



E.U.I.T.I.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

DPTO. ELECTRÓNICA, AUTOMÁTICA E INFORMÁTICA INDUSTRIAL

# INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

## TRANSPARENCIAS TEMA 4: Sensores Generadores

## *Sensores generadores. Objetivos*

- Conocer el funcionamiento y limitaciones de los principales sensores generadores.
- Distinguir los distintos efectos termoeléctricos.
- Conocer y aplicar las leyes de los termopares.
- Plantear los efectos producidos en los sensores generadores como posibles interferencias.

## **Sensores generadores. Introducción**

- Son sensores que generan una señal eléctrica a partir de la magnitud medida, sin alimentación.
- Se basan en efectos físicos reversibles, por lo que puede encontrarse el accionador “dual”.
- Estos efectos, si se producen de forma involuntaria, se convierten en posibles interferencias.

## **Sensores generadores**

1. Termopares.
2. Sensores piezoeléctricos.
3. Sensores piroeléctricos.
4. Sensores fotovoltaicos.
5. Sensores electromagnéticos.
  1. Tacómetros de alterna.
  2. Sensores de velocidad lineal.
  3. Caudalímetros.
  4. Sensores de Efecto Hall.

## *Sensores generadores*

1. Termopares.
2. Sensores piezoeléctricos.
3. Sensores piroeléctricos.
4. Sensores fotovoltaicos.
5. Sensores electromagnéticos.
  1. Tacómetros de alterna.
  2. Sensores de velocidad lineal.
  3. Caudalímetros.
  4. Sensores de Efecto Hall.

## *Termopares.*

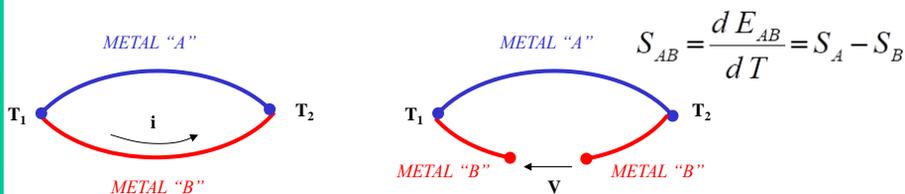
- Un termopar es un sensor para la medida de la temperatura.
- En algunos textos encontramos “termocupla”, por traducción del inglés.
- Está formado por dos conductores distintos.
- Están unidos térmicamente en sus extremos.
- Su funcionamiento se explica mediante los efectos termoeléctricos.



## Termopares.(II)

### Efecto Seebeck

- En 1822, Seebeck observó que en un circuito con dos conductores distintos aparece una corriente eléctrica si sus uniones están a distinta temperatura.
- Si abrimos el circuito obtenemos una f.t.e.m.  $E_{AB}$ , que se debe a los efectos Peltier y Thompson.
- Este conjunto se denomina termopar.



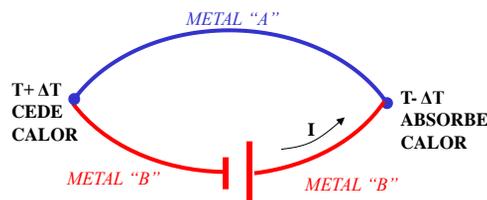
7

## Termopares. (III)

### Efecto Peltier

- Descubierta por Jean Peltier en 1834.
- Se manifiesta como calentamiento o enfriamiento de una unión de dos metales distintos al pasar corriente por ella.

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

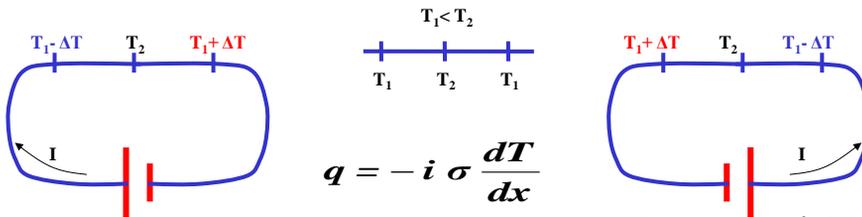


8

## Termopares.(IV)

### Efecto Thompson

- A mediados del XIX, William Thompson (Lord Kelvin) descubrió el intercambio de calor de un conductor con temperatura no homogénea al paso de una corriente.
- El calor es proporcional a la corriente, no a su cuadrado.



