

# FUNDAMENTO FÍSICO DE LOS SENSORES

## Referencias bibliográficas

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

Instrumentación electrónica, M.A. Pérez García y otros, Ed. Thomson

# PRINCIPIOS FÍSICOS DE FUNCIONAMIENTO

- Resistivo: cambio en la resistencia de un conductor por efecto de la temperatura, la presión, la humedad, la luz, etc.
- Capacitivo: cambio en la capacidad de un condensador por el cambio de posición relativa entre los electrodos o cambios en el dieléctrico.
- Inductivos: cambio en la autoinductancia de una bobina por el movimiento del núcleo electromagnético o elementos externos que modifican el flujo en una bobina.
- Reluctivo: cambio en el camino de reluctancia entre dos o más bobinas (reluctancia variable, transformadores diferenciales).
- Electromagnético: cambio en la fuerza electromotriz inducida en un conductor por un cambio en el flujo magnético, en ausencia de excitación, debido al movimiento de un imán.
- Piezoeléctrico: polarización eléctrica de un material (piezoeléctrico) al deformarlo.
- Piroeléctrico: polarización eléctrica de un material (piroeléctrico) al variar la temperatura.
- Termoeléctrico: diferencia de potencial entre dos materiales distintos cuyas uniones están a diferente temperatura.
- Fotoeléctrico: corriente generada en un diodo al incidir la luz.

# SENSORES RESISTIVOS

$$R = \frac{V}{I}$$

R: resistencia ( $\Omega$ )  
V: voltaje (Volts)  
I: corriente (Amps)

Para un conductor uniforme

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

$\rho$ : resistividad ( $\Omega \cdot m$ )  
L: longitud (m)  
S: sección

$$\rho = \frac{1}{qn\mu}$$

q: carga del electron  
n: densidad de portadores  
 $\mu$ : movilidad de los portadores

$$R = f(\rho, \text{factor}_{\text{geométrico}})$$

Algunos sensores resistivos:

- Potenciómetros
- Sensores piezorresistivos y galgas extensométricas
- Termómetros metálicos (RTD: Resistance Temperature Detector)
- Termistores (NTC, PTC de conmutación, silistores)
- Magnetorresistencias, fotoconductores, detectores de oxígeno....

# • Potenciómetros (I)

Resistencia con dos terminales fijos y un contacto móvil deslizante o giratorio

$$R_d = \rho \frac{d}{S} = R_o \frac{d}{L} = R_o x_i$$

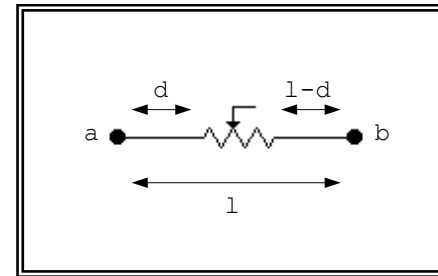
$\rho$  : resistividad

d: distancia de un contacto fijo al móvil

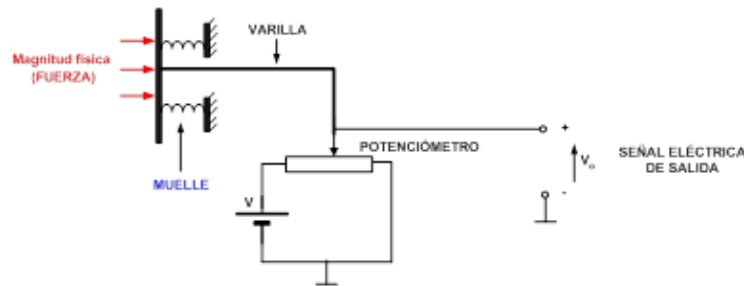
L: longitud total del potenciómetro

S: sección del conductor

$R_o$ : resistencia total del potenciómetro



**Aplicaciones:** Medida de desplazamiento (o magnitudes convertibles).



Temperatura: con un bimetal  
Aceleración: con sistema masa-muelle  
Presión: con un fuelle  
Nivel: con un flotador

Dispositivo simple y robusto, que permite obtener exactitudes elevadas en relación con su precio

**Acondicionamiento:** Fuente de tensión

- Limitación por potencia disipada
- Error de carga (y no linealidad) si se conecta a impedancia pequeña

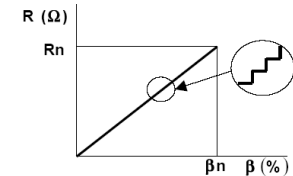
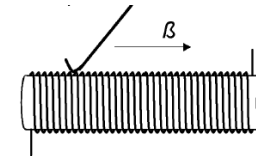
# • Potenciómetros (II)

## Materiales:

- Hilo metálico bobinado sobre soporte cerámico

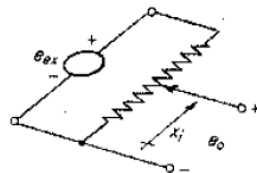
Resolución finita

- Películas metálica
- Películas de plástico conductor
- Películas de cermet (metales fundidos en base cerámica)
- Híbridos.



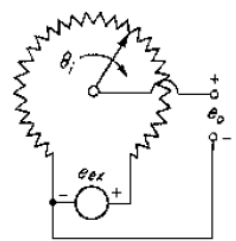
## Geometría:

lineal



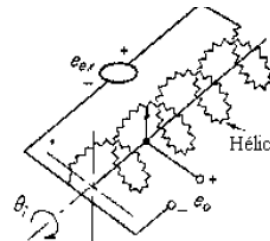
Traslación

angular



Rotación

helicoidal



## Especificaciones relevantes:

- Recorrido: 2mm-8m los lineales y de 10° a 60 vueltas los angulares
- Resistencia nominal: desde 5Ω los de hilo bobinado a varios MΩ los de cermet
- Potencia máxima disipada: de 0,1 W a 50 W.
- Coeficiente de temperatura: 20 a 1000 ppm/°C
- Resolución: finita los de hilo bobinado.
- Tiempo de vida: típicamente 1 millón de ciclos.

# • Sensores piezorresistivos (I)

## Efecto piezorresistivo

$$R = \rho \frac{L}{S} \Rightarrow \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \cong (1+2\nu) \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \Rightarrow G = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \underbrace{(1+2\nu)}_{\text{GEOMETRIC EFFECT}} + \underbrace{\frac{\Delta \rho}{\rho}}_{\text{PIEZO-RESISTIVE EFFECT}}$$

El coeficiente de Poisson ( $\nu \sim 0.3-0.5$ ) relaciona la deformación en la dirección perpendicular a  $L$  con la deformación longitudinal.

$$\nu = -\frac{dt/t}{dL/L}$$

### Especificaciones:

$$R = R_0 \left( 1 + G \frac{dL}{L} \right)$$

- Resistencia nominal  $R_0$  ( $\sim 100\Omega$  metálicas,  $K\Omega$  semiconductores)
- Factor de la galga  $G$
- Deformación máxima ( $\sim 10^4 \mu\epsilon$  metales,  $10^3 \mu\epsilon$  en semiconductores)
- Coeficiente de temperatura, Potencia máxima disipada

## Materiales

Metales o aleaciones metálicas.

Domina el término geométrico ( $G \sim 2$ )

Semiconductores (silicio).

Domina el término piezorresistivo ( $G \sim 100$ )

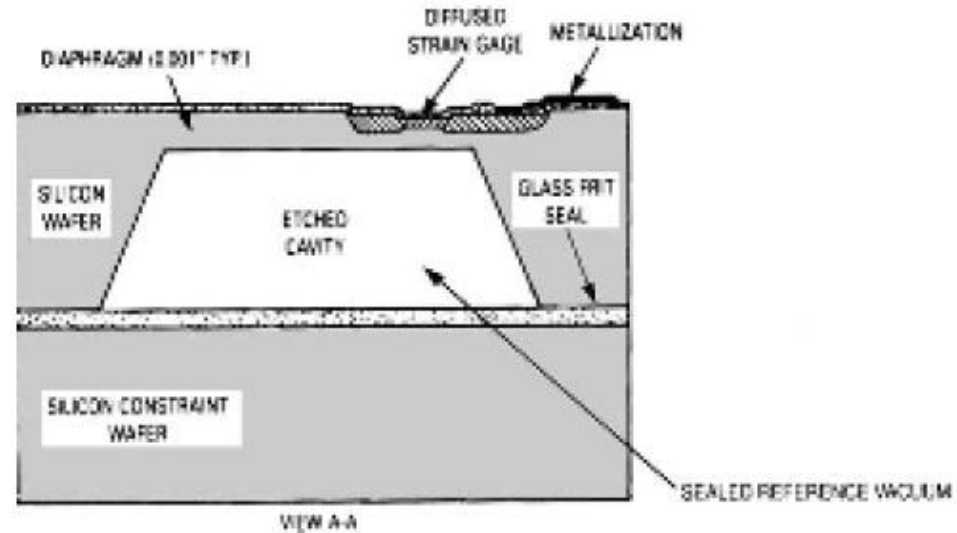
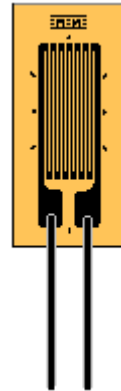
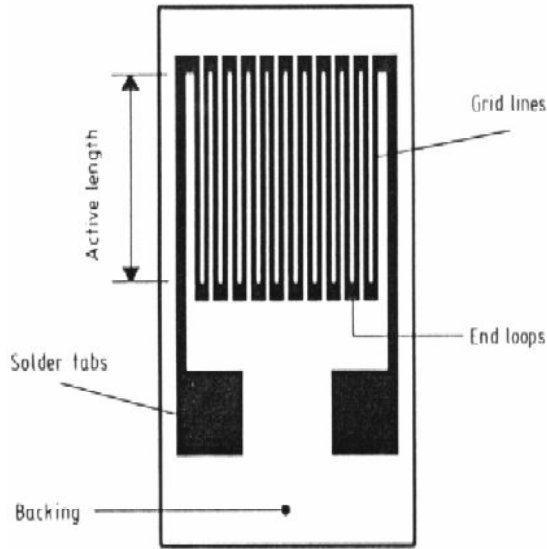
tipo p ( $G > 0$ , máximo en orientación  $\langle 111 \rangle$ )

tipo n ( $G < 0$ , máximo en orientación  $\langle 100 \rangle$ )

Material	Composition (%)	Gage factor	Temperature coefficient of resistivity ( $^{\circ}\text{C}^{-1} \times 10^{-5}$ )
Constantan (advance)	Ni <sub>45</sub> , Cu <sub>55</sub>	2.1	$\pm 2$
Isoelastic	Ni <sub>36</sub> , Cr <sub>8</sub> (Mn, Si, Mo) <sub>4</sub>	3.52 to 3.6	+ 17
Karma	Fe <sub>52</sub> Ni <sub>74</sub> , Cr <sub>20</sub> , Fe <sub>3</sub> Cu <sub>3</sub>	2.1	+ 2
Manganin	Cu <sub>84</sub> , Mn <sub>12</sub> , Ni <sub>4</sub>	0.3 to 0.47	$\pm 2$
Alloy 479	Pt <sub>92</sub> , W <sub>8</sub>	3.6 to 4.4	+ 24
Nickel	Pure	- 12 to - 20	670
Nichrome V	Ni <sub>80</sub> , Cr <sub>20</sub>	2.1 to 2.63	10
Silicon	(p type)	100 to 170	70 to 700
Silicon	(n type)	- 100 to - 140	70 to 700
Germanium	(p type)	102	
Germanium	(n type)	- 150	

