



# **SENSORES Y ACONDICIONADORES**

## **TEMA 9**

### **SENSORES GENERADORES**

**Profesores: Enrique Mandado Pérez**  
**Antonio Murillo Roldan**



## DEFINICIÓN

**Sensores que generan una señal eléctrica a partir de la magnitud que miden, sin necesidad de alimentarlos eléctricamente.**

## CONSIDERACIONES IMPORTANTES

- Se utilizan para medir muchas variables ordinarias como son la temperatura y la fuerza.
- Se basan en efectos reversibles y por ello pueden ser actuadores.
- Su acondicionamiento implica, en general, la utilización de amplificadores de continua especiales, cuyas características superan a las de los amplificadores operacionales de aplicación general (*General purpose operational amplifiers*).



## PRINCIPIOS FÍSICOS DE FUNCIONAMIENTO

Los principales sensores generadores se basan en los siguientes principios físicos:

- Termoelectricidad (*Thermoelectricity*).
- Piezoelectricidad (*Piezoelectricity*).
- Piroelectricidad (*Pyroelectricity*).
- Efecto fotovoltaico (*Photovoltaic effect*).
- Efecto electroquímico (*Electrochemical effect*).



## TERMOELECTRICIDAD

Se conocen tres efectos termoeléctricos:

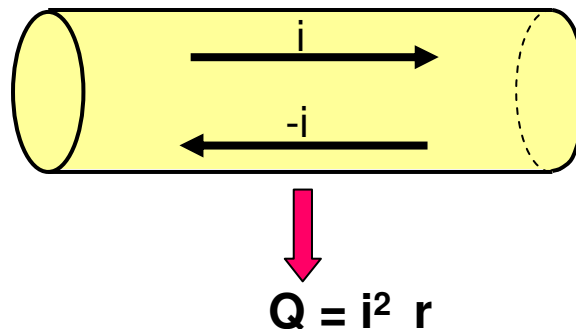


### EFFECTO JOULE (I)

Transformación de la energía eléctrica en calor en un conductor cuando circula una corriente eléctrica a través de él:

$$Q = i^2 r$$

en la que Q es el calor producido por unidad de tiempo

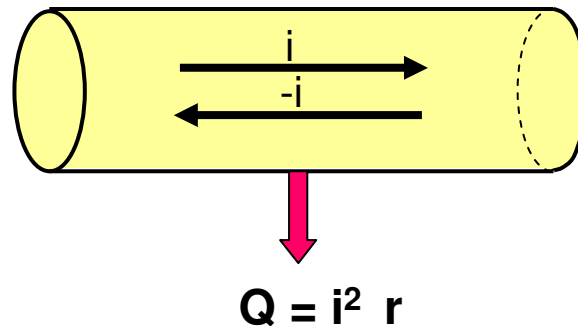




## TERMOELECTRICIDAD

### EFEECTO JOULE (II)

El efecto Joule es irreversible, es decir, no se puede invertir el sentido del calor al invertir el sentido de la intensidad y por lo tanto siempre se produce calor al circular una corriente independientemente del sentido de la misma.



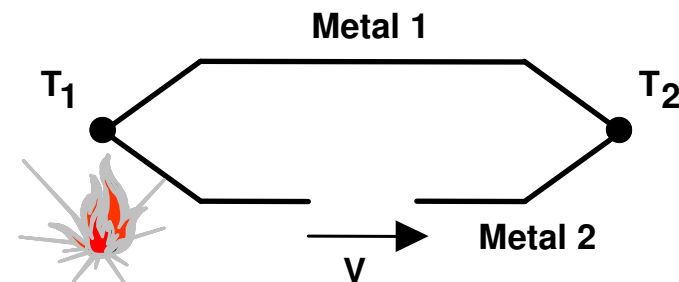
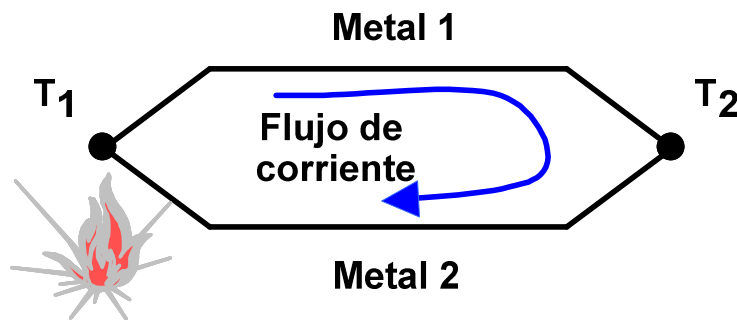


# TERMOELECTRICIDAD

## FUNDAMENTOS (I)

### EFEECTO SEEBECK

El efecto termoeléctrico generador fue descubierto en 1821 por *Thomas J. Seebeck* cuando observó que en un circuito cerrado formado por dos conductores distintos cuyas uniones se encuentran a dos temperaturas diferentes  $T_1$  y  $T_2$  se genera una corriente proporcional a  $T_1 - T_2$ . Al abrir el circuito se genera una tensión entre los extremos.





# **TERMOELECTRICIDAD**

## **FUNDAMENTOS (II)**

### **EFFECTOS PELTIER Y THOMPSON**

Posteriormente Peltier y Thompson descubrieron que dicha tensión se debía a la suma de dos efectos:

- Efecto Peltier entre dos metales distintos
- Efecto Thompson en un metal homogéneo

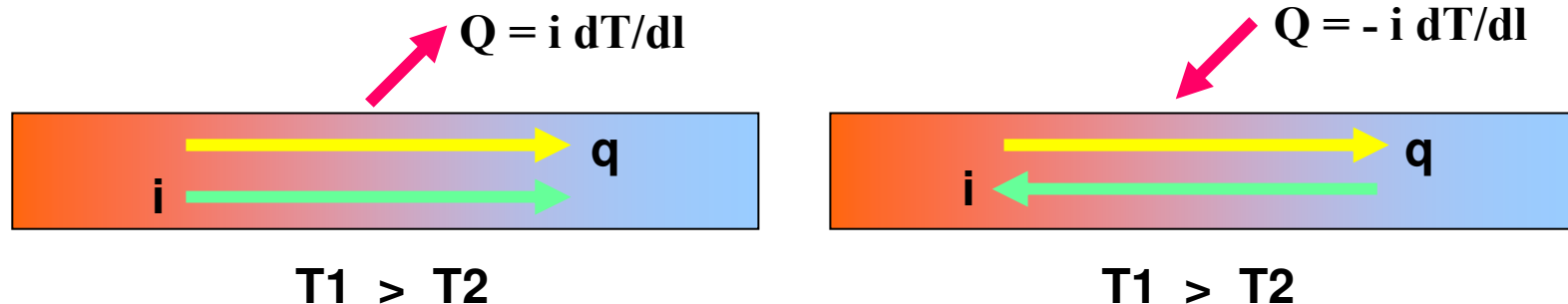
A diferencia del efecto Joule, los efectos Peltier y Thompson son reversibles.



# TERMOELECTRICIDAD

## EFEECTO THOMPSON (I)

Descubierto por Sir William Thompson (Lord Kelvin) en 1854. Consiste en la absorción o liberación de calor que se produce en un conductor homogéneo a través del cual circula una corriente eléctrica, cuando está sometido a dos temperaturas diferentes en dos puntos distintos. El calor liberado es proporcional a la corriente y cambia de sentido al hacerlo el sentido de la corriente.





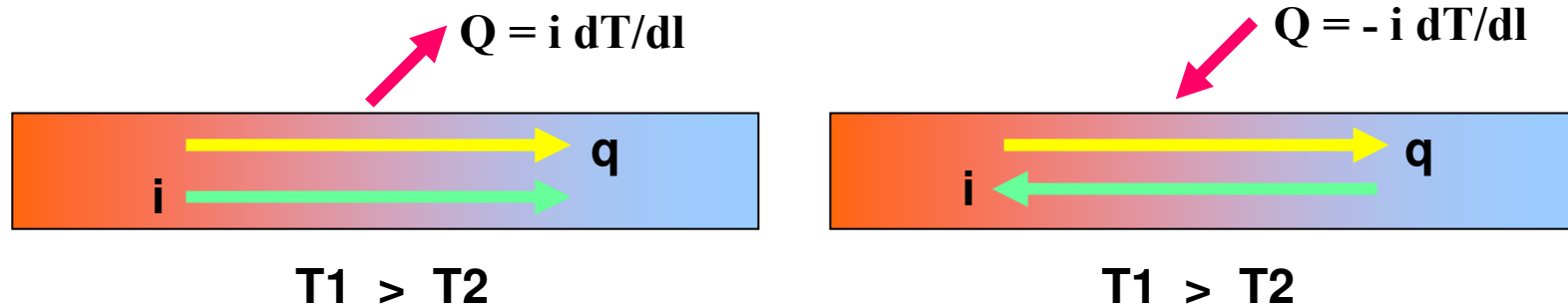


# TERMOELECTRICIDAD

## EFECTO THOMPSON (II)

Se absorbe calor cuando la corriente circula del punto mas frío al mas caliente, y se libera calor cuando la intensidad circula del punto más caliente al más frío.