9

## Termopares.(V)

### Justificación

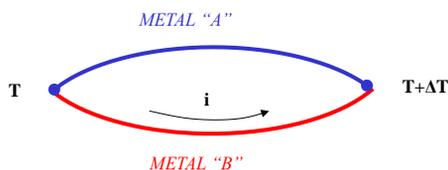
- Si  $i$  es muy pequeña, podemos despreciar el efecto Joule y considerar sólo los efectos termoeléctricos. Así:

**energía termoelectromotriz = energía térmica neta**

$$\frac{d E_{AB}}{d T} \Delta T = \pi_{AB} (T + \Delta T) - \pi_{AB} (T) + (\sigma_B - \sigma_A) \Delta T$$

**Dividimos entre  $\Delta T$  y pasamos al límite cuando  $\Delta T \rightarrow 0$**

$$\frac{d E_{AB}}{d T} = \frac{d \pi_{AB}}{d T} + \sigma_B - \sigma_A$$



10

## Termopares. (VI)

### Tipos de Termopares

- Se emplean aleaciones para que tengan las propiedades deseadas (linealidad, resistencia, etc.)

TIPO	COMPOSICIÓN		MARGEN HABITUAL	mV/MARGEN
B	Pt (6%)/Rodio	Pt (30%)/Rodio	38 a 1800°C	13,6
C	W (5%)/Renio	W (26%)/Renio	0 a 2300°C	37,0
E	Cromel	Constantan	0 a 982°C	75,0
J	Hierro	Constantan	0 a 760°C	42,9
K	Cromel	Alumel	-184 a 1260°C	56,0
N	Nicrosil	Nisil	-270 a 1300°C	51,8
R	Pt (13%)/Rodio	Pt	0 a 1593°C	18,7
S	Pt (10%)/Rodio	Pt	0 a 1538°C	16,0
T	Cobre	Constantan	-184 a 400°C	26,0

#### Compuestos:

- Cromel: Ni(90%)/Cr(10%)
- Constantán: Ni(45%)/Cr(55%)
- Alumel: Ni/Al/Mn/Si
- Nicrosil: Ni/Cr/Si
- Nisil: Ni/Si/Mg

## Termopares. (VII)

### Tabulación de valores

- La salida cuando la unión de referencia está a 0 °C está tabulada. Ejº: tabla de salida para tipo J.

Grados	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,000	0,050	0,101	0,151	0,202	0,253	0,303	0,354	0,405	0,456
10	0,507	0,558	0,609	0,660	0,711	0,762	0,813	0,865	0,916	0,967
20	1,019	1,070	1,122	1,174	1,225	1,277	1,329	1,381	1,432	1,484
30	1,536	1,588	1,640	1,693	1,745	1,797	1,849	1,901	1,954	2,006
40	2,058	2,111	2,163	2,216	2,268	2,321	2,374	2,426	2,479	2,532
50	2,585	2,638	2,691	2,743	2,796	2,849	2,902	2,956	3,009	3,062
60	3,115	3,168	3,221	3,275	3,328	3,381	3,435	3,488	3,542	3,595
70	3,649	3,702	3,756	3,809	3,863	3,917	3,971	4,024	4,078	4,132
80	4,186	4,239	4,293	4,347	4,401	4,455	4,509	4,563	4,617	4,671
90	4,725	4,780	4,834	4,888	4,942	4,996	5,050	5,105	5,159	5,213
100	5,268	5,322	5,376	5,431	5,485	5,540	5,594	5,649	5,703	5,758

Temperaturas en Celsius (Margen: 0° - 109 °) . Tensiones en milivoltios.

## Termopares. (VIII)

### Aproximaciones polinómicas

- En un sistema de medida automático podemos utilizar un polinomio que aproxime la tabla del termopar ( $T = a_0 + a_1 V + a_2 V^2 + \dots$ )