# • S. Piezorresistivos y galgas extensométricas(II)

Tipos y aspecto físico

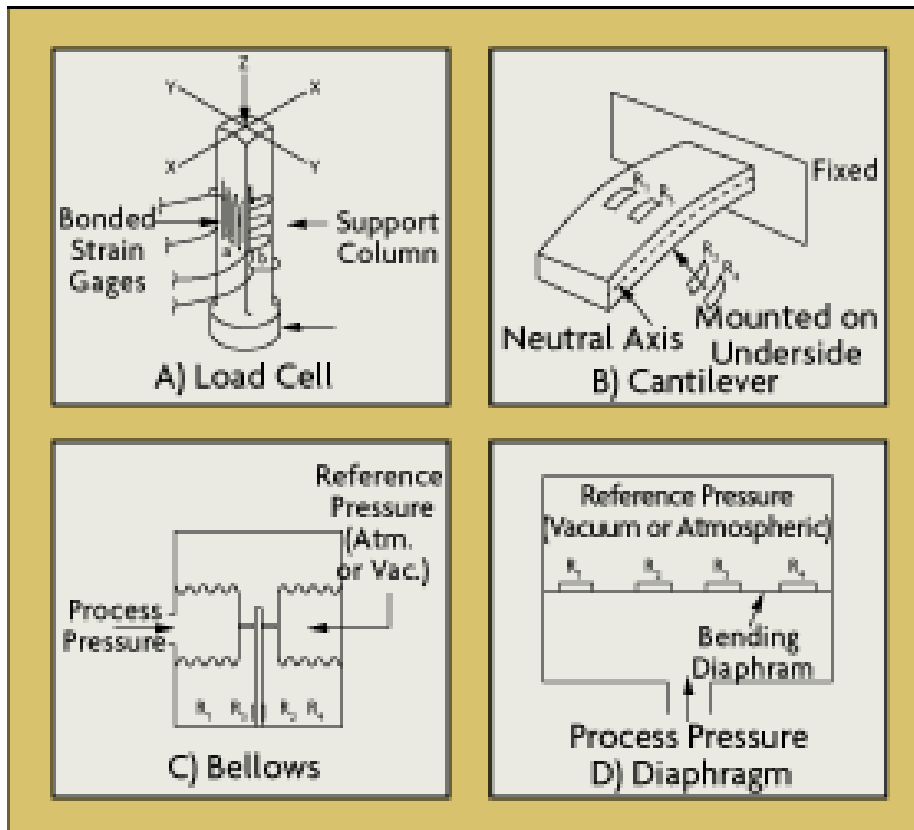


<p>A photograph of a uniaxial strain gauge, showing a rectangular grid of lines on a substrate.</p>	<p>A diagram of a biaxial or rosette strain gauge. It shows a central point with multiple grid lines radiating outwards. Dimensions 'd', 'a', 'c', and 'e' are indicated.</p>	<p>A diagram of a radial or tangential strain gauge. It shows a circular grid of lines. Dimensions 'd' and 'a' are indicated.</p>
<p>Galga uniaxial</p>	<p>Galgas biaxiales o rosetas</p>	<p>Galgas radiales o tangenciales</p>

# • Sensores piezorresistivos (III)

**Acondicionamiento:** Puente de Wheatstone + amplificador de instrumentación  
 $\Delta R/R$  es muy pequeña ( $\sim 10^{-3}$ ). Hay que compensar el efecto de la temperatura y otros posibles errores.

**Aplicaciones:** medida de fuerza, presión, aceleración...



$$\sigma = \frac{F}{S} = E \frac{\Delta L}{L}$$

$\sigma$ : Tensión mecánica (stress)  
 $E$ : módulo de Young  
 $dL/L$ : deformación (strain)



# • Termómetros metálicos (RTD)

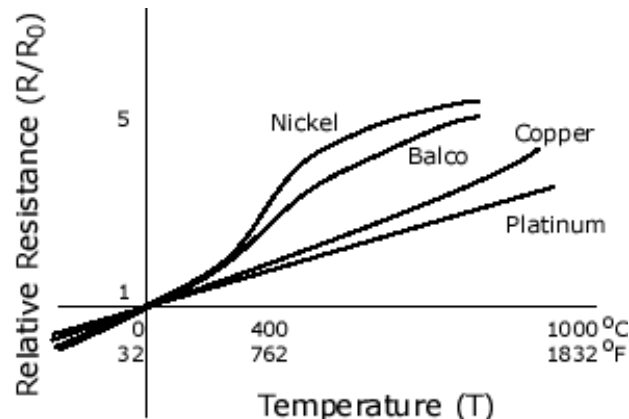
Coeficiente de temperatura positivo

*Resistance Temperature Detector*

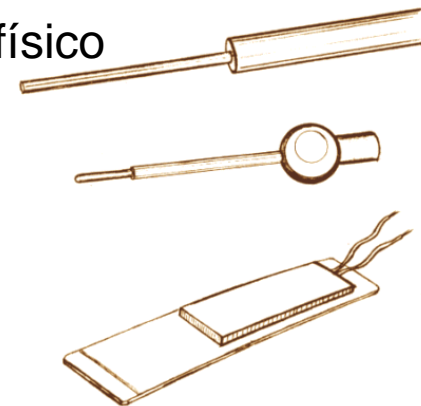
$$R_T = R_0 [1 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 + \dots + \alpha_n T^n + \dots] \cong R_0 [1 + \alpha_1 T]$$

## Materiales

Metal	Resistividad (20°C)	$\alpha$ ( $\Omega/\Omega/K$ )	Rango	R(0) ( $\Omega$ )	Coste relativo	Precisión
Platino	10.6	0.00385	-200 a 950	25, 100, 130	Alto	0.01
Cobre	1.673	0.0043	-200 a 120	10	Bajo	0.10
Níquel	6.844	0.00681	-150 a 300	100	Medio	0.50



## Aspecto físico



**Acondicionamiento:** Fuente de corriente + amplificación con eliminación de offset

Puente de Wheatstone (con linealización) + amplificación

Precaución con autocalentamiento y errores por hilos de conexión (conf. de 3 y 4 hilos)

**Aplicaciones:** medida de temperatura, nivel de fluidos, anemómetros

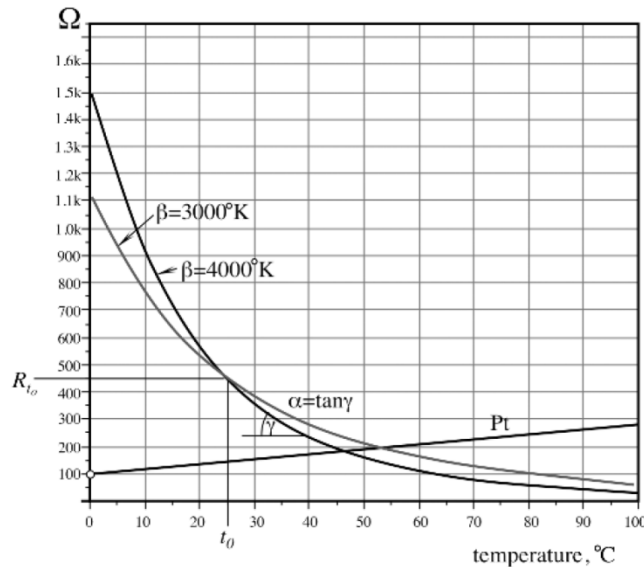
# • Termistores (*Thermally sensitive resistor*)

## NTCs: Coeficiente de temperatura negativo

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

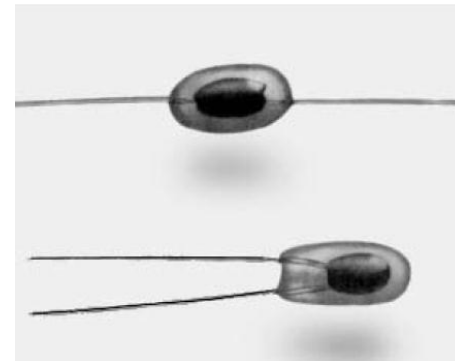
$R_0$ : resistencia a  $T_0$  (K $\Omega$ -M $\Omega$ )  
 $B \sim 3000$ - $5000$  K

$$TCR = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = -\frac{B}{T^2} \quad \sim -2 \text{ a } -8 \text{ \%}/^\circ\text{C}$$



## Materiales:

- cerámicas semiconductoras de óxidos metálicos (Ni, Mn, Co, Ti)



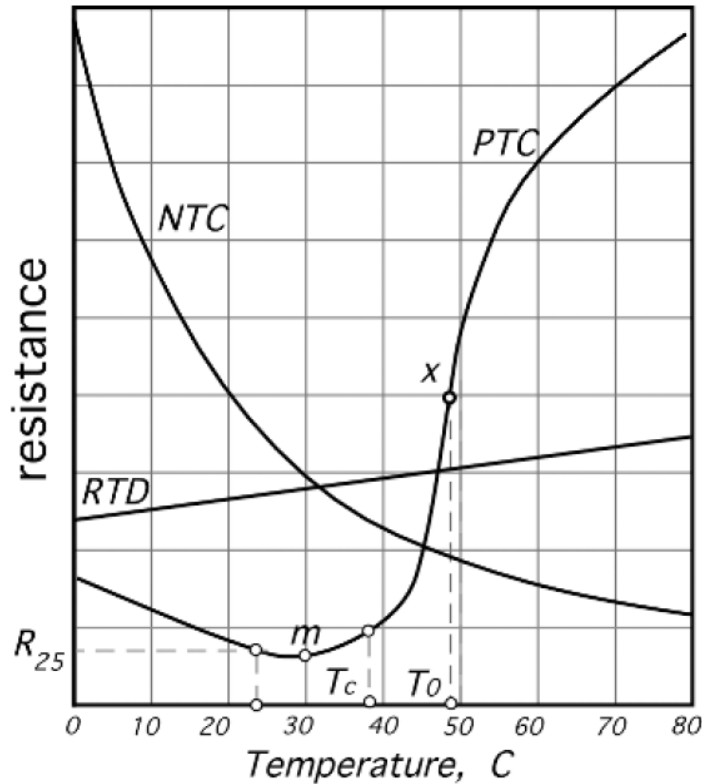
**Acondicionamiento:** fuente de corriente o tensión+ eliminación de offset+amplificación  
 Necesidad de linealización; efectos de autocalentamiento

**Aplicaciones:** medida de temperatura (linealizar), nivel de fluidos, velocidad de fluidos, introducción de retardos

# • Termistores- “posistores”.

PTC de conmutación (coeficiente de temperatura positivo para  $T > T_c$ )

TCR ~ 200%/°C



## Materiales:

- Cerámicas policristalinas de titanato de bario dopado

Por encima de la Temperatura de Curie ( $T_c$ ) el material presenta propiedades ferroeléctricas (y brusca subida de la R)

**Acondicionamiento:** funcionamiento habitual en regimen de autocalentamiento.

**Aplicaciones:** protección de circuitos, fusibles, termostato, medida de nivel o caudal.

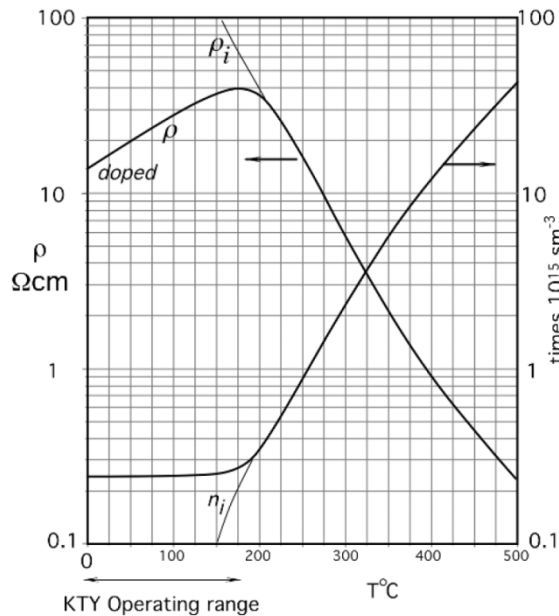
# • Termistores- Silistores

PTCs de medida (coeficiente de temperatura positivo)

T [-55, 150] °C

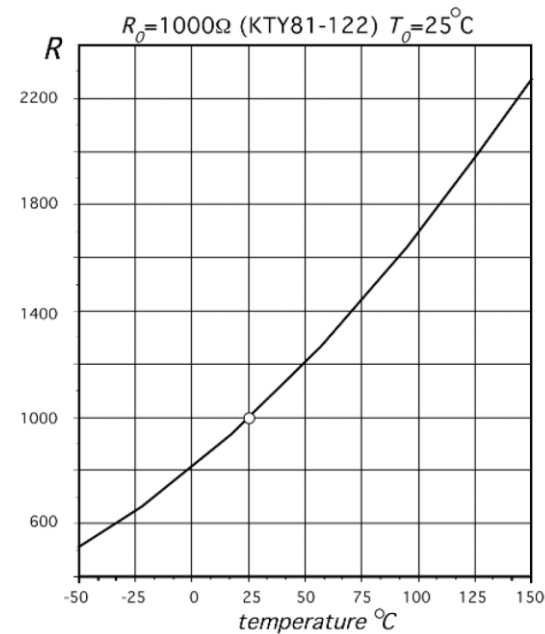
$$R_T = R_0[1 + A(T - T_0) + B(T - T_0)^2]$$

TCR ~ 0.7%/°C



$$\rho = \frac{1}{qn\mu}$$

Resistivity and number of free charge carriers for  $n$ -doped silicon.