Regla: Si los flujos térmico y eléctrico son opuestos se absorbe calor y si tienen el mismo sentido se libera calor.

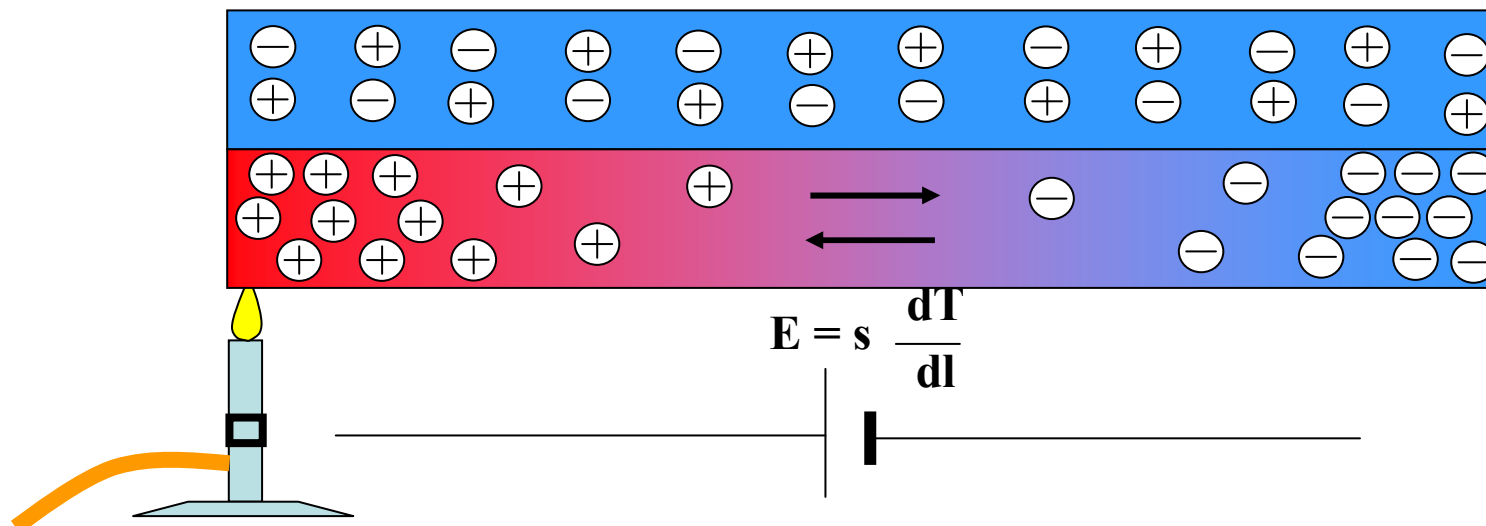




# TERMOELECTRICIDAD

## EXPLICACIÓN DEL EFECTO THOMPSON (I)

Un metal homogéneo tiene las cargas distribuidas uniformemente y el campo eléctrico resultante es nulo. Al calentar uno de sus extremos, los electrones de la zona caliente pasan a órbitas más alejadas del núcleo y además algunos quedan libres y forman una nube electrónica que se aleja de la zona caliente por difusión.



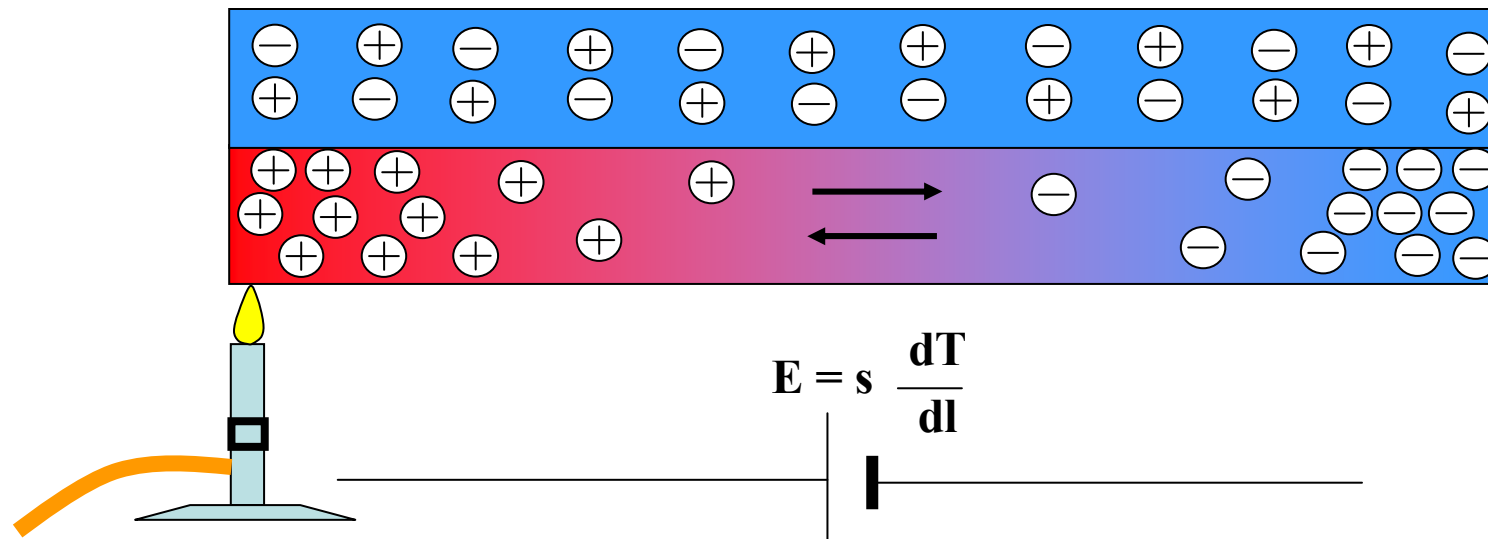


# TERMOELECTRICIDAD

## EXPLICACIÓN DEL EFECTO THOMPSON (II)

Se crea así un campo eléctrico debido a que hay una zona positiva en la parte más caliente y otra negativa en la más fría.

El efecto termoeléctrico en un metal homogéneo genera una tensión tan pequeña que su medida es prácticamente imposible.



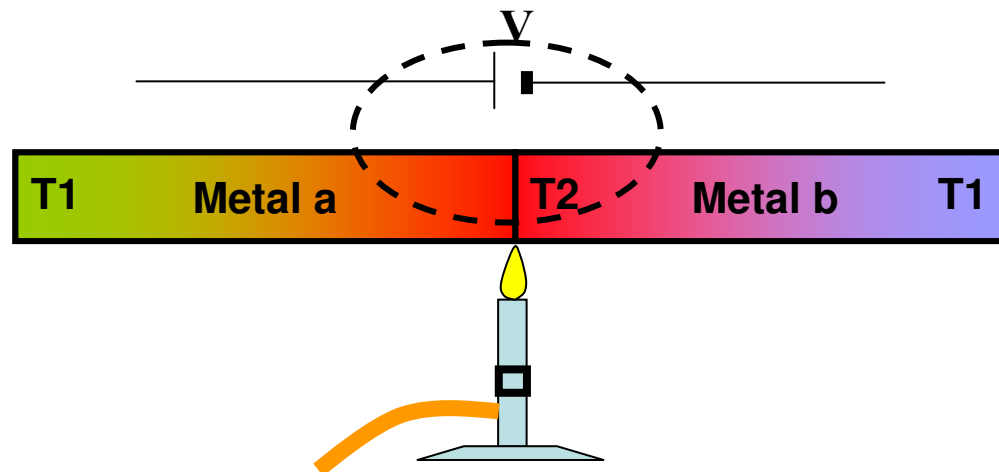


# TERMOELECTRICIDAD

## EFEECTO PELTIER (I)

Fue descubierto en 1834 por Jean Peltier.

Cuando la soldadura (unión) de dos metales distintos se calienta, se produce una diferencia de potencial entre los extremos libres de los mismos. A esta unión de dos metales se la denomina **termopar**.