Coefficientes	Tipo E -100/1000°C ± 0,5°C	Tipo J 0/760°C ± 0,1°C	Tipo K 0/1370°C ± 0,7°C	Tipo R 0/1000°C ± 0,5°C	Tipo S 0/1750°C ± 1°C	Tipo T -160/400°C ± 0,5°C
$a_0$	0,1049673	-0,0488683	0,2265846	0,2636329	0,9277632	0,1008609
$a_1$	17189,453	19873,145	24152,109	179075,491	169526,51	25727,944
$a_2$	-282639,08	-218614,54	67233,425	-48840341,37	-31568364	-767345,83
$a_3$	12695339,5	11569199,8	2210340,7	1,90002E + 10	8990730663	78025596
$a_4$	-448703085	-264917531	-860963915	-4,8270E + 12	-1,6356E + 12	-9247486589
$a_5$	1,1086E+ 10	2018441314	4,83506E+ 10	7,62091E+ 14	1,88027E + 14	6,97688E + 11
$a_6$	-1,76807E+11		-1,18452E+12	-7,20026E+16	-1,3724E + 16	-2,6619E + 13
$a_7$	1,71842E + 12		1,38690E + 13	3,71496E + 18	6, 1750E + 17	3,9408E + 14
$a_8$	-9, 19278E + 12		-6,33708E + 13	-8,03104E + 19	-1,56105E + 19	
$a_9$	2,06132E + 1				1,69535E +20	

13

## Termopares. (IX)

### Tipos de unión y de encapsulado

– Unión:

- Unión soldada
- Unión soldada
- Hilo trenzado



a)



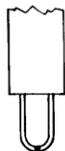
b)



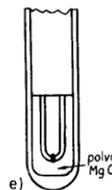
c)

– Encapsulado

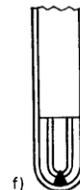
- Termopar expuesto
- Encapsulado
- Unido a la cubierta



d)



e)



f)

14

## Termopares. (X)

### Leyes de los termopares

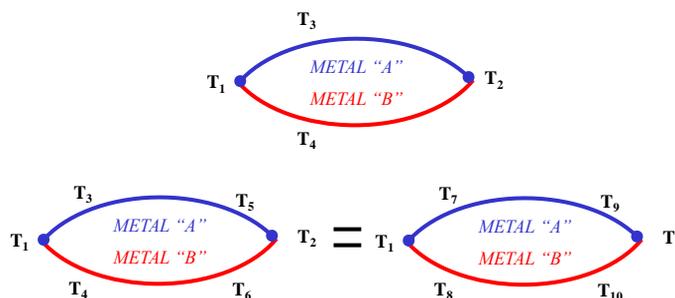
- El funcionamiento de los termopares se rige por una serie de leyes que determinan cómo se mide con ellos.
- Estas leyes han sido verificadas experimentalmente.
- Son tres:
  - Ley de los circuitos homogéneos.
  - Ley de los metales intermedios.
  - Ley de las temperaturas sucesivas.

15

## Termopares. (XI)

### Ley de los circuitos homogéneos

- En un circuito de un único metal homogéneo, no se puede mantener una corriente termoeléctrica mediante la aplicación exclusiva de calor aunque se varíe la sección transversal de éste.

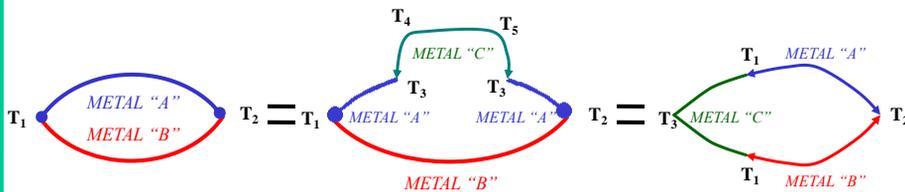


16

## Termopares. (XII)

### Ley de los metales intermedios

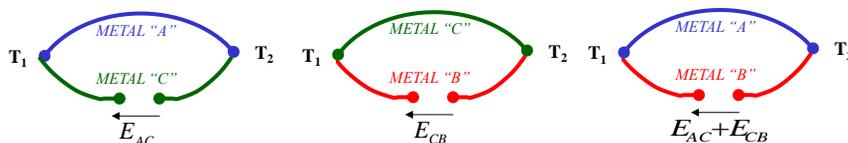
- La suma algebraica de la f.t.e.m. en un circuito compuesto de un número cualquiera de metales distintos es cero si todo el circuito está a una temperatura uniforme.



## Termopares. (XIII)

### Ley de los metales intermedios (II)

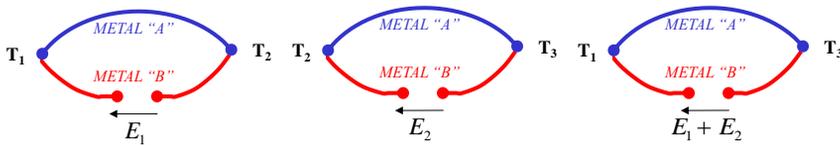
- Corolario: si se conoce la relación térmica entre dos metales distintos con un tercero, se puede encontrar la relación entre los dos primeros.