**Acondicionamiento:** fuente de corriente o tensión+ eliminación de offset+amplificación  
Necesidad de linealización; efectos de autocalentamiento

**Aplicaciones:** medida de temperatura, nivel o caudal.

# SENSORES CAPACITIVOS (I)

Conductores separados por un dieléctrico o el vacío.

$$C = \frac{Q}{\Delta V}$$

C: capacidad

Q: carga

$\Delta V$ : diferencia de potencial entre placas

$C = f(\epsilon, \text{factor}_{\text{geométrico}})$  Variaciones de  $\epsilon$  (humedad, temperatura, nivel)  
Variaciones de la geometría (desplazamiento)

Alta impedancia de salida

Valores habituales de C ~1-500 pF

Frecuencia de alimentación > 10 KHz

$$Z = \frac{1}{j\omega C}$$

Gran estabilidad y reproducibilidad

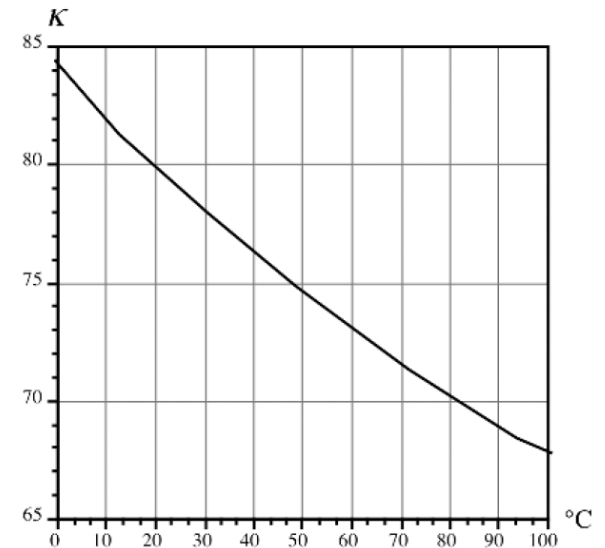
Alta resolución (es posible medir pequeñas variaciones de C con los circuitos apropiados)

Problemática con las interferencias capacitivas

# SENSORES CAPACITIVOS (II)

Dielectric Constants of Some Materials at Room Temperature (25°C)

Material	$\kappa$	Frequency (Hz)	Material	$\kappa$	Frequency (Hz)
Air	1.00054	0	Paraffin	2.0–2.5	$10^6$
Alumina ceramic	8–10	$10^4$	Plexiglas	3.12	$10^3$
Acrylics	2.5–2.9	$10^4$	Polyether sulfone	3.5	$10^4$
ABS/polysulfone	3.1	$10^4$	Polyesters	3.22–4.3	$10^3$
Asphalt	2.68	$10^6$	Polyethylene	2.26	$10^3$ – $10^8$
Beeswax	2.9	$10^6$	Polypropylenes	2–3.2	$10^4$
Benzene	2.28	0	Polyvinyl chloride	4.55	$10^3$
Carbon tetrachloride	2.23	0	Porcelain	6.5	0
Cellulose nitrate	8.4	$10^3$	Pyrex glass (7070)	4.0	$10^6$
Ceramic (titanium dioxide)	14–110	$10^6$	Pyrex glass (7760)	4.5	0
Cordierite	4–6.23	$10^4$	Rubber (neoprene)	6.6	$10^3$
Compound for thick-film capacitors	300–5000	0	Rubber (silicone)	3.2	$10^3$
Diamond	5.5	$10^8$	Rutile $\perp$ optic axis	86	$10^8$
Epoxy resins	2.8–5.2	$10^4$	Rutile $\parallel$ optic axis	170	$10^8$
Ferrous oxide	14.2	$10^8$	Silicone resins	3.4–4.3	$10^4$
Flesh (skin, blood, muscles)	97	$40 \times 10^6$	Tallium chloride	46.9	$10^8$
Flesh (fat, bones)	15	$40 \times 10^6$	Teflon	2.04	$10^3$ – $10^8$
Lead nitrate	37.7	$6 \times 10^7$	Transformer oil	4.5	0
Methanol	32.63	0	Vacuum	1	—
Nylon	3.5–5.4	$10^3$	Water	78.5	0
Paper	3.5	0			

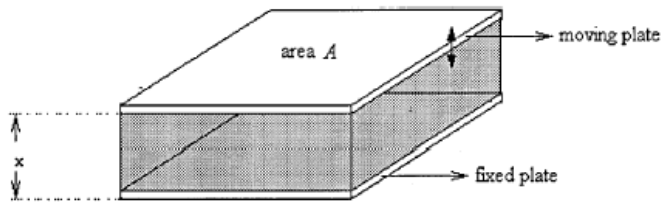


Dielectric constant of water as a function of temperature

# SENSORES CAPACITIVOS (III)

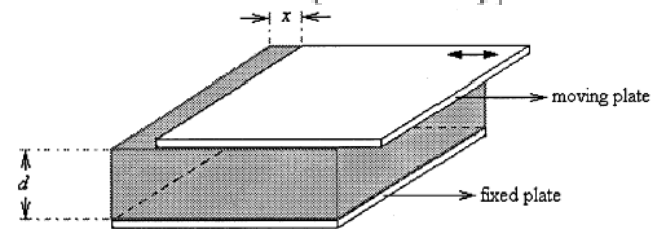
## SEPARACIÓN VARIABLE

$$C(x) = \epsilon A / x = \epsilon_r \epsilon_0 A / x$$



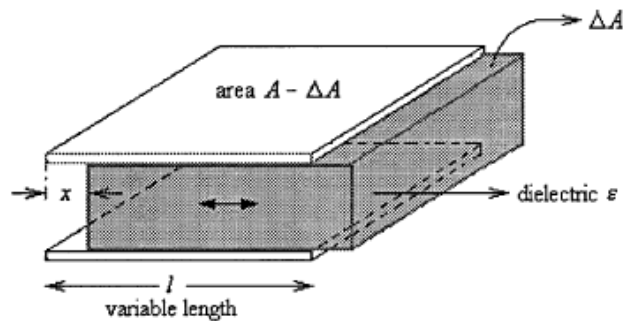
## AREA VARIABLE

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 (A - wx) / d$$



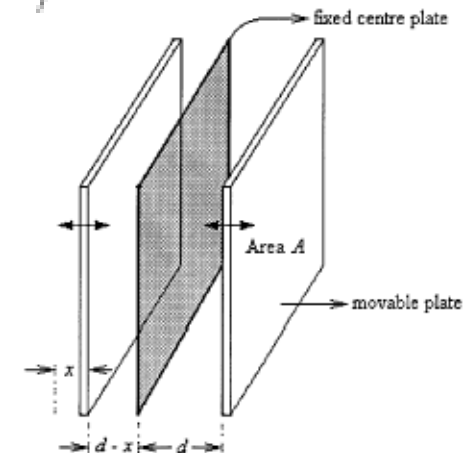
## DIELECTRICO VARIABLE

$$C = \epsilon_0 w \left[ \epsilon_2 l - (\epsilon_2 - \epsilon_1) x \right]$$

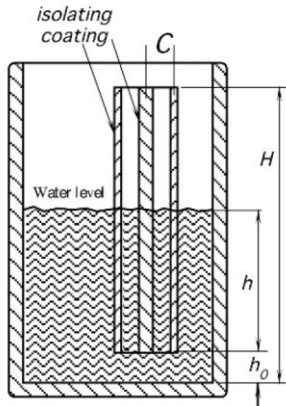


## MODO DIFERENCIAL

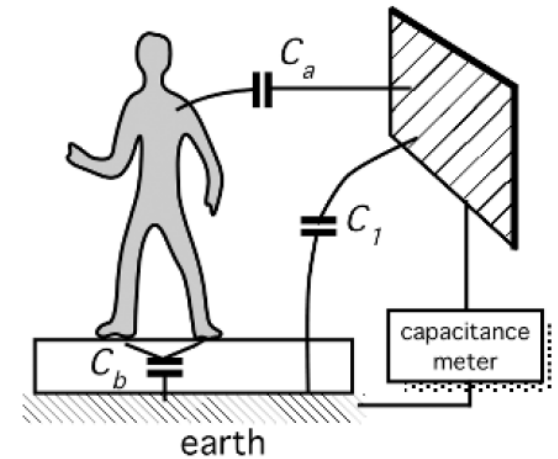
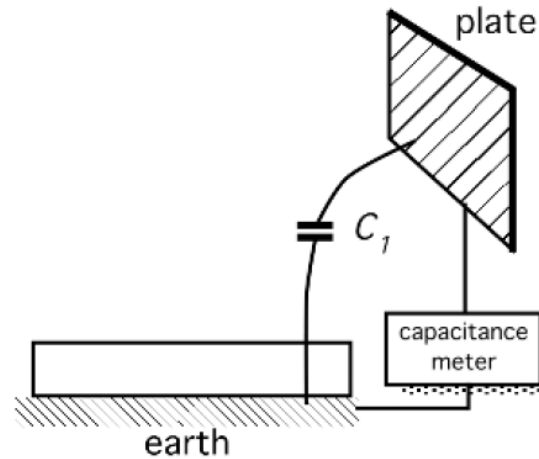
$$\delta C / C = \delta d / d$$



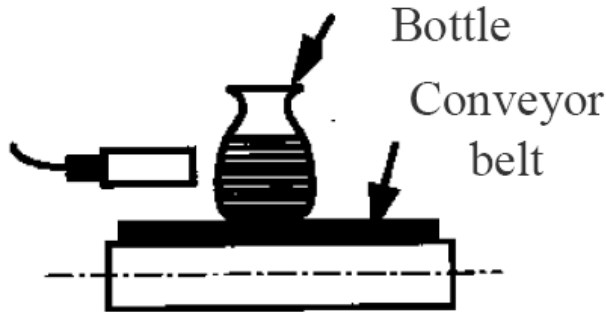
# SENSORES CAPACITIVOS (IV)



Capacitive water level sensor



An intruder brings in an additional capacitance to a detection circuit



Control of filling

**Aplicaciones:** medida de desplazamientos (o magnitudes convertibles), detectores de proximidad (pantalla táctil, detectores de intrusos), higrómetros (humedad), nivel



# SENSORES CAPACITIVOS (V)

## Acondicionamiento

Frecuencia de excitación

>10 kHz (para limitar la impedancia de salida)