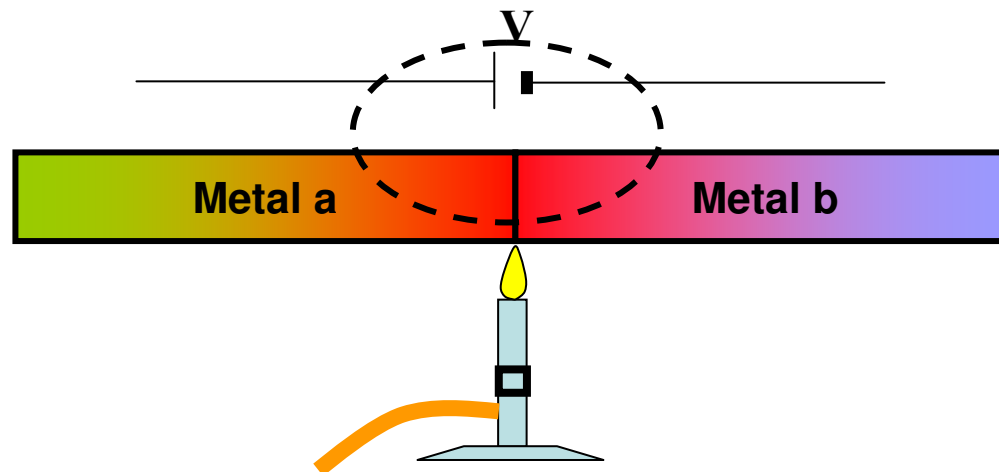
# TERMOELECTRICIDAD

## EFECTO PELTIER (II)

El voltaje del circuito abierto es proporcional a la diferencia de temperaturas ( $T_a - T_b$ ) y a la diferencia de coeficientes Peltier de ambos metales ( $P_a - P_b$ ), de acuerdo con la ecuación:

$$V = (P_a - P_b) (T_2 - T_1)$$

La tensión  $V$  es del orden del mV, o de decenas de mV para termopares metálicos en los que la diferencia de temperatura es del orden de 200°C.





## EFFECTOS TERMoeLECTRICOS

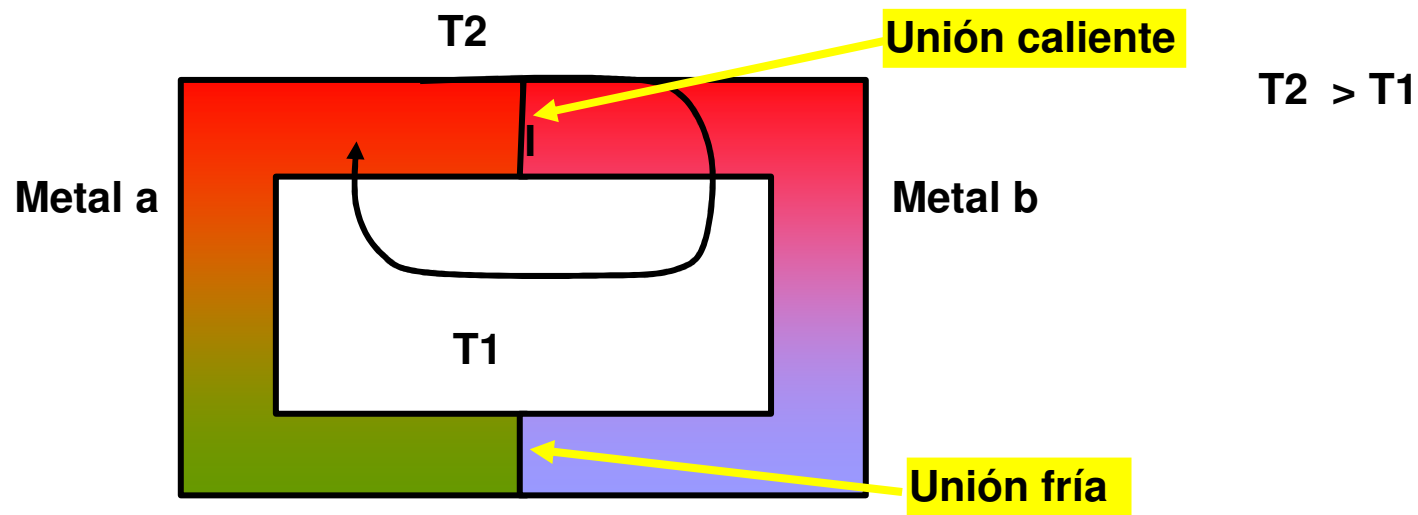
### EFFECTO SEEBECK

Es la suma de los efectos Thompson y Peltier.

El voltaje en circuito abierto cumple la ecuación:

$$V = (S_a - S_b)(T_2 - T_1)$$

en la cual  $S_a$  y  $S_b$  son los coeficientes *Seebeck* de los dos metales.



Efecto SEEBECK = THOMPSON + PELTIER

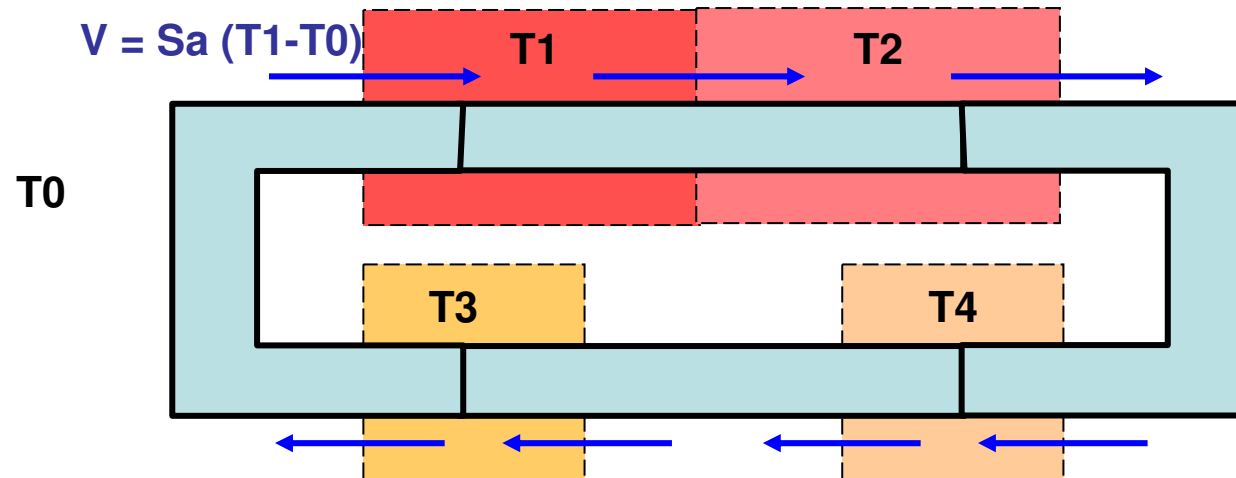


## TERMOELECTRICIDAD

El efecto termoelectrico cumple las tres leyes siguientes:

Primera Ley: “De los metales homogéneos”

La fuerza electromotriz producida en un metal homogéneo es siempre nula.



$$V_t = Sa ( (T1-T0) + (T2-T1) + (T0-T2) + \cancel{(T4-T0)} + \cancel{(T0-T4)} + \cancel{(T3-T0)} + \cancel{(T0-T3)} ) =$$

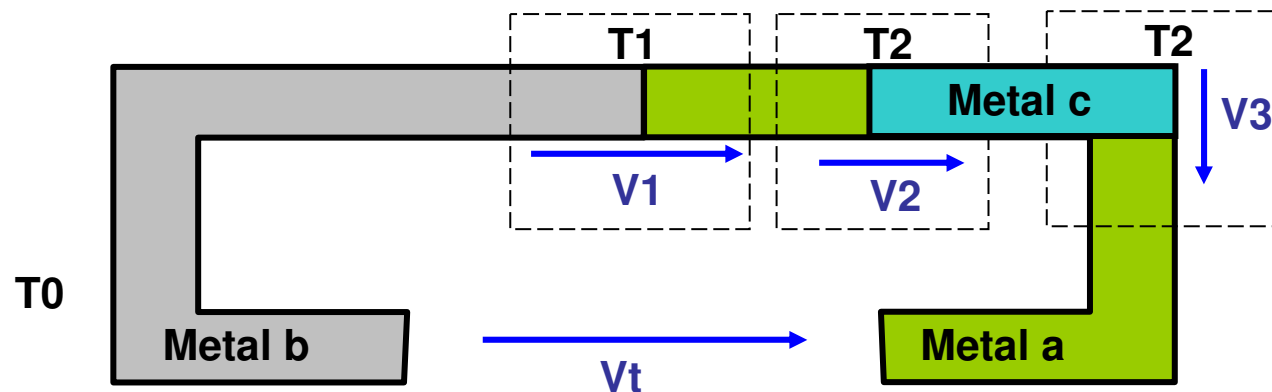
$$= Sa ( \cancel{(T1-T0)} + \cancel{(T2-T1)} + \cancel{(T0-T2)} ) = 0$$



