por un cuerpo a  $T^a$  absoluta  $T$  por unidad de área y por unidad de longitud de onda centrado a una longitud de onda  $\lambda$ .

$\varepsilon$  : emisividad de la superficie. Generalmente depende de  $\lambda$ . Para el cuerpo negro ideal  $\varepsilon = 1$ . Para medidas in vivo en el rango 2-6  $\mu\text{m}$   $\varepsilon \sim 0.92-1$ .  $C_1$  y  $C_2$  son constantes.

Ley del desplazamiento de Wien:

$$\lambda_m = \frac{2898}{T} \mu\text{m} \quad \lambda \text{ a la cual } W_{\lambda} \text{ es máximo}$$

Ecuación de Stefan-Boltzmann

$$W_T = \int_0^{\infty} W_{\lambda} d\lambda = \varepsilon \sigma T^4 \quad \sigma \text{ es cte}$$

$T = 27^{\circ}\text{C}$  (300K)  $\rightarrow \lambda_m = 9,6 \mu\text{m}$  (infrarrojo) y aproximadamente 90% de  $W_T$  se emite en el rango de 4-30  $\mu\text{m}$

# DETECTORES DE INFRARROJO

**TÉRMICOS:** luz  $\rightarrow$  calor en un elemento ennegrecido que absorbe la radiación  $\rightarrow \Delta T$

☺ para todas las  $\lambda$

☹ muy lentos, muy poca sensibilidad

- **Termopilas de radiación** : termopares en serie producen emf
- **Bolómetros termistores** : combinación de dos termistores, uno expuesto a radiación y otro no para compensar pequeños cambios en el sumidero de calor.
- **Detectores piroeléctricos** : generan carga como respuesta a variaciones de T (efecto piroeléctrico).
- **Detectores de células de Golay** : expansión de un gas por efecto de T deforma un diafragma cuya superficie exterior es reflectora + un sistema óptico detector.

**FOTOELÉCTRICOS**  $h \nu > E$

**Dispositivos de vacío** (fotomultiplicadores): efecto fotoeléctrico

☺ enorme sensibilidad

☹  $V_{cc} \uparrow \uparrow$ , caros, gran tamaño, difícil  $\lambda > 1 \mu m$

**Semiconductores**

- **Fotoconductores:** luz  $\rightarrow \Delta n \rightarrow \Delta \sigma \rightarrow \Delta R$

☺ baratos, pequeños, fácil de acondicionar

☹ lentos, poca sensibilidad

- **Fotodiodos**

☺ rápidos, sensibles, IR-UV, muy lineales, baratos, pequeños, fiables, muy fáciles de acondicionar, posible matrices, tecnología electrónica

# DETECTORES DE INFRARROJO

## Detectividad de varios detectores de infrarrojo

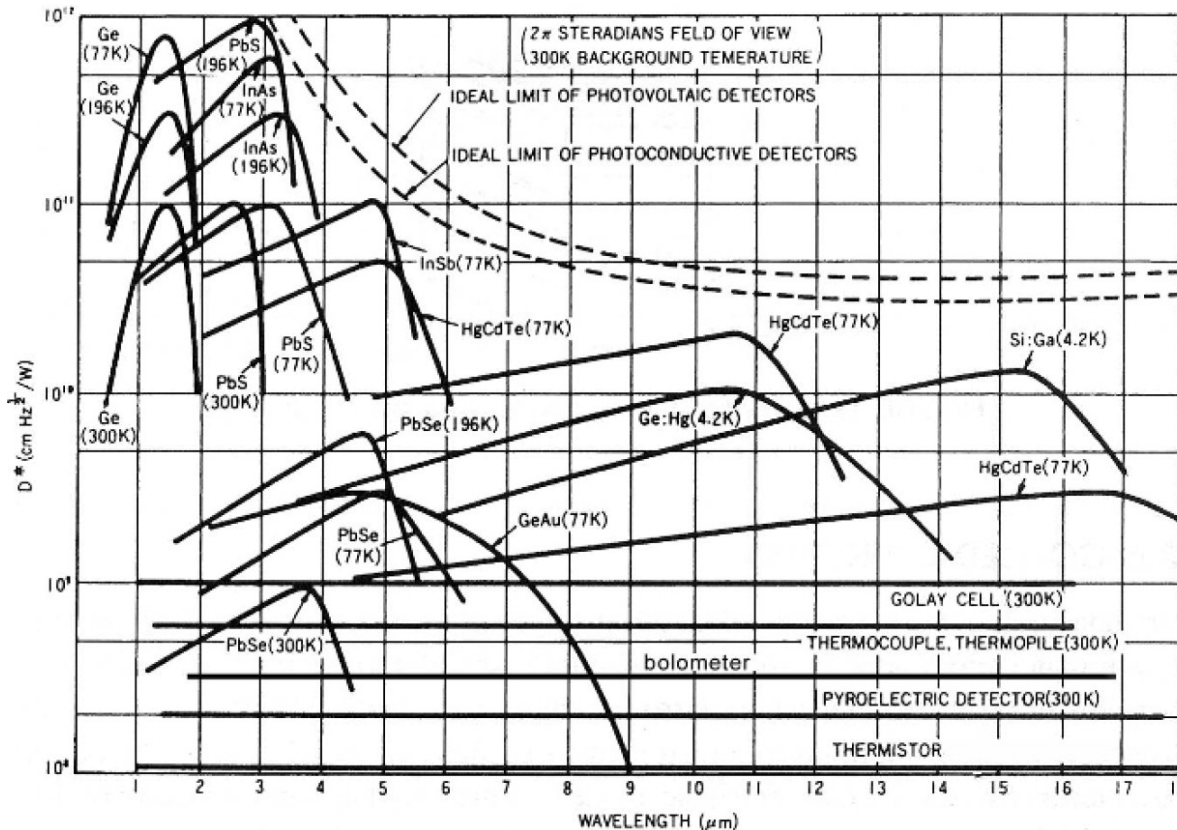
$$D^* = \frac{(A \Delta f)^{1/2}}{P_N}$$

$D^*$  : Detectividad específica

A: área del detector

$\Delta f$ : ancho de banda

$P_N$ : potencia equivalente de ruido. Potencia de la señal que produce una salida del detector igual a la salida producida por todas las fuentes de ruido que afectan al detector



**FOTOELÉCTRICOS:**

Respuesta selectiva a  $\lambda$ , con picos de  $D^*$  mayores que los térmicos si el detector se enfría entorno a la  $T^a$  de nitrógeno líquido.

**TÉRMICOS:**

Respuesta plana. Pueden trabajar a  $T^a$  ambiente.