<1000 kHz (para que respondan bien los conmutadores y amplificadores)

Amplificador AC+ demodulador síncrono

Osciladores Wien, relajación, RC, LC

Circuitos conmutados con transferencia de carga

# SENSORES INDUCTIVOS (I)

## Fenómenos de inducción:

Flujo magnético (weber = tesla.m<sup>2</sup>)

$$\Phi_B = \oint B dS$$

Fuerza electromotriz inducida  
(Ley de inducción de Faraday)

$$V = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Si hay N espiras

$$V = -N \frac{d\Phi_B}{dt} = -N \frac{d(BS)}{dt}$$

Se genera un fuerza electromotriz si:

Cambia la orientación relativa de B y S

Se acerca o aleja el imán o la bobina que genera B

Varia la corriente que genera B

Se estira o encoje el circuito (variación de S)

# SENSORES INDUCTIVOS (II)

Para un circuito por el que circula una corriente  $i$ :

Coeficiente de autoinducción,  $L$  (Henrio=volt.sec/amp):

$$V = -\frac{d(N\Phi_B)}{dt} = -\frac{d(N\Phi_B)}{di} \frac{di}{dt} = -L \frac{di}{dt}$$

Para dos circuitos con inducción mutua:

Coeficiente de inducción mutua,  $M$       $V_2 = -\frac{d(N_2\Phi_B)}{dt} = -M_{12} \frac{di_1}{dt}$

$$L, M_{12} = f(\mu, \text{factor}_{\text{geométrico}})$$

Bobina de  $N$  espiras, sección  $S$  y longitud  $L$

$$L = \mu_0 N^2 S / L$$

# SENSORES INDUCTIVOS (III)

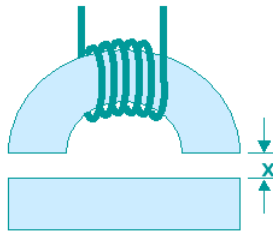
## SENSORES MAGNETOELÁSTICOS O MAGNETOESTRICTIVOS

$$\mu = f(\text{tensión mecánica } \sigma)$$

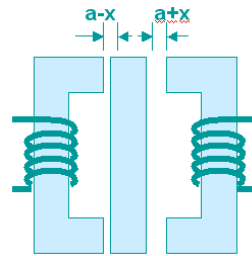
Permaloy 68:  $\mu$  aumenta si  $\sigma$  aumenta

Niquel:  $\mu$  disminuye si  $\sigma$  aumenta.

## SENSORES DE ENTREHIERRO VARIABLE



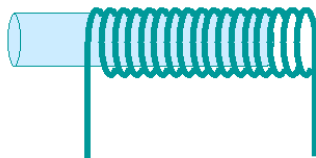
Configuración sencilla



Configuración diferencial

$$L = \frac{N^2}{\sum \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{l}{A} + \sum \frac{1}{\mu_0} \frac{l_0}{A_0}}$$

## SENSORES DE NUCLEO DESLIZANTE



$$L = \mu_0 \pi r^2 \frac{N^2}{L^2} (L - x_n) + \mu_0 \mu_r \pi r^2 \frac{N^2}{L^2} x_n$$

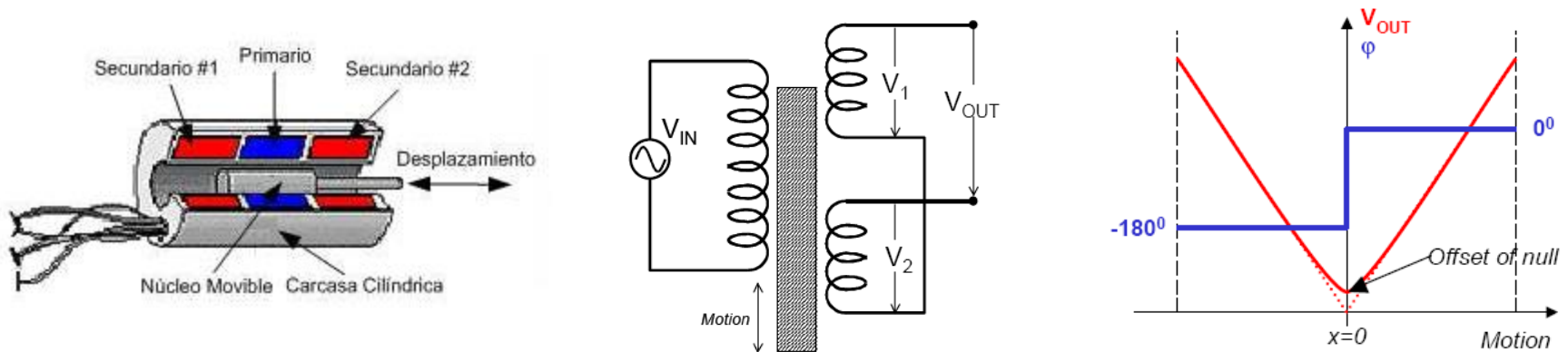
## SENSORES BASADOS EN CORRIENTES DE FOUCAULT

Estructura similar a los anteriores pero el elemento móvil es metálico

# SENSORES INDUCTIVOS (IV)

## TRANSFORMADORES

LVDT (Linear Variable Differential Transformer) o RVDT (Rotary VDT)



Voltaje en la bobina primaria:  $V_{IN} = V_s \sin(\omega t)$

Voltaje inducido en las secundarias:  $V_1 = k_1 \sin(\omega t + \phi)$  y  $V_2 = k_2 \sin(\omega t + \phi)$

$K_1$  y  $K_2$  dependen del acoplamiento entre el primario y los secundarios y es proporcional a la posición del núcleo

En la posición central  $K_1 = K_2$  y  $V_{OUT} = V_1 - V_2 = 0$

Si el núcleo se desplace  $K_1 \neq K_2$  y  $V_{OUT} = (K_1 - K_2) \sin(\omega t + \phi)$

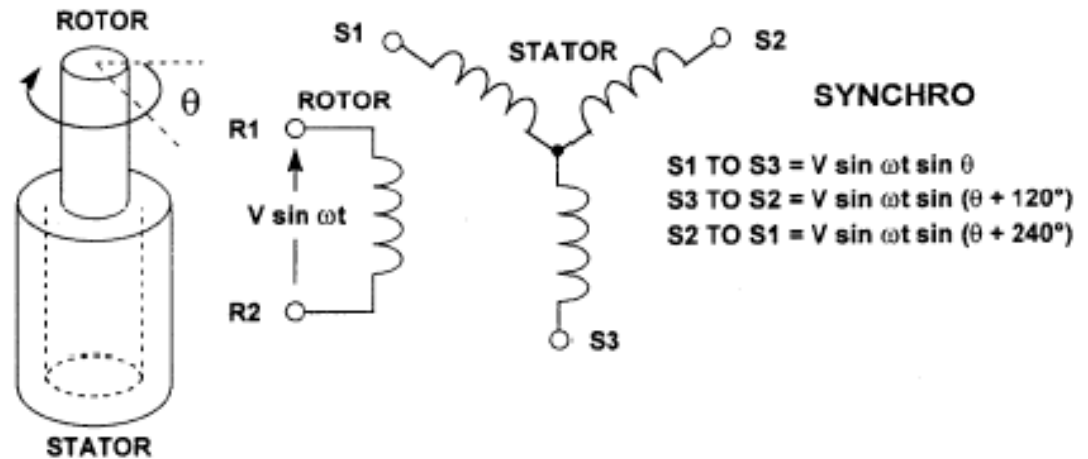
El desplazamiento positivo o negativo está determinado por  $\phi$

# SENSORES INDUCTIVOS (V)

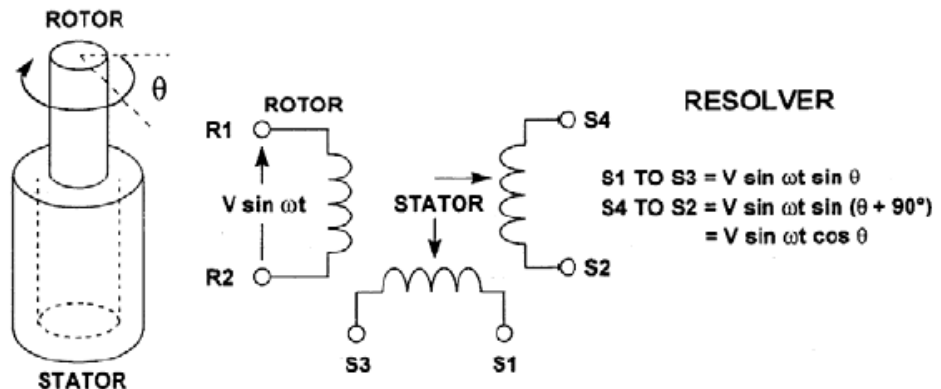
## TRANSFORMADORES VARIABLES

(cambia la posición relativa del primario respecto a los secundarios)

### SINCRO



### RESOLVER



# SENSORES INDUCTIVOS (V)

## Acondicionamiento

Transformadores:

Excitación AC + Demoduladores síncronos o asíncronos

L variable:

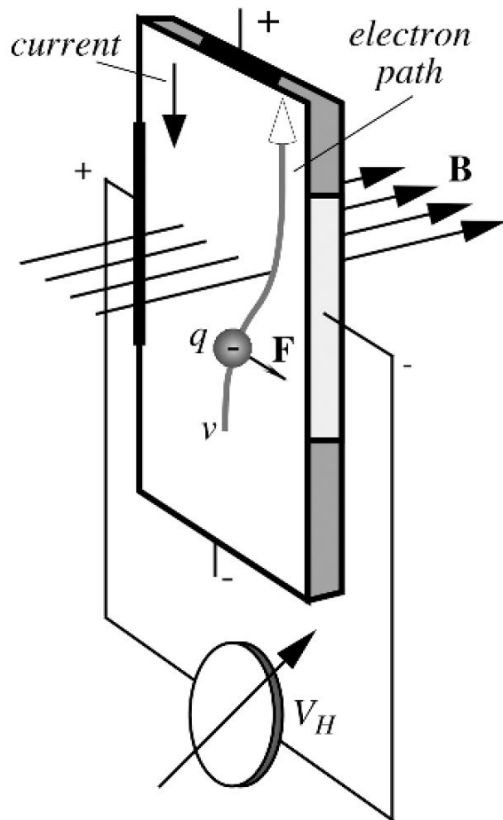
Osciladores LC

Puentes de alterna + amplificadores AC + Demoduladores

**Aplicaciones:** desplazamiento (o magnitudes convertibles),  
Velocidad, presión (magnetostrictivos), etc

# SENSORES DE EFECTO HALL (I)

**Efecto Hall:** aparición de una diferencia de potencial cuando hay electrones en movimiento en un campo magnético externo perpendicular a la dirección de movimiento de los electrones.