## TERMOELECTRICIDAD

### Segunda Ley: “De los metales intermedios”

La f.e.m. de un termopar no se altera por la introducción de un nuevo metal en serie con el circuito, a condición de que las dos nuevas uniones formadas permanezcan a la misma temperatura.



$$V1 = (S_a - S_b) (T1 - T0)$$

$$Vt = (S_a - S_c) (T0 - T2) + (S_a - S_c) (T2 - T0) + (S_a - S_b) (T1 - T0) = (S_a - S_b) (T1 - T0)$$

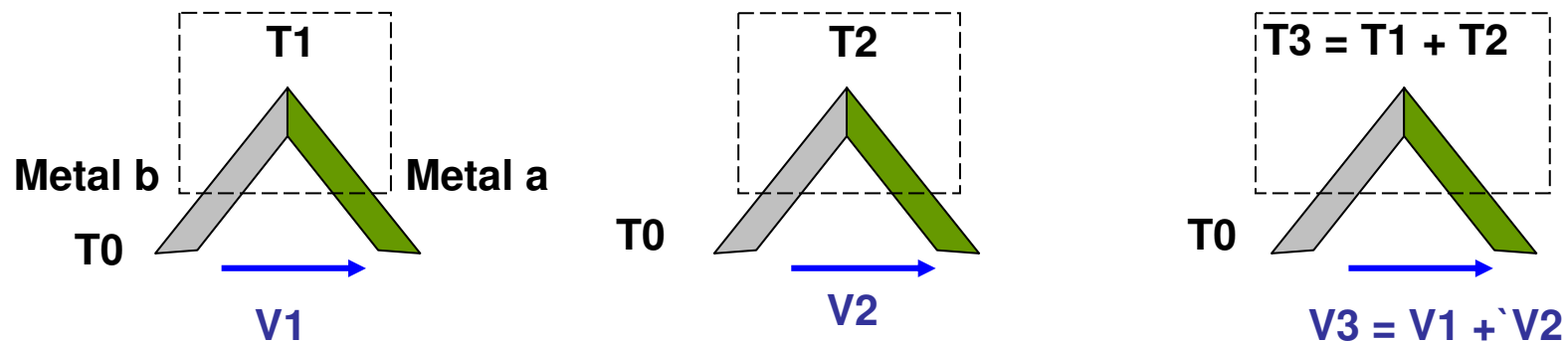




## TERMOELECTRICIDAD

### Tercera Ley: “De las temperaturas intermedias”

La f.e.m. generada por un termopar con sus uniones a las temperaturas  $T_1$   $T_3$  es la suma algebraica de la f.e.m. del termopar con sus uniones a  $T_1$   $T_2$  de la f.e.m. del mismo termopar con sus uniones a las temperaturas  $T_2$   $T_3$ .



$$V_3 = S_{ab} (T_1 - T_0) + S_{ab} (T_2 - T_0) = (S_{ab}) ((T_1 + T_2) - T_0)$$



## TERMOPARES

Los sensores basados en la termoelectricidad, reciben la denominación de termopares (*Thermocouples*) y se realizan con diferentes materiales metálicos según el rango de temperaturas y las condiciones ambientales.

Tipo	Composición (terminal positivo - negativo)	Campo de medida recomendado	Sensibilidad (a 25°C)
J	Fe - Constantán*	0 a 760°C	51,5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
K	Cromel* - Alumel*	-200 a 1250°C	40,5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
N	Nicrosil* - Nisil*	0 a 1260°C	26,5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
T	Cu - Constantán	-200 a 350°C	41,0 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
R	13%Pt 87%Rh - Pt	0 a 1450°C	6 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
S	10%Pt 90%Rh - Pt	0 a 1450°C	6 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
B	30%Pt 70%Rh - 6%Pt 94%Rh	800 a 1800°C	9 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (a 1000 °C)



## TERMOPARES

Tipo	Aplicaciones
J	Apropiado para atmósferas inertes o reductoras. Las atmósferas oxidantes disminuyen su vida útil debido a la presencia de hierro en el termopar que, además, se oxida muy rápidamente por encima de 538°C. No es adecuado para bajas temperaturas (por debajo de 0°C).
K	Muy utilizado por encima de 538°C debido a las limitaciones del termopar de tipo J. El cromo tiende a oxidarse ante la presencia de oxígeno lo que puede producir importantes derivas en el margen de 816 a 1038°C.
N	Se utiliza en aplicaciones en las que el termopar de tipo K tiene problemas de oxidación.
T	Adecuado para atmósferas oxidantes, inertes y reductoras.
R, S	Recomendados para altas temperaturas. El de tipo R se utiliza industrialmente mientras que el S se utiliza en laboratorios. El uso continuado a altas temperaturas provoca el crecimiento del granulado y puede generar una ruptura mecánica. Deben protegerse con tubos no metálicos y aislantes cerámicos. Tienden a descalibrarse debido a la difusión del rodio a la rama de platino puro y a su volatilización.
B	Semejante a los tipos R y S pero su límite de temperatura es mayor y es menos susceptible al crecimiento del granulado.

Condiciones de aplicación de los distintos tipos de termopares



## TERMOPARES

### CIRCUITO BÁSICO DE ACONDICIONAMIENTO

Los termopares generan tensiones de valor reducido y su sensibilidad es del orden de  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ .

Por ello el circuito de acondicionamiento ha de cumplir los siguientes requisitos:

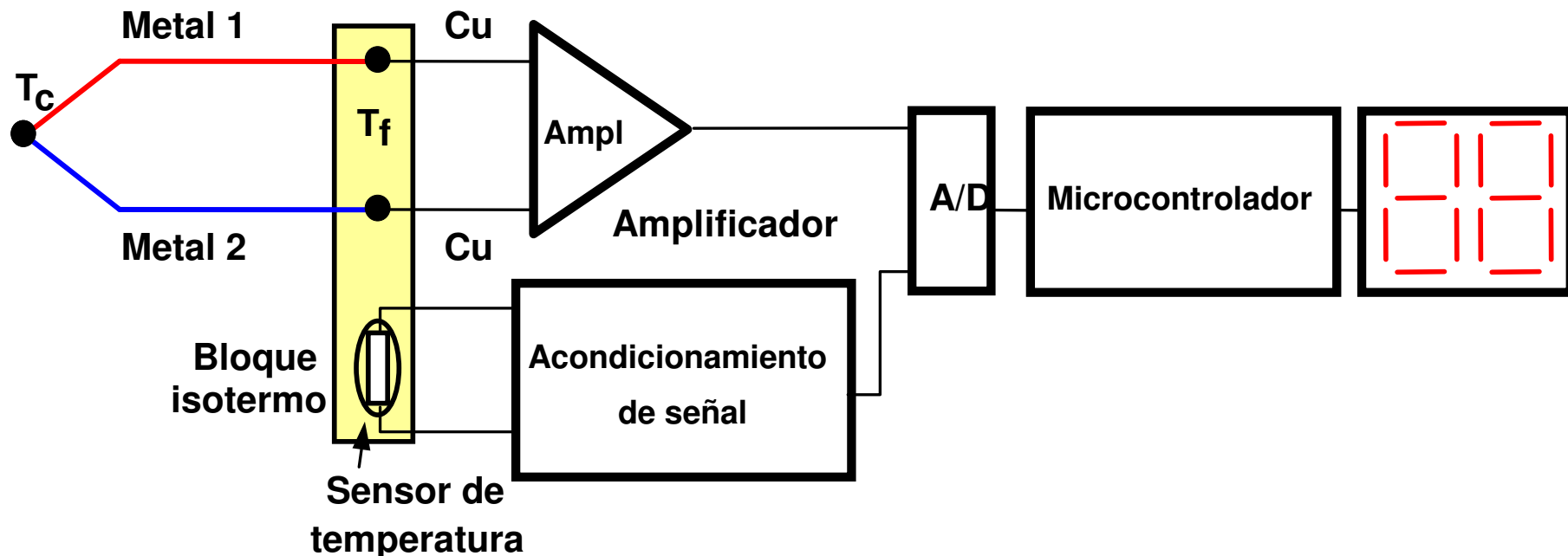
- Estar realizado con un amplificador de continua de reducida tensión de asimetría, desviación o desequilibrio (*Offset Voltage*).
- Tener en cuenta la temperatura de la unión fría:
  - Mediante una unión de referencia
  - Mediante la medida de la temperatura de la unión fría y la ejecución de un proceso en un computador



## TERMOPARES

### CIRCUITO BÁSICO DE ACONDICIONAMIENTO

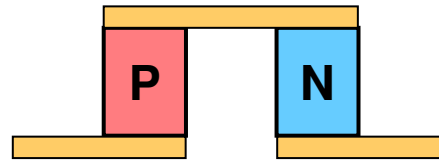
La temperatura de la unión fría se puede medir mediante un sensor de temperatura (Por ejemplo una Pt100) y junto con la medida de la temperatura de la unión caliente se pueden aplicar a un convertidor analógico/digital cuya salida se conecta a un puerto de un microcontrolador.