## Termopares. (XIV)

### Ley de las temperaturas intermedias

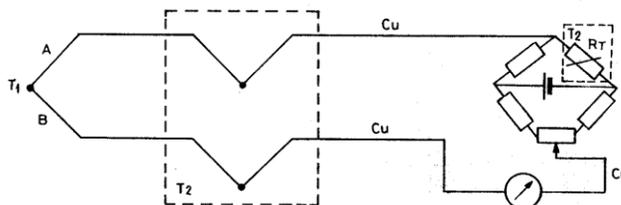
- Si dos metales distintos y homogéneos producen una f.t.e.m.  $E_1$  si las uniones están a  $T_1$  y  $T_2$ , y una f.t.e.m.  $E_2$  cuando están a  $T_2$  y  $T_3$ , se cumple que cuando las uniones estén a  $T_1$  y  $T_3$  la f.t.e.m. será  $E_1 + E_2$



## Termopares. (XV)

### Compensación de la unión de referencia

- Mantener la unión fría a  $0^{\circ}\text{C}$  u otra temperatura constante es difícil y costoso.
- La solución es dejar la unión de referencia a temperatura ambiente, y medir dicha temperatura para después añadir la tensión necesaria al conjunto.



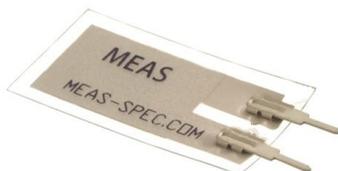
## *Sensores generadores*

1. Termopares.
2. Sensores piezoeléctricos.
3. Sensores piroeléctricos.
4. Sensores fotovoltaicos.
5. Sensores electromagnéticos.
  1. Tacómetros de alterna.
  2. Sensores de velocidad lineal.
  3. Caudalímetros.
  4. Sensores de Efecto Hall.

## *Piezoeléctricos.*

### **Efecto piezoeléctrico**

- Descubierta por Jaques y Pierre Curie sobre 1880.
- Este efecto produce la aparición de polarización eléctrica al deformar un material y viceversa.
- Es reversible (actuadores piezoeléctricos).
- Se rige por las ecuaciones piezoeléctricas.



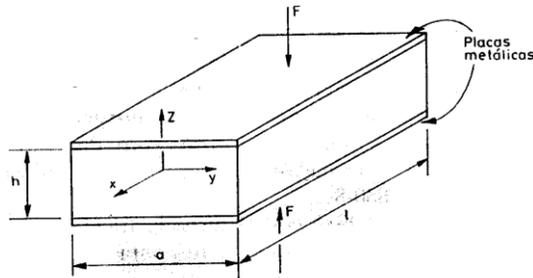
## Piezoeléctricos. (II)

### Ecuaciones piezoeléctricas:

- Para el material piezoeléctrico entre dos placas metálicas como en la figura:

$$\mathbf{D} = \mathbf{d} \mathbf{T} + \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{E}$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{s}^E \mathbf{T} + \mathbf{d}' \mathbf{E}$$



## Piezoeléctricos. (III)

### Ecuaciones piezoeléctricas (II)

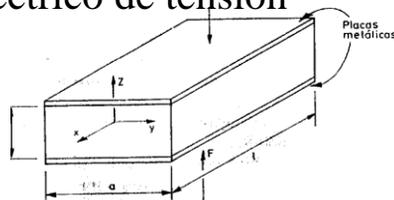
- Si despejamos E:

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{D} - \mathbf{d}\mathbf{T}}{\boldsymbol{\varepsilon}^T} = \frac{1}{\boldsymbol{\varepsilon}^T} \mathbf{D} - \frac{\mathbf{d}}{\boldsymbol{\varepsilon}^T} \mathbf{T} = \frac{1}{\boldsymbol{\varepsilon}^T} \mathbf{D} - \mathbf{g} \mathbf{T}$$

- Si despejamos T:

$$\mathbf{T} = \frac{\mathbf{S} - \mathbf{d}\mathbf{E}}{\mathbf{s}^E} = \frac{1}{\mathbf{s}^E} \mathbf{S} - \frac{\mathbf{d}}{\mathbf{s}^E} \mathbf{E} = \frac{1}{\mathbf{s}^E} \mathbf{S} - \mathbf{e} \mathbf{E}$$