Fuerza de Lorentz

$$F = q\vec{v} \times \vec{B}$$

$q$ : carga del electrón

$v$ : velocidad del electrón

$B$ : campo magnético

$R_H$ : Hall constant

$$R_H = \frac{p\mu_p^2 - n\mu_n^2}{q(p\mu_p + n\mu_n)^2} \begin{cases} R_H = \frac{1}{qp} & p \gg n \\ R_H = -\frac{1}{qn} & n \gg p \end{cases}$$

$$V_H = R_H I_x B_z / t$$

$$V_H = \left( \frac{w}{l} \right) \mu V_x B_z$$

$I_x$ : corriente eléctrica

$B_z$ : campo magnético

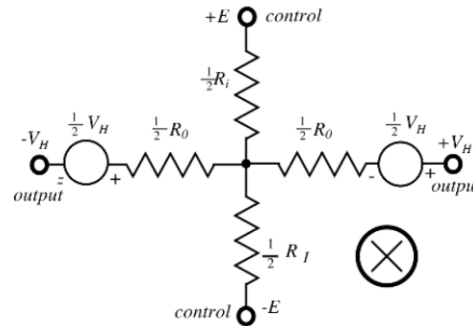
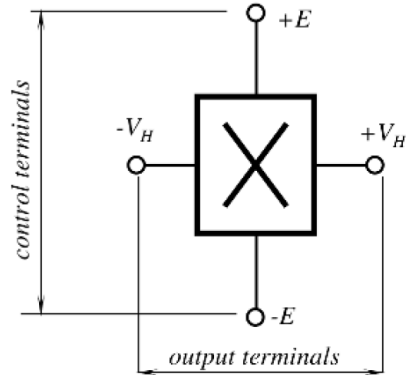
$t$ : espesor de la placa Hall

$w$ : anchura de la placa Hall  
(en la dirección de  $V_H$ )

$L$ : longitud de la placa Hall  
(en la dirección de  $I_x$  o  $V_x$ )

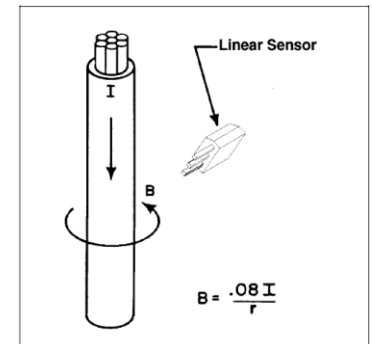
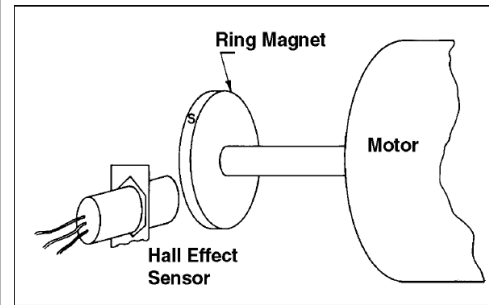
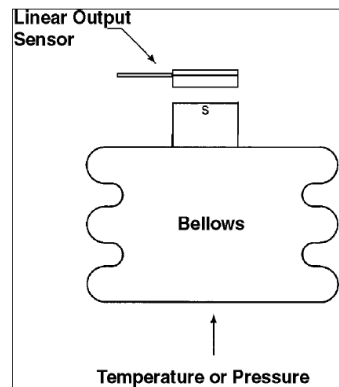
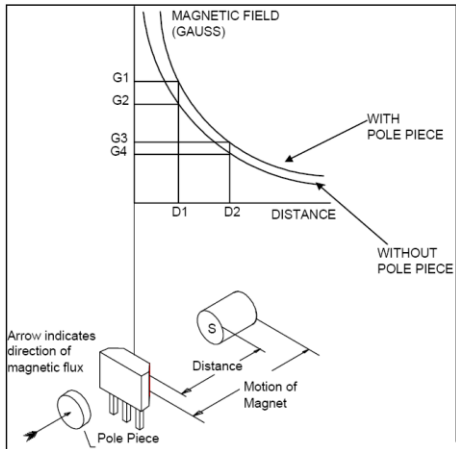


# SENSORES DE EFECTO HALL(II)



Equivalent circuit of a Hall sensor.

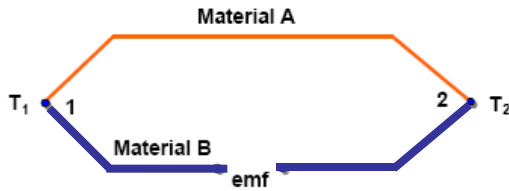
## Aplicaciones



Desplazamiento (magnitudes convertibles), velocidad, corriente, potencia eléctrica.

# SENSORES TERMOELÉCTRICOS (I)

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



**Termopar**

$$dV_{AB} = \alpha_{AB} dT$$

$\alpha_{AB}$ : coeficiente Seebeck para los materiales A y B

$dV_{AB}$ : diferencia de potencial

$dT$ : diferencia de temperatura

*Circuito equivalente*: fuente de tensión  $V_{AB}$  en serie con la pequeña resistencia de los metales

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

$$\frac{dQ_P}{dt} = \pm \pi_{AB} I$$

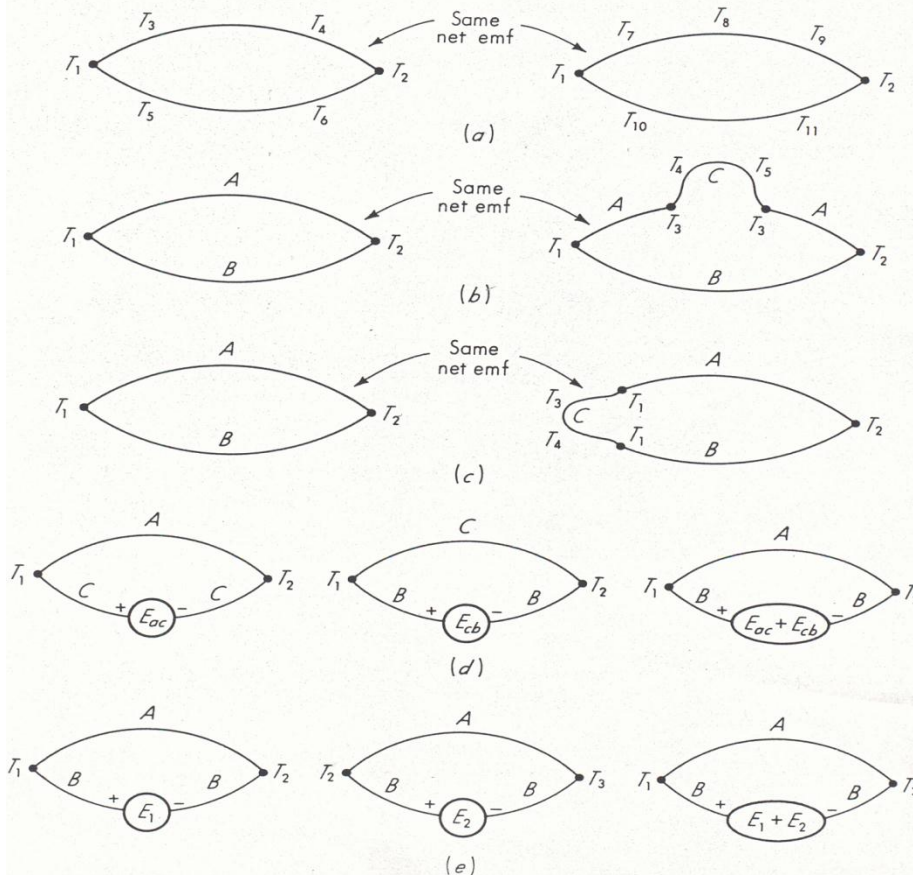
$Q_P$ : calor producido o absorbido

$\pi_{AB}$ : coeficiente Peltier

$t$ : tiempo

# SENSORES TERMOELÉCTRICOS (II)

## Leyes de los termopares



### LEY DE LOS CIRCUITOS HOMOGÉNEOS:

La ftem 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 ftem 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 ftem entre los metales A y C es  $E_{AC}$ , y entre los metales C y B es  $E_{CB}$ , la ftem entre los metales A y B es  $E_{AC} + E_{CB}$  (Fig d). (Basta tener las ftem 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 SUCESIVAS O INTERMEDIAS

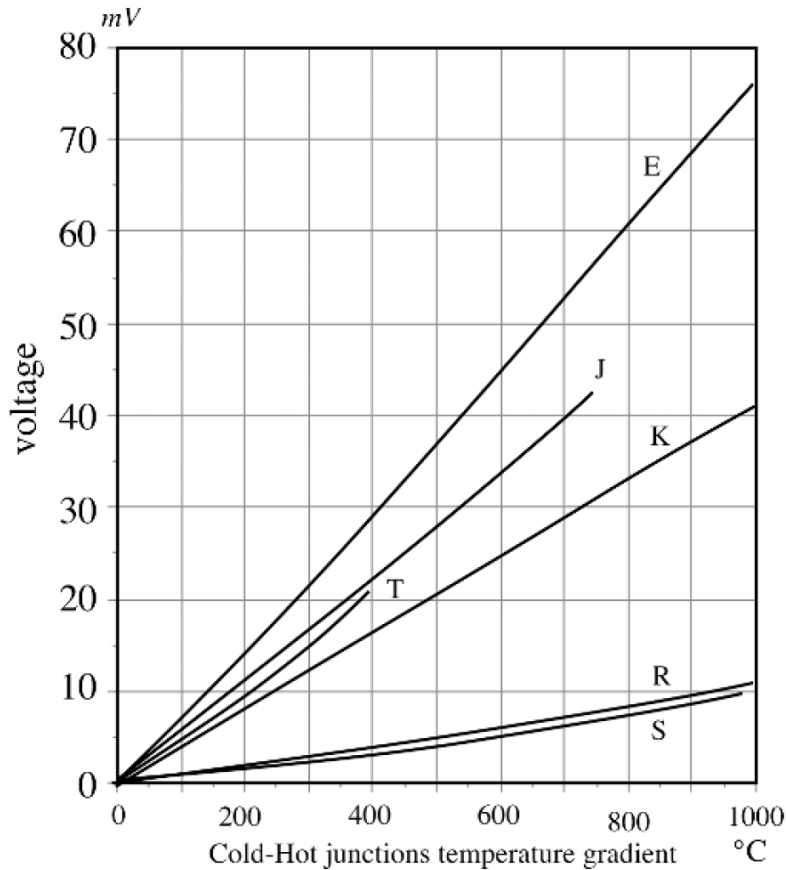
Si un termopar produce una ftem  $E_1$  cuando las uniones están a  $T_1$  y  $T_2$ , y  $E_2$  con las uniones a  $T_2$  y  $T_3$ , producirá una ftem  $E_1 + E_2$  cuando las uniones están a  $T_1$  y  $T_3$  (Fig e). (Basta con conocer la ftem respecto a una temperatura de referencia, para conocerla 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 (III)

## Termopares

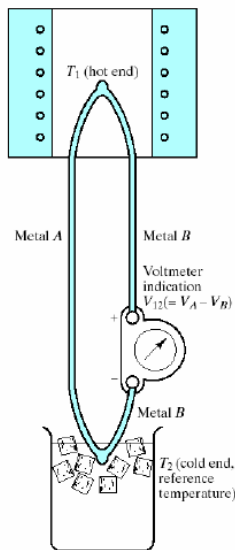


Characteristics of Thermocouple Types

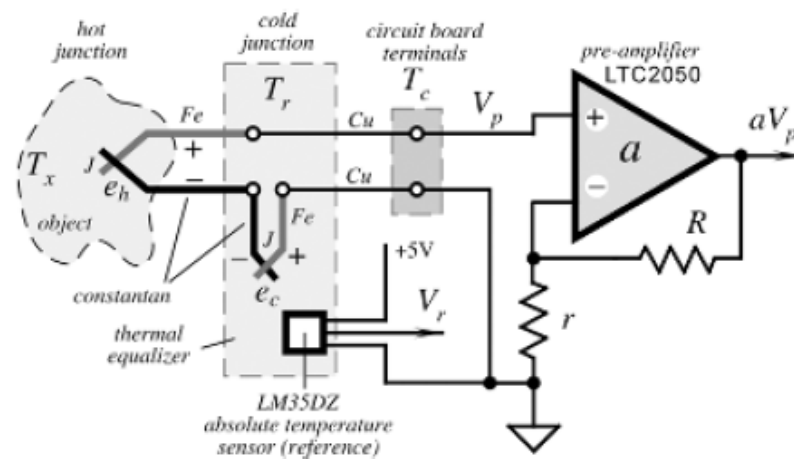
Junction Materials	Sensitivity (at 25°C) ( $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ )	Temperature Range ( $^\circ\text{C}$ )	Applications	Designation
Copper/constantan	40.9	-270 to 600	Oxidation, reducing, inert, vacuum; preferred below 0°C; moisture resistant	T
Iron/constantan	51.7	-270 to 1000	Reducing and inert 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		

# SENSORES TERMOELÉCTRICOS (IV)

**Acondicionamiento:** compensación de la temperatura de la unión de referencia  
+ gran amplificación



Control de la temperatura de referencia

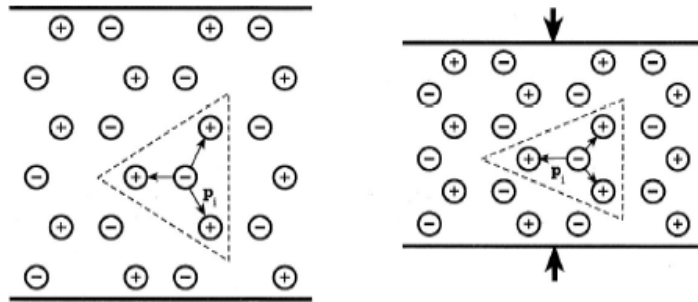


Compensación eléctrica de la temperatura de referencia

**Aplicaciones:** medida de la temperatura

# SENSORES PIEZOELECTRICOS (I)

**Efecto piezoeléctrico:** (reversible) Generación de carga eléctrica en un material cristalino por la aplicación de una tensión mecánica



En un material piezoeléctrico la tensión mecánica produce una redistribución de cargas que da lugar a un dipolo eléctrico neto y en consecuencia un voltaje.