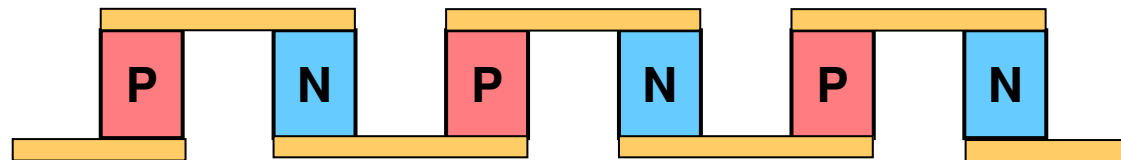


## CÉLULAS PELTIER

Los materiales semiconductores presentan un mejor efecto termoeléctrico que los metales.



Esto permite integrar muchos termopares semiconductores en serie para construir una termopila, que presenta un voltaje de salida mayor que un sólo termopar.



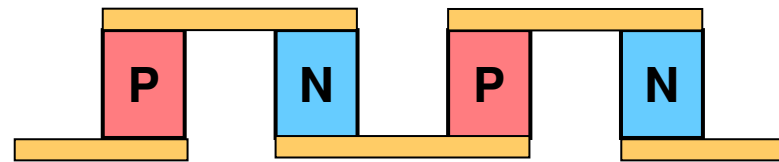
Sin embargo, la alta conductividad térmica del silicio dificulta el mantener un gradiente de temperatura grande ( $T_a - T_b$ ).

Es muy importante aislar térmicamente el elemento sensor del sustrato de silicio. Esto es posible si el dispositivo se construye sobre micropuentes o trampolines.



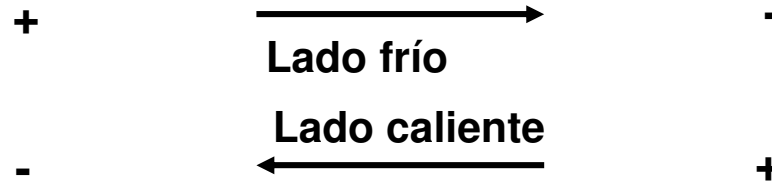
## CÉLULAS PELTIER

Los termopares son reversibles, es decir, si se les aplica una tensión en sus extremos consigue que las uniones se calienten o se enfríen según la polaridad.