- g es el coeficiente piezoeléctrico de tensión
- e es el coeficiente piezoeléctrico de esfuerzo



## Piezoeléctricos. (IV)

### Matriz de ecuaciones piezoeléctricas

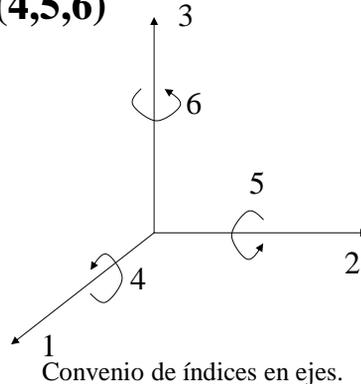
- En el caso de un sólido 3D, podemos tener esfuerzos de tracción y/o compresión (1,2,3)
- Y esfuerzos de cizalladura (4,5,6)
- Las ecuaciones quedarían:

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

$$[D_i] = [\varepsilon_{ik}] * [E_k] + [d_{ij}] * [T_j]$$

$$i, k = 1, 2, 3.$$

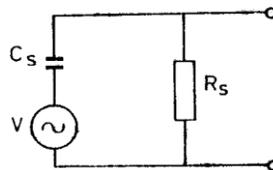
$$j = 1..6.$$



## Piezoeléctricos.(V)

### Circuito equivalente

- El circuito equivalente cuando medimos tensión está formado por una capacidad equivalente  $C_s$  y la resistencia de fugas  $R_s$ .

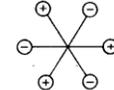


## Piezoeléctricos. (VI)

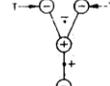
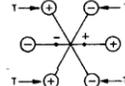
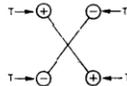
### Efecto de un esfuerzo según la simetría

- La piezoelectricidad se manifiesta en 20 de las 32 clases cristalográficas.
- Los cristales piezoeléctricos son anisótropos.

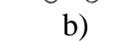
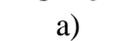
a) Simetría central: no se produce polarización.



b) Polarización paralela al esfuerzo.



c) Polarización perpendicular al esfuerzo.



## Piezoeléctricos. (VII)

### Aplicación a la medida

- Si cortocircuitamos las placas metálicas y aplicamos una fuerza  $F$  al sensor:

$F$  provoca una polarización:

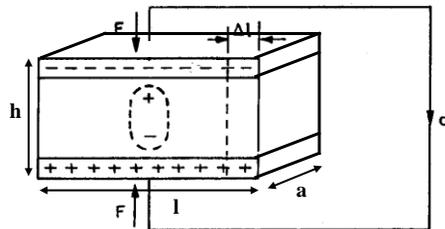
$$D = dT = d \frac{F}{ha}$$

La carga será:

$$q = Dla = lad \frac{F}{ha} = \frac{dl}{h} F$$

y la compresión:

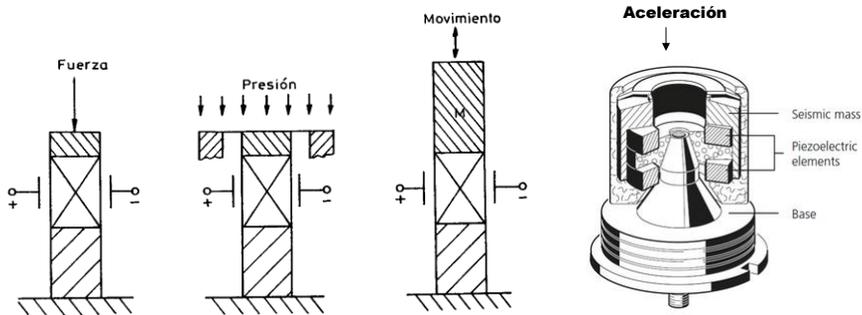
$$S = s^E T$$



## ***Piezoeléctricos. (VIII)***

### **Esquema de varios sensores**

- Para medir fuerza, presión, aceleración o deformación.



## ***Sensores generadores***

1. Termopares.
2. Sensores piezoeléctricos.
3. Sensores piroeléctricos.
4. Sensores fotovoltaicos.
5. Sensores electromagnéticos.
  1. Tacómetros de alterna.
  2. Sensores de velocidad lineal.
  3. Caudalímetros.
  4. Sensores de Efecto Hall.