## Ecuaciones piezoeléctricas

$$[S_i] = [s_{ij}] \cdot [T_j] + [d_{ik}] \cdot [E_k]$$

$$[D_l] = [\epsilon_{lm}] \cdot [E_m] + [d_{ln}] \cdot [T_n]$$

$$j, n = 1, \dots, 6$$

$$i, k, l, m = 1, 2, 3$$

$$g_{ij} = \frac{d_{ij}}{\epsilon_i}$$

$$h_{ij} = \frac{g_{ij}}{s_i}$$

$$k_{ij} = \sqrt{d_{ij} \cdot h_{ij}}$$

[S<sub>i</sub>]: deformación

[D<sub>l</sub>]: vector desplazamiento  $D = \epsilon_0 E + P$

[E<sub>m</sub>]: campo eléctrico

[T<sub>n</sub>]: tensión mecánica (F/S)

[s<sub>ij</sub>]: complianza (inversa de módulo de Young)

[ε<sub>lm</sub>]: permitividad dieléctrica

[d<sub>ik</sub>]: constantes piezoeléctricas (carga por unidad de fuerza)

g<sub>ij</sub>: coeficientes g (campo eléctrico por unidad de presión)

h<sub>ij</sub>: coeficientes h (campo eléctrico por unidad de deformación)

k<sub>ij</sub>: coeficientes k de acoplamiento

# SENSORES PIEZOELÉCTRICOS (II)

## Materiales piezoeléctricos:

Cristales: cuarzo, sal de Rochelle, sulfato de triglicina

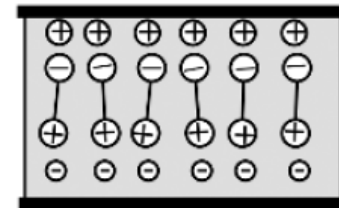
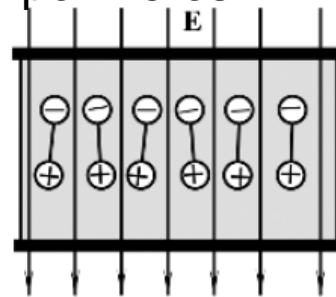
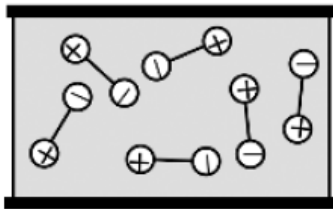
Cerámicas: titanato de bario, titanato-zirconato de plomo,

Polímeros: polifluoruro de polivinilideno

Properties of Piezoelectric Materials at 20°C

	PVDF	BaTiO <sub>3</sub>	PZT	Quartz	TGS
Density ( $\times 10^3$ kg/m <sup>3</sup> )	1.78	5.7	7.5	2.65	1.69
Dielectric constant, $\epsilon_r$	12	1700	1200	4.5	45
Elastic modulus ( $10^{10}$ N/m)	0.3	11	8.3	7.7	3
Piezoelectric constant (pC/N)	$d_{31} = 20$ $d_{32} = 2$ $d_{33} = -30$	78	110	2.3	25
Pyroelectric constant ( $10^{-4}$ C/m <sup>2</sup> K)	4	20	27	—	30
Electromechanical coupling constant (%)	11	21	30	10	—
Acoustic impedance ( $10^6$ kg/m <sup>2</sup> s)	2.3	25	25	14.3	—

## Fabricación de cerámicas y polímeros



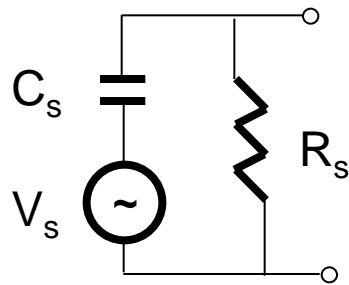
(A) Material calentado a  $T > T_c$

(B) Polarización con elevado E

(C) Material polarizado pero neutralizado en carga

# SENSORES PIEZOELÉCTRICOS (III)

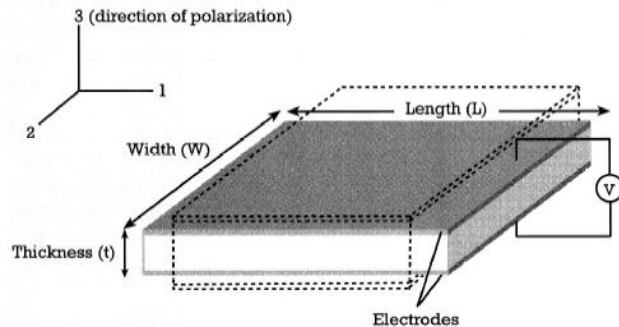
## Circuito equivalente



$$V_s = \frac{Q}{C_s} = \frac{P.A}{C_s} = \frac{d_{33} \cdot [F / (W.L)] \cdot (W.L)}{\epsilon(W.L/t)}$$

$$C_s = \epsilon \frac{W.L}{t}$$

$$R_s = \rho \frac{t}{W.L}$$



$$V_m = d_{31} \frac{F}{\epsilon L}$$

$$V_m = d_{31} \frac{F}{\epsilon W}$$

$$V_m = d_{33} F \frac{t}{\epsilon L W}$$

Para fuerzas aplicada en las direcciones de L,W o t respectivamente

**Acondicionamiento:** amplificador de carga o de tensión con alta impedancia de entrada

**Aplicaciones:** medida de fuerza, presión, aceleración,  
**ultrasonidos** (distancia, velocidad, densidad...)  
 posicionamiento en microscopios, láser, etc



# SENSORES PIROELÉCTRICOS (I)

**Efecto piroeléctrico:** Aparición de cargas superficiales en una dirección determinada cuando un material piroeléctrico experimenta un cambio de temperatura.

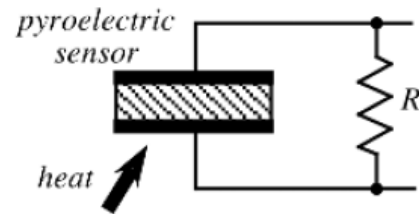
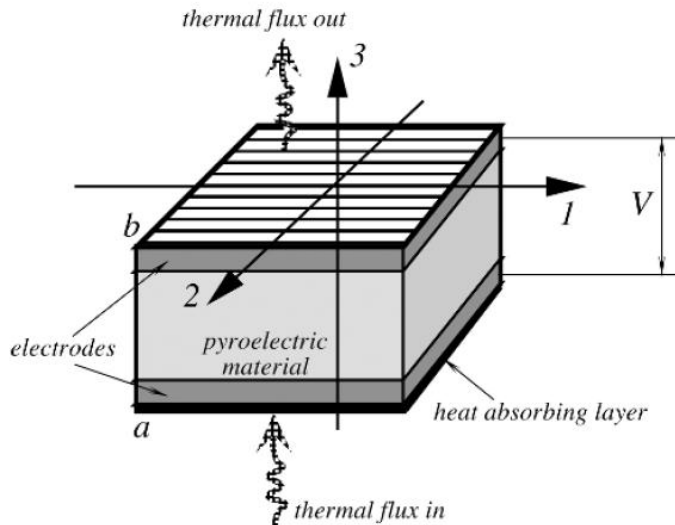
$$\Delta \vec{P} = \vec{p} \Delta T$$

P: vector polarización

p: coeficientes piroeléctricos

T: temperatura

- El cambio en la temperatura puede causar alargamiento o acortamiento de los dipolos individuales (piezoelectricidad primaria)
- La expansión térmica puede generar deformaciones y como resultado del efecto piezoelectrico aparece polarización (piezoelectricidad secundaria)



# SENSORES PIROELÉCTRICOS (II)

## Materiales piroeléctricos:

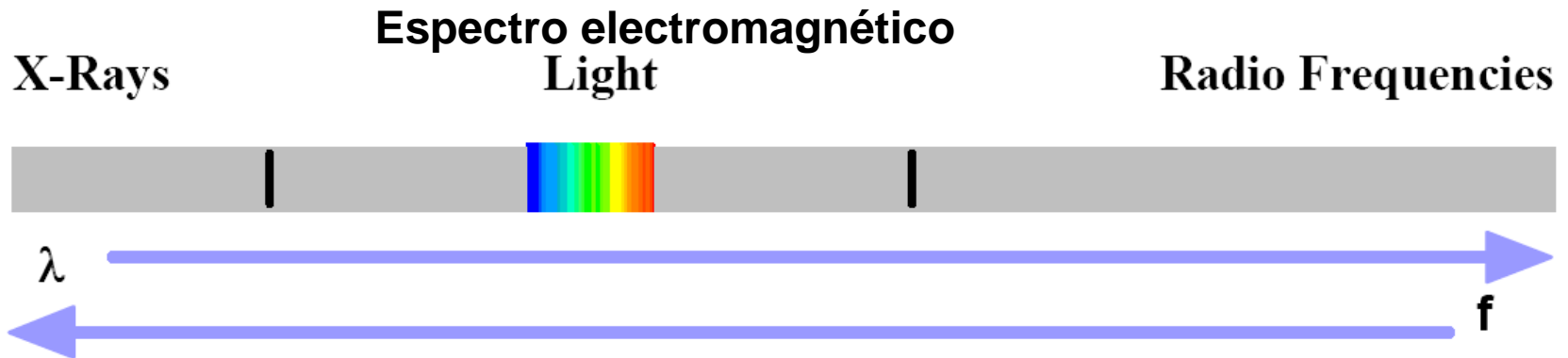
Physical Properties of Pyroelectric Materials

Material	Curie Temperature (°C)	Thermal Conductivity (W/mK)	Relative Permittivity ( $\epsilon_r$ )	Pyroelectric Charge Coeff. (C/m <sup>2</sup> K)	Pyroelectric Voltage Coeff. (V/mK)	Coupling, $k_p^2$ (%)
Single Crystals						
TGS	49	0.4	30	$3.5 \times 10^{-4}$	$1.3 \times 10^6$	7.5
LiTaO <sub>3</sub>	618	4.2	45	$2.0 \times 10^{-4}$	$0.5 \times 10^6$	1.0
Ceramics						
BaTiO <sub>3</sub>	120	3.0	1000	$4.0 \times 10^{-4}$	$0.05 \times 10^6$	0.2
PZT	340	1.2	1600	$4.2 \times 10^{-4}$	$0.03 \times 10^6$	0.14
Polymers						
PVDF	205	0.13	12	$0.4 \times 10^{-4}$	$0.40 \times 10^6$	0.2
Polycrystalline Layers						
PbTiO <sub>3</sub>	470	2	200	$2.3 \times 10^{-4}$	$0.13 \times 10^6$	0.39
		(monocrystal)				

*Note:* The above figures may vary depending on manufacturing technologies.