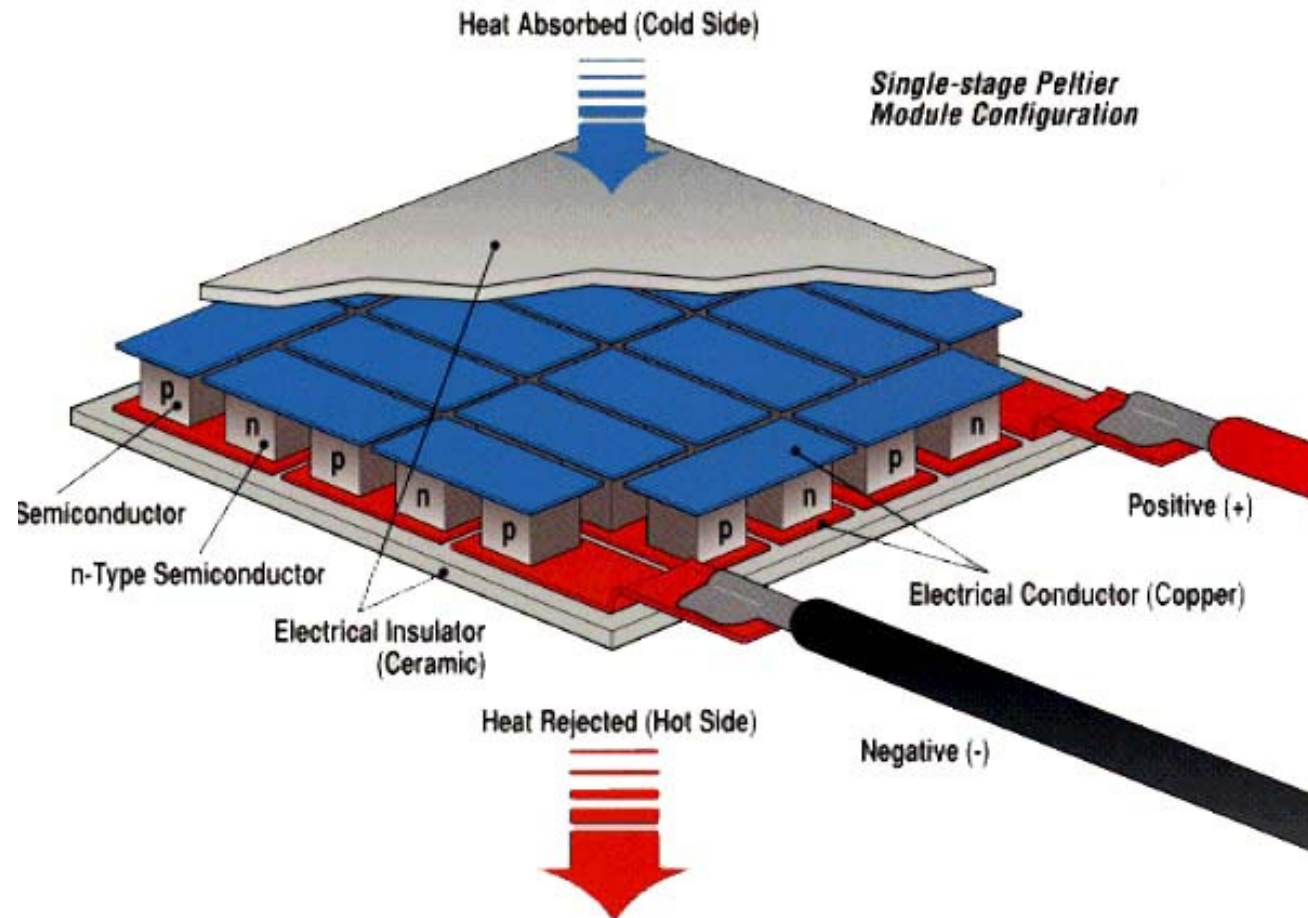
Lado caliente

Lado frío





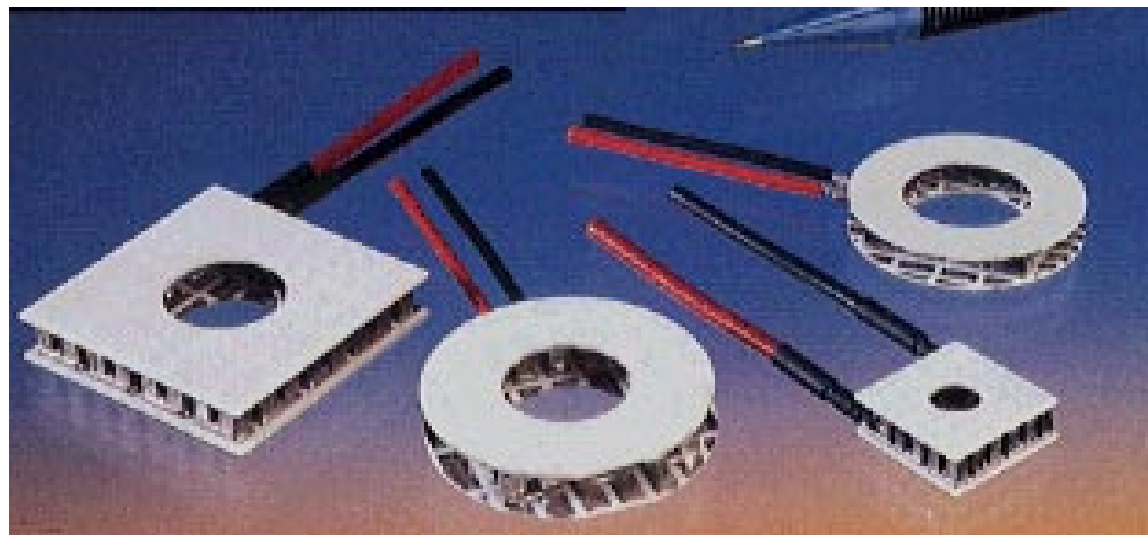
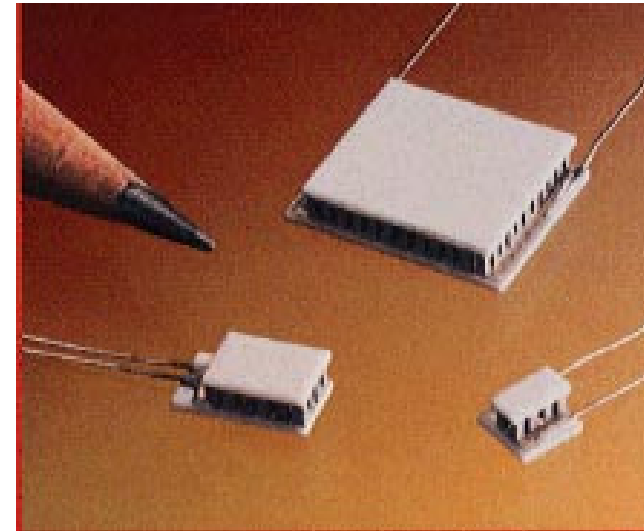
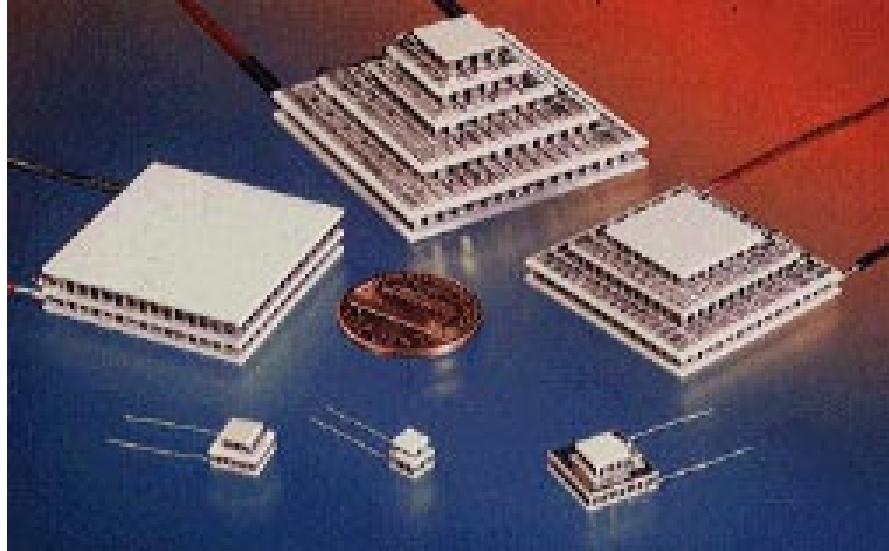
# CÉLULAS PELTIER







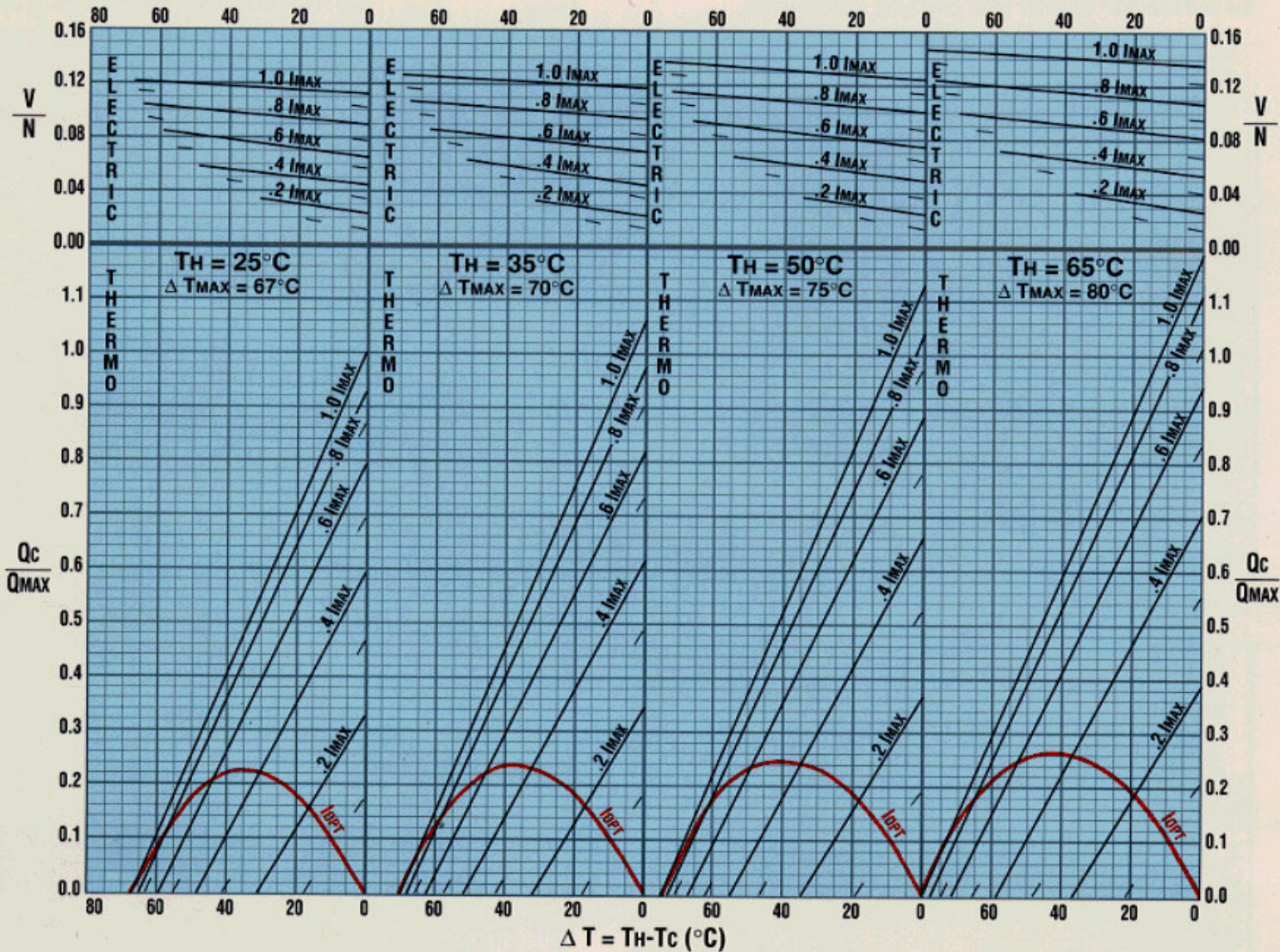
## CÉLULAS PELTIER





# CÉLULAS PELTIER

## Selection/Performance (S/P) Graphs





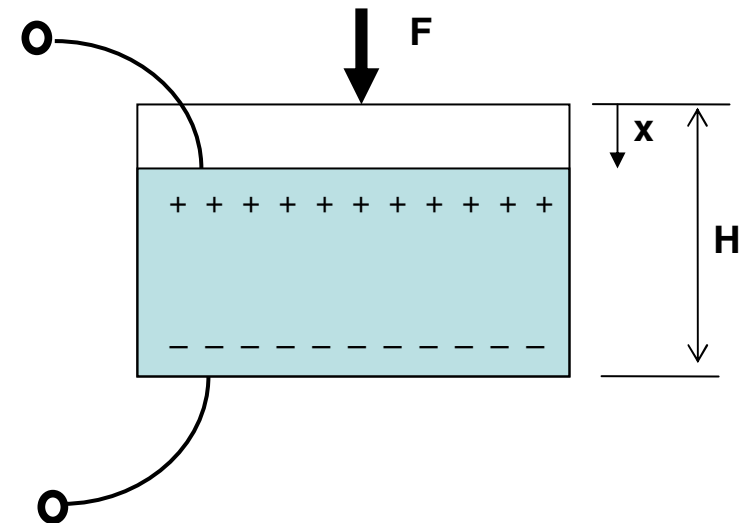
## PIEZOELECTRICIDAD

La piezoelectricidad (piezo, del griego apretar) fue descubierta por *Jacques y Pierre Curie* en 1880.