## Piroeléctricos.

### Efecto piroeléctrico.

- El efecto piroeléctrico es análogo al piezoelectrico.
- Es la aparición de cargas superficiales en una dirección al cambiar de temperatura el material.
- Se describe mediante el coeficiente piroeléctrico:

$$\Delta \bar{P} = \bar{p} \Delta T, \quad \text{con } \bar{P} \equiv \text{polarización } \bar{p} \equiv \text{cte. piroeléctrico}$$

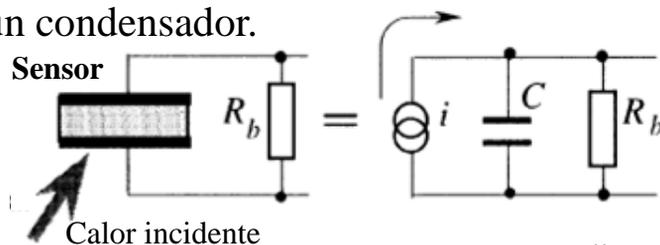


31

## Piroeléctricos. (II)

### Esquema y modelo.

- Se aplica a la detección de radiación térmica a temperatura ambiente.
- Con dos electrodos y el material se forma un condensador.
- El modelo sería un generador de corriente en paralelo a un condensador.



32

## Piroeléctricos. (III)

### Funcionamiento.

- La polarización produce carga en el condensador.
- Si su grosor  $b$  es pequeño para despreciar los gradientes de temperatura:

$$\Delta Q = A \Delta P = A p \Delta T \quad (A = \text{área})$$

$$V_0 = \frac{\Delta Q}{C} = \Delta Q \frac{b}{\epsilon A} = \frac{p b}{\epsilon} \Delta T$$

- Si la radiación es pulsante:

$$V_0 = R_v P_i = \frac{\alpha p}{C_E \epsilon A} \frac{\tau}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \left[ \frac{V}{W} \right] P_i$$

$$i_c = R_i P_i = \frac{\alpha p}{C_E b} \frac{\omega \tau}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \left[ \frac{A}{W} \right] P_i$$

## Sensores generadores

1. Termopares.
2. Sensores piezoeléctricos.
3. Sensores piroeléctricos.
4. Sensores fotovoltaicos.
5. Sensores electromagnéticos.
  1. Tacómetros de alterna.
  2. Sensores de velocidad lineal.
  3. Caudalímetros.
  4. Sensores de Efecto Hall.

## Fotovoltaicos.

### Efecto fotovoltaico.

- Produce un potencial cuando una radiación ioniza una zona con barrera de potencial (unión PN).
- Es como el efecto fotoeléctrico interno en el caso de que el semiconductor tenga una unión PN.



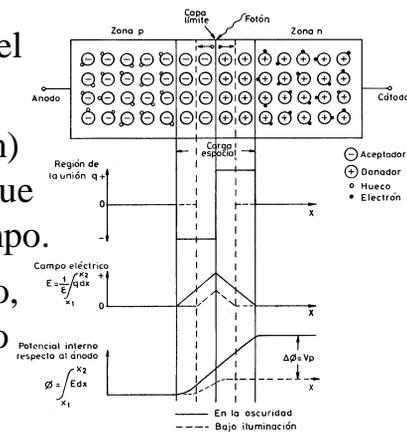
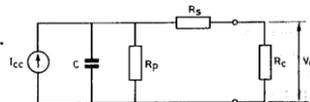
35

## Fotovoltaicos.

### Funcionamiento y modelo.

- En equilibrio, la difusión de portadores se ve contenida por el campo en la unión.
- Un aporte externo (ej. radiación) produce pares electrón-hueco que se desplazan por efecto del campo.
- Cambia el potencial de contacto, o aparece una corriente de corto proporcional a la radiación.

Modelo.



Funcionamiento del sensor.

36

## *Sensores generadores*

1. Termopares.
2. Sensores piezoeléctricos.
3. Sensores piroeléctricos.
4. Sensores fotovoltaicos.
5. Sensores electromagnéticos.
  1. Tacómetros de alterna.
  2. Sensores de velocidad lineal.
  3. Caudalímetros.
  4. Sensores de Efecto Hall.

## *Electromagnéticos.*

### **Sensores electromagnéticos**

- Son sensores en los que una magnitud física produce un cambio en un campo magnético o eléctrico, produciéndose una tensión o corriente.
- Están formados por circuitos eléctricos y/o magnéticos, pero no se produce cambios de inductancia o capacidad.