*Source:* From Meixner, H., Mader, G., and Kleinschmidt, P. Infrared sensors based on the pyroelectric polymer polyvinylidene fluoride (PVDF). *Siemens Forsch. Entwickl. Ber. Bd.* 15(3), 105–114, 1986.

# FOTODETECTORES



**TÉRMICOS:** luz  $\rightarrow$  calor  $\rightarrow \Delta T$

☺ para todas las  $\lambda$

☹ muy lentos, muy poca sensibilidad

## FOTOELÉCTRICOS

**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

# RADIACIÓN TÉRMICA

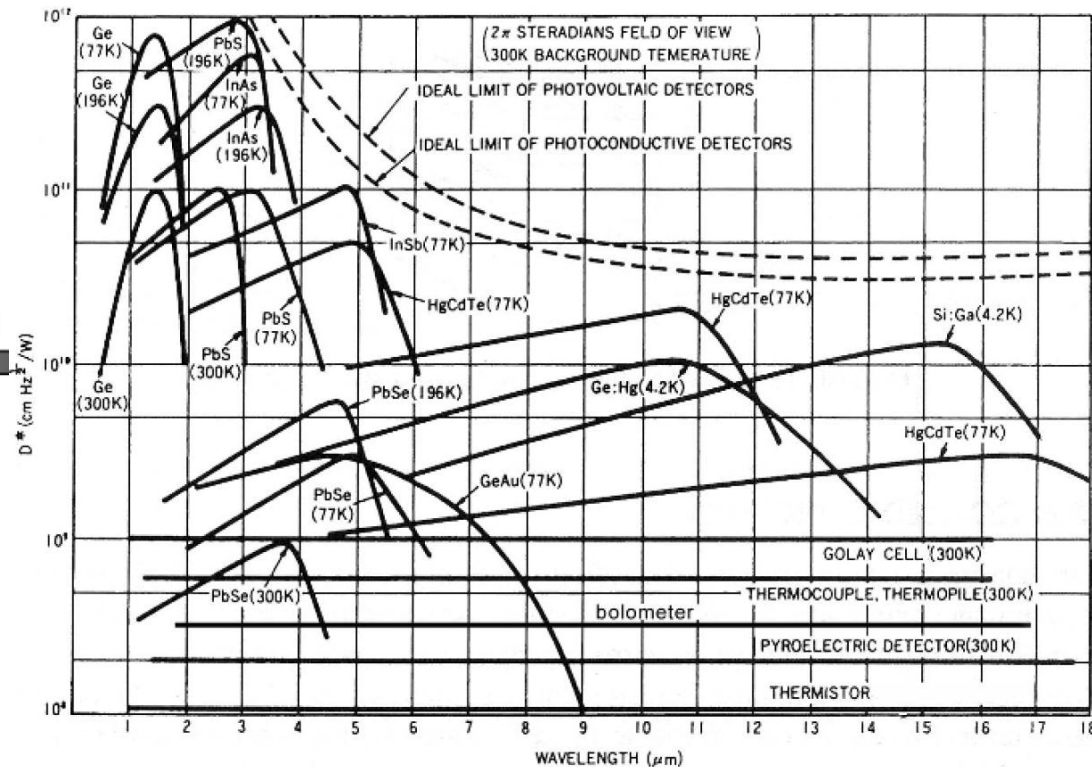
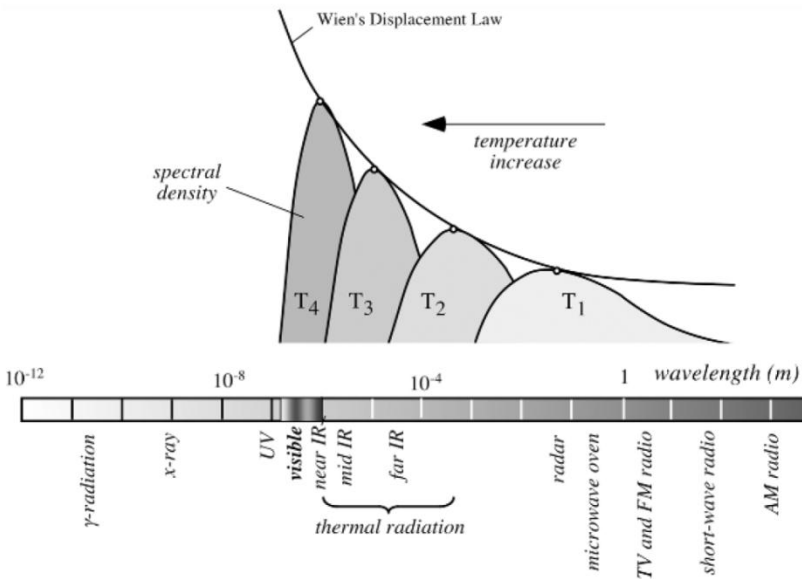
**Ley de Planck**, para la densidad de flujo radiante  $W_\lambda$

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

**Ley de Wien**: máximo de  $W_\lambda$

$$\lambda_m = \frac{2898}{T(K)} \mu m$$

$T=300\text{ K} \rightarrow \lambda_m=9,6\mu m$  (infrarrojo)



# DETECTORES FOTOELÉCTRICOS

## FOTOMULTIPLICADORES

### Efecto fotoeléctrico

Generación de portadores libres cuando incide un fotón de suficiente energía para arrancar electrones de la superficie de un conductor

$$h\nu = \phi + K_m$$

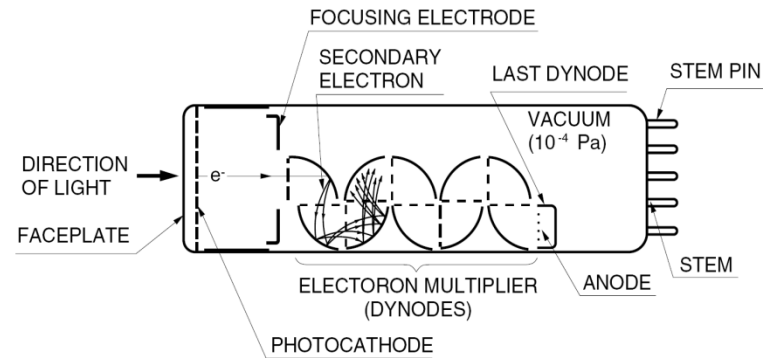
$h\nu$ : energía del fotón

$h$ : constante de Planck ( $4,135 \times 10^{-15}$  eV.s)

$\nu$ : frecuencia de la luz

$\phi$ : función trabajo de la superficie emisora

$K_m$ : energía cinética máxima del electrón



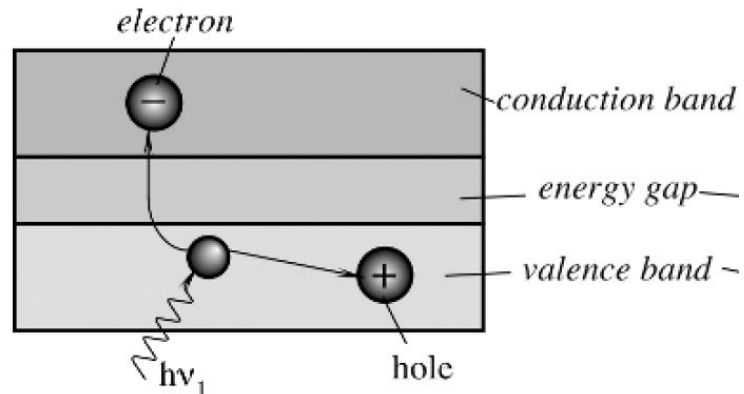
## FOTODETECTORES DE SEMICONDUCTOR

Portadores excitados de la banda de valencia a la de conducción permanecen en el semiconductor

$$h\nu > E_g$$

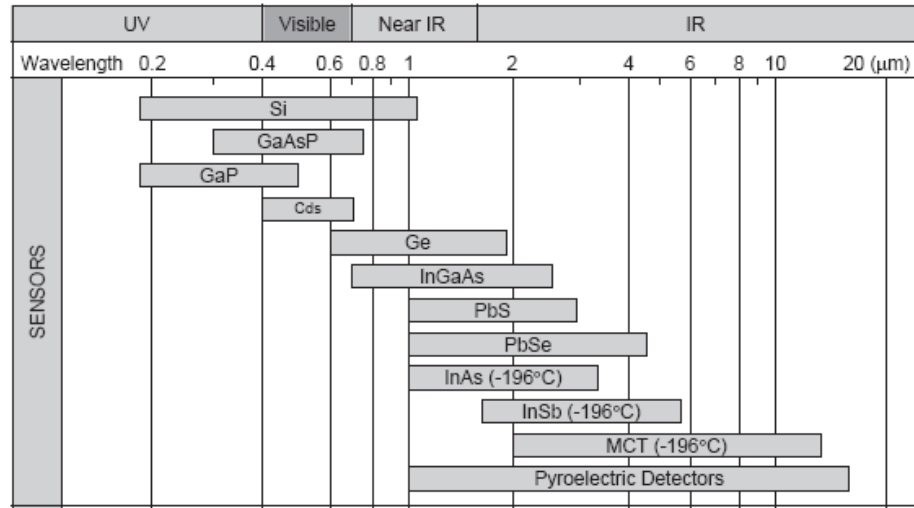
$E_g$ : energía del gap

$$\lambda_{\max} = \frac{h.c}{E_g} = \frac{1,24}{E_g (eV)} \mu m$$



# Materials

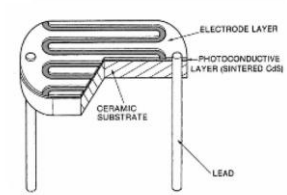
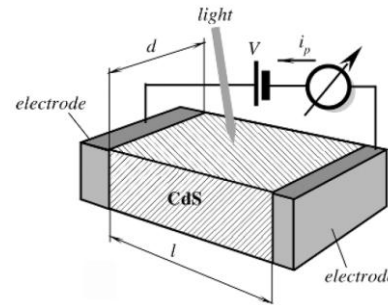
Material	Band Gap (eV)	Longest Wavelength (μm)
ZnS	3.6	0.345
CdS	2.41	0.52
CdSe	1.8	0.69
CdTe	1.5	0.83
Si	1.12	1.10
Ge	0.67	1.85
PbS	0.37	3.35
InAs	0.35	3.54
Te	0.33	3.75
PbTe	0.3	4.13
PbSe	0.27	4.58
InSb	0.18	6.90



# DISPOSITIVOS FOTOELÉCTRICOS

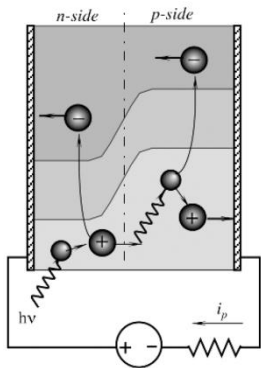
## Foto-resistencias

- Buena sensibilidad en el rango visible.
- Muy usado para detección de luz ambiente y marcas de colores.