Es la propiedad de ciertas sustancias naturales, como por ejemplo el cristal de cuarzo y la sal de Rochelle, en las que se generan cargas eléctricas al someterlas a una fuerza que las deforma.

Materiales piezoeléctricos más utilizados:

- Naturales:
  - Cuarzo
  - Turmalina
- Sintéticos:
  - Titanato de bario
  - Titanato-circonato de plomo (PZT).

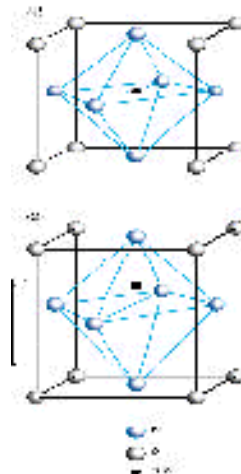




## PIEZOELECTRICIDAD

El efecto piezoeléctrico exhibido por materiales naturales tales como el cuarzo, la turmalina, la sal de Rochelle, es muy pequeño, por lo que se han desarrollado materiales con propiedades mejoradas, como los materiales cerámicos ferroeléctricos policristalinos: BaTiO<sub>3</sub> (Titanato de Bario) y el Zirconato Titanato de Plomo (PZT).

Los cerámicos PZT son los materiales más ampliamente usados hoy para aplicaciones como actuadores o sensores . La estructura cristalina del PZT es cúbica centrada en las caras (isotrópico) antes de la polarización y después de la polarización exhiben simetría tetragonal ( estructura anisotrópica) por debajo de la temperatura de Curie, a esta temperatura los cerámicos PZT pierden las propiedades piezoeléctricas.





## SENSORES PIEZOELÉCTRICOS

Los sensores piezoeléctricos están basados en la piezoelectricidad, es decir que al aplicarles una fuerza generan una carga entre los dos electrodos situados en cada una de las caras.

El modelo que describe su comportamiento al someterlo a una fuerza  $F$ , tiene una componente inercial, una viscosa y una elástica, en la cual

$m$  es la masa del cristal

$r$  es el coeficiente de rozamiento

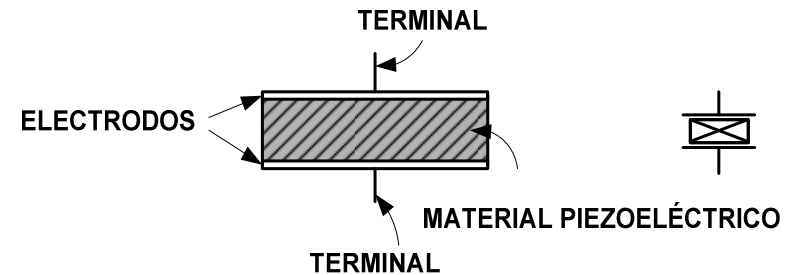
$s$  es el coeficiente elástico

$x$  es la deformación

El efecto piezoeléctrico genera una carga:  
en la cual

$x$  es la deformación total

$e$  es el espesor del material piezoeléctrico.



$$F = m \frac{d^2 x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + sx$$

$$q = \frac{k' x}{e} = kx$$



## SENSORES PIEZOELECTRICOS

Si el sensor se cortocircuita se produce una corriente eléctrica  $i$  que es proporcional a la velocidad de cambio de  $x$  y por lo tanto es nula si  $x$  es constante.

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{k'}{e} \frac{dx}{dt} = K \frac{dx}{dt}$$

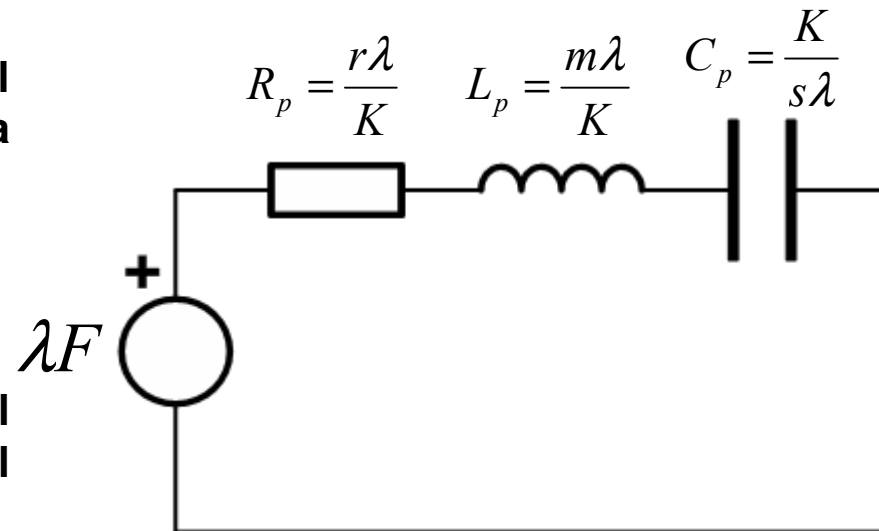
Sustituyendo la expresión de  $i$  en la de  $F$  resulta:

$$F = \frac{m}{K} \frac{di}{dt} + \frac{r}{K} i + \frac{s}{K} \int i dt$$

que se puede representar mediante el circuito eléctrico análogo de la figura, en la cual:

$$\lambda = \frac{V}{F}$$

y  $C_p$  es la capacidad total equivalente del dispositivo debida al efecto capacitivo y al piezoeléctrico.



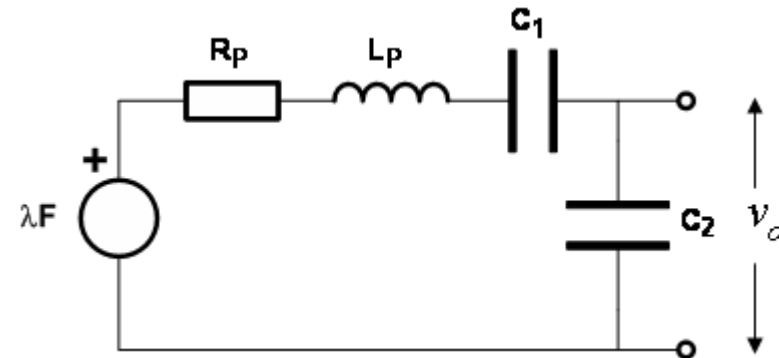


## SENSORES PIEZOELÉCTRICOS

La capacidad  $C_p$  se puede considerar dividida en una parte  $C_1$  y otra  $C_2$  debida al efecto capacitivo como se indica en el circuito.

A partir de ese circuito se obtiene la función de transferencia:

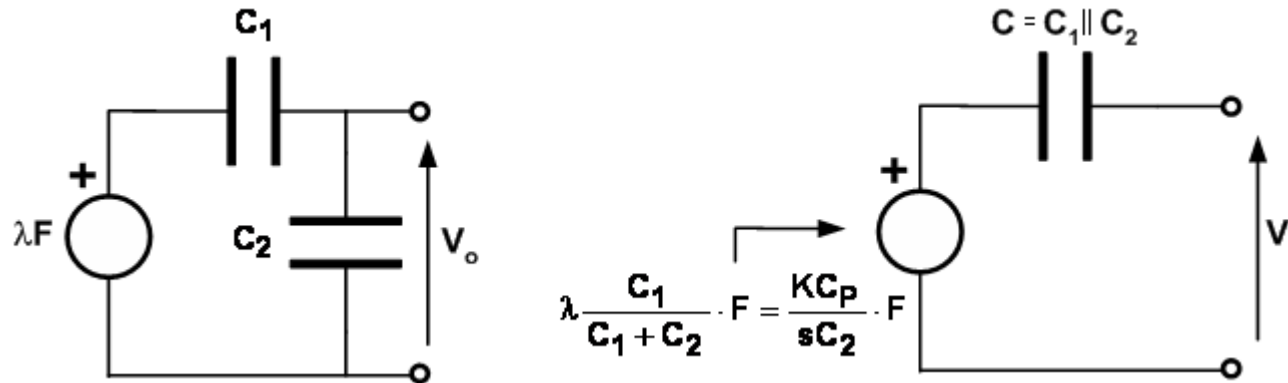
$$V_o = \frac{ke}{\epsilon A} \frac{1}{\sqrt{(s - \omega^2 m)^2 + \omega^2 r^2}} F$$