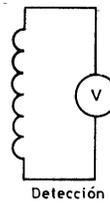
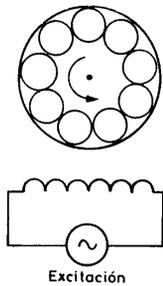
## Electromagnéticos. (II)

### Tacómetro de alterna

- Sensores similares a un generador eléctrico.
- Tienen dos devanados (de excitación y de detección) y un rotor tipo “jaula de ardilla”.

$$e = -N \frac{d\phi}{dt}$$

$$e = k \omega \omega_a \text{sen}(\omega t + \phi)$$

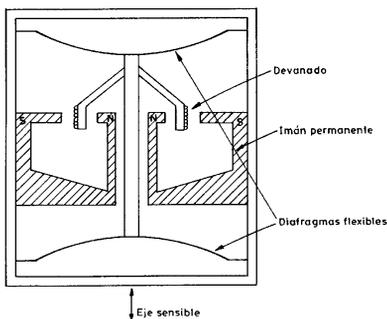


39

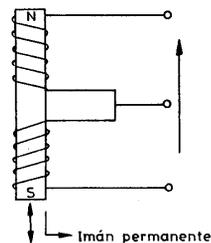
## Electromagnéticos. (III)

### Sensores de velocidad lineal

- Similar a un micrófono inductivo. Se cumple:  
 $e = B l v$



Sensor de devanado móvil.



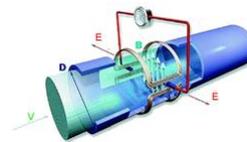
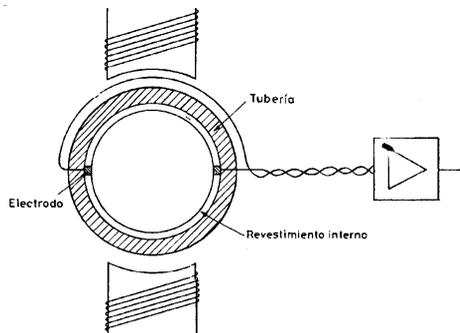
Sensor de núcleo móvil.

40

## *Electromagnéticos. (IV)*

### **Caudalímetro.**

- Para medir líquidos conductores.
- Se cumple:  $e = B l v$



41

## *Electromagnéticos. (V)*

### **Sensores de efecto Hall.**

- Descubierta por E.H. Hall en 1879.
- Comprobó que en un conductor o semiconductor por el que circula corriente y hay un campo magnético perpendicular a dicha corriente aparece una tensión eléctrica transversal.



42

## Electromagnéticos. (VI)

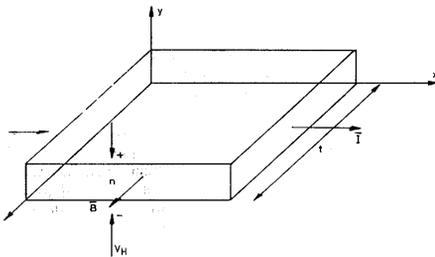
### Sensores de efecto Hall.

- Sobre el sensor aparece una fuerza de Lorentz:

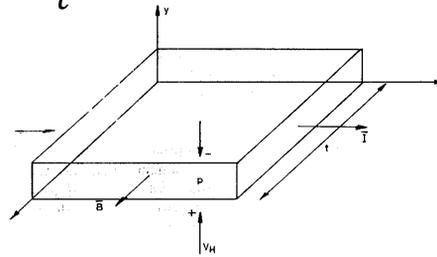
$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

- La acumulación de cargas produce una tensión:

$$V_H = A_H \frac{I B}{t}$$



Con semiconductor tipo N.



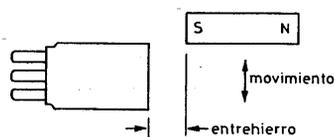
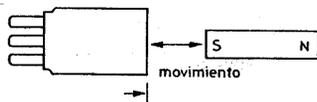
Con semiconductor tipo P.

43

## Electromagnéticos. (VII)

### Sensores de efecto Hall. Aplicaciones.

- Directas:
  - Medida de campos magnéticos (gaussímetros) y potencia (vatímetros).
- Indirectas:
  - Lineales: salida proporcional (ej: desplazamiento)
  - De conmutación: salida binaria (ej: detector de proximidad)



44