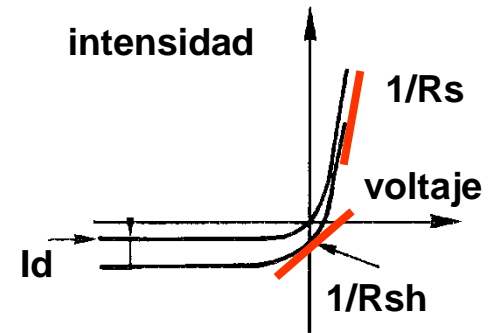
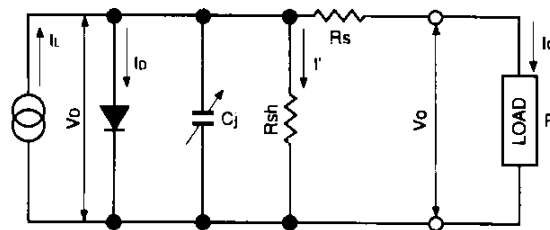


## Foto-diodos

- Usado en aplicaciones que requieren un tiempo de respuesta muy rápido o una respuesta lineal para cambios de luz de varios órdenes de magnitud

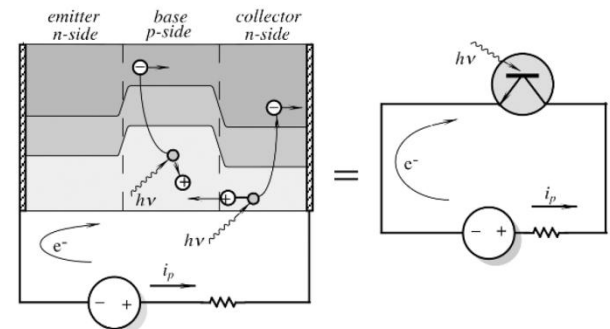


### Circuito equivalente



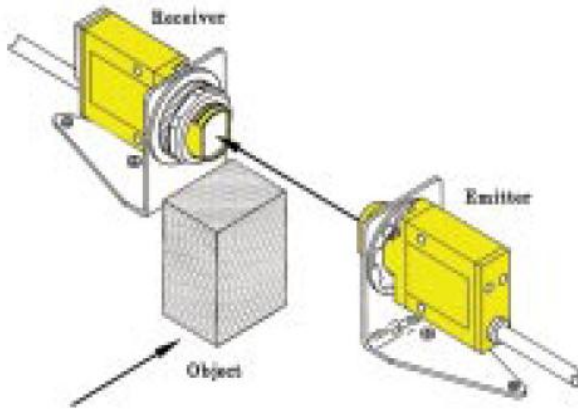
## Foto-transistores

- Buen compromiso entre sensibilidad y velocidad de respuesta.
- Muy usado como elemento fotodetector en aplicaciones industriales.

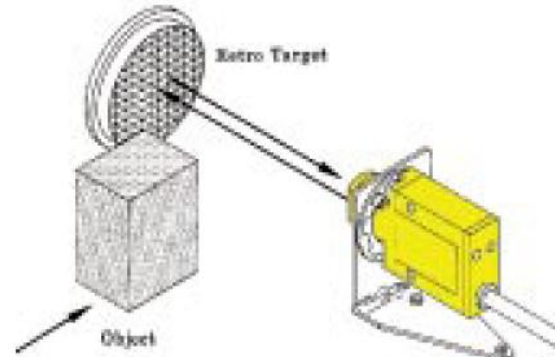


# Aplicaciones

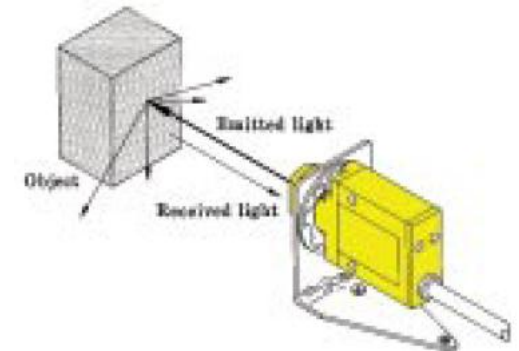
Opposed sensing mode.



Retroreflective sensing mode.

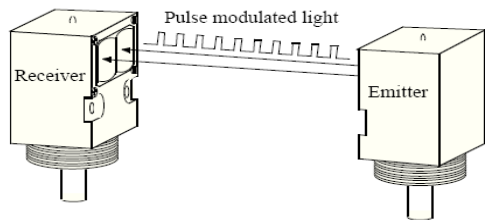


Diffuse sensing mode.

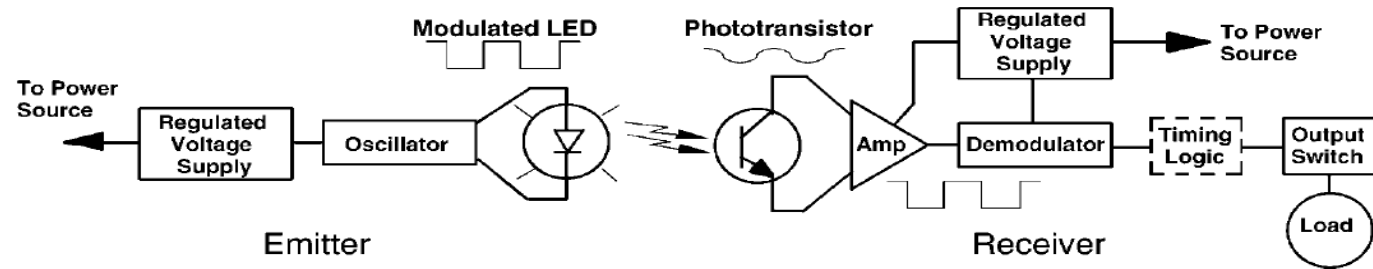


El efecto de la luz ambiental se puede eliminar con señales pulsadas

A modulated (pulsed) light source.

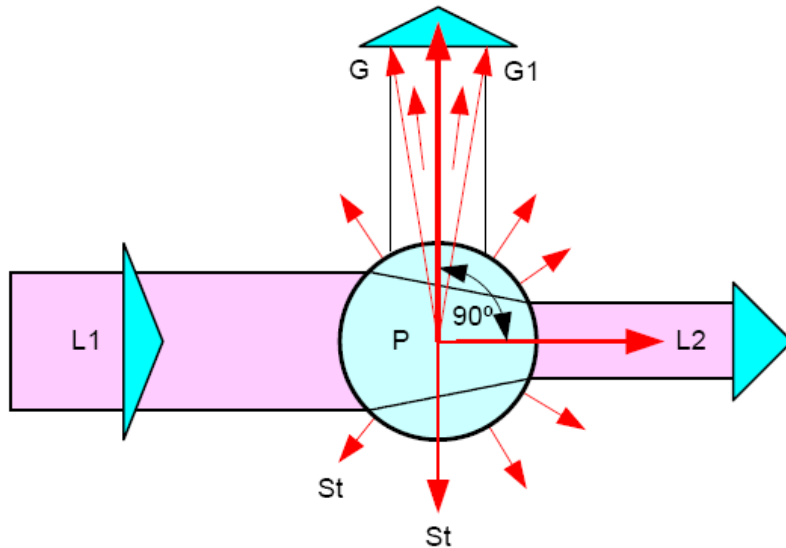


A modulated photoelectric control.





# Medidor de turbidez



## Principio de medida

L1 = Haz de luz incidente sobre la muestra

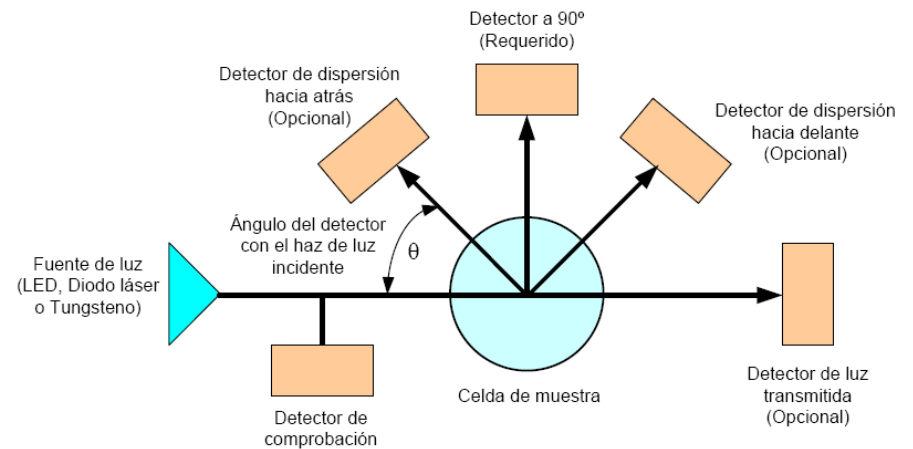
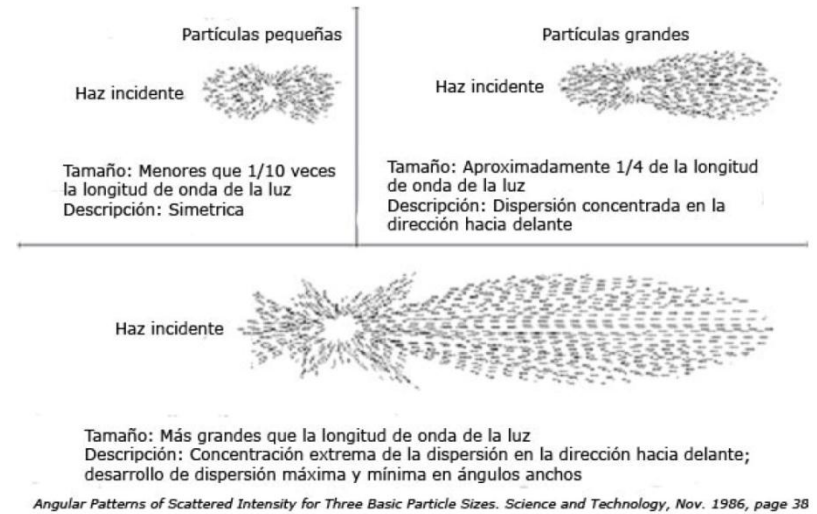
L2 = Haz de luz que ha pasado a través de la muestra

P = Muestra

St = Luz difundida por las partículas

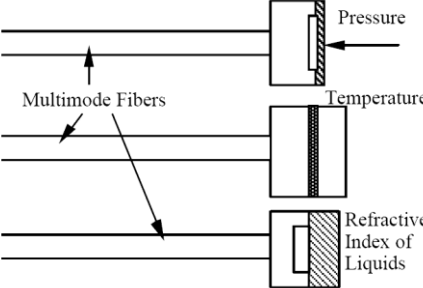
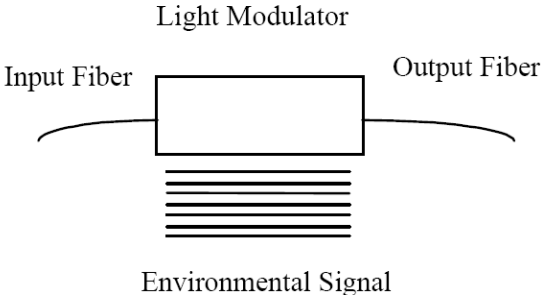
G, G1 = Rayos periféricos del haz de luz difundida usados para la medida

## Efectos de la luz al atravesar la muestra

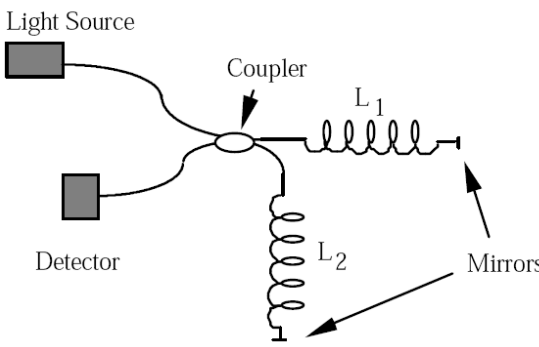


Nefelómetro fotoeléctrico (de haz simple) con detectores opcionales para determinación de turbidez por relación, dispersión hacia atrás o transmisión

# SENSORES DE FIBRA ÓPTICA



## Interferómetros



*Methane gas infrared absorption spectrum*