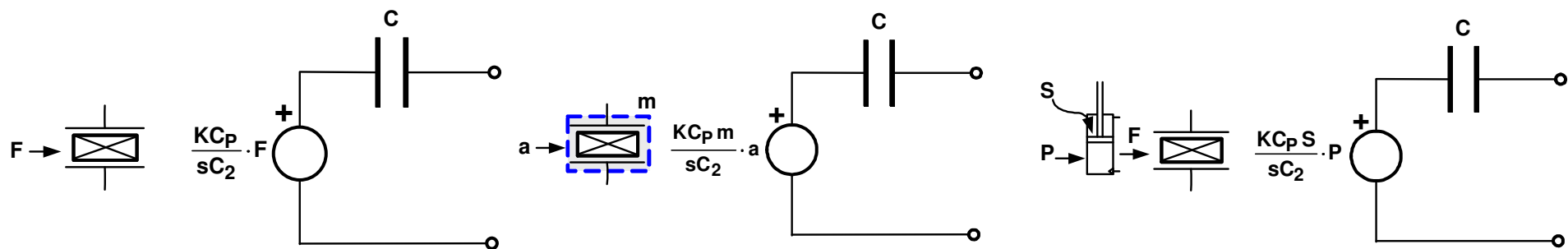


## SENSORES PIEZOELECTRICOS

A partir de la función de transferencia se deduce que en la zona en la que  $V_o/F$  es constante el circuito equivalente del sensor es:



Los sensores piezoeléctricos se pueden utilizar para medir fuerza (F), aceleración (a) y presión (P).



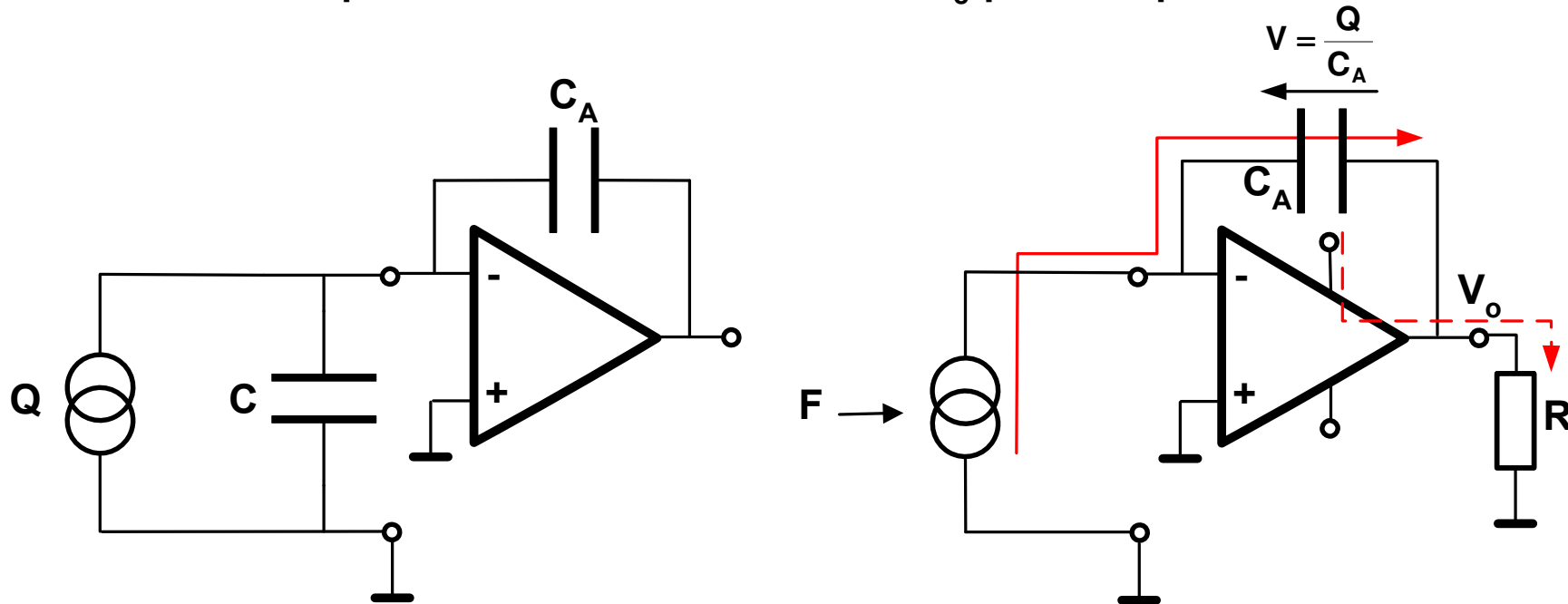




## SENSORES PIEZOELÉCTRICOS

### CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO

Se utilizan amplificadores de carga que es un amplificador cuya impedancia de entrada es un condensador que proporciona una impedancia elevada a baja frecuencia. La carga generada en el sensor piezoelectrico se almacena en el condensador para convertirla en una tensión  $V_o$  por el amplificador.





# **PIROELECTRICIDAD**

## **FUNDAMENTOS**

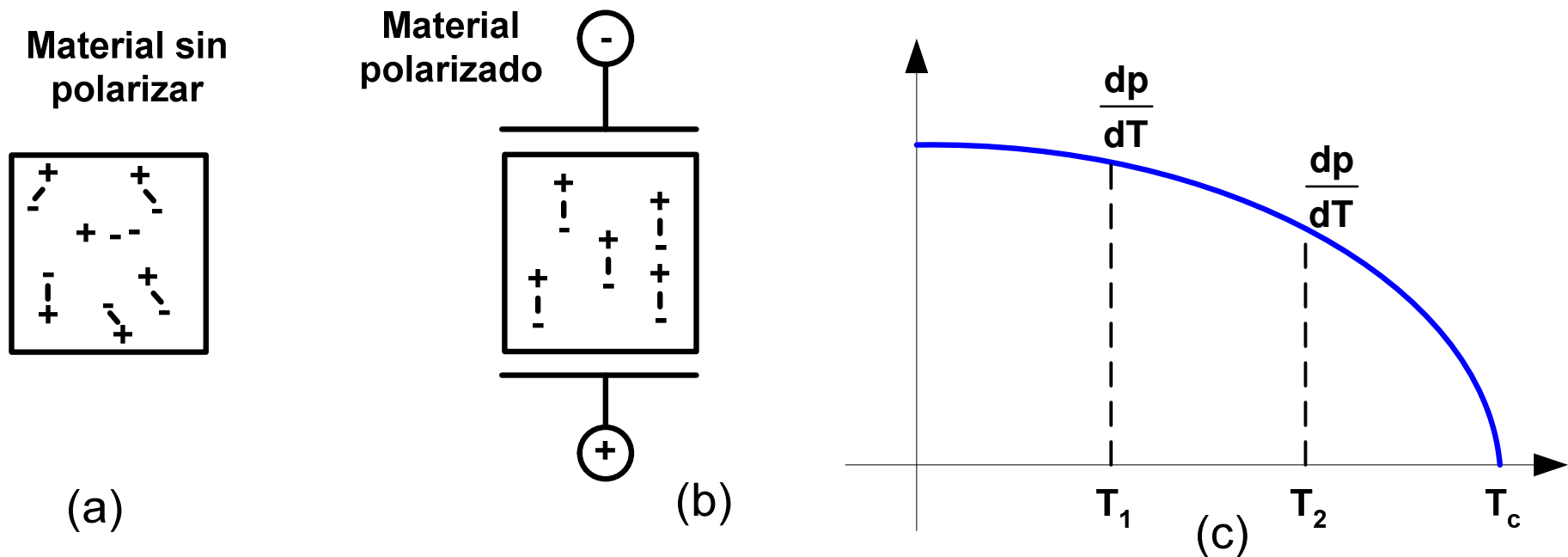
**La piroelectricidad es la propiedad que poseen ciertos cristales que se polarizan cuando reciben radiaciones de infrarrojos. Está muy relacionada con la piezoelectricidad. Todos los materiales piroeléctricos poseen en algún grado propiedades piezoeléctricas.**

**A partir de 1915 se han obtenido una gran cantidad de materiales piroeléctricos como por ejemplo el Titanato-Zirconato de plomo (PZT), el Sulfato de Triglicina (TGS) y algunos materiales plásticos como el Fluoruro de Polivinilo (PVF).**



## PIROELECTRICIDAD

Un material piroeléctrico está compuesto por una gran cantidad de cristales diminutos que se comportan como pequeños dipolos eléctricos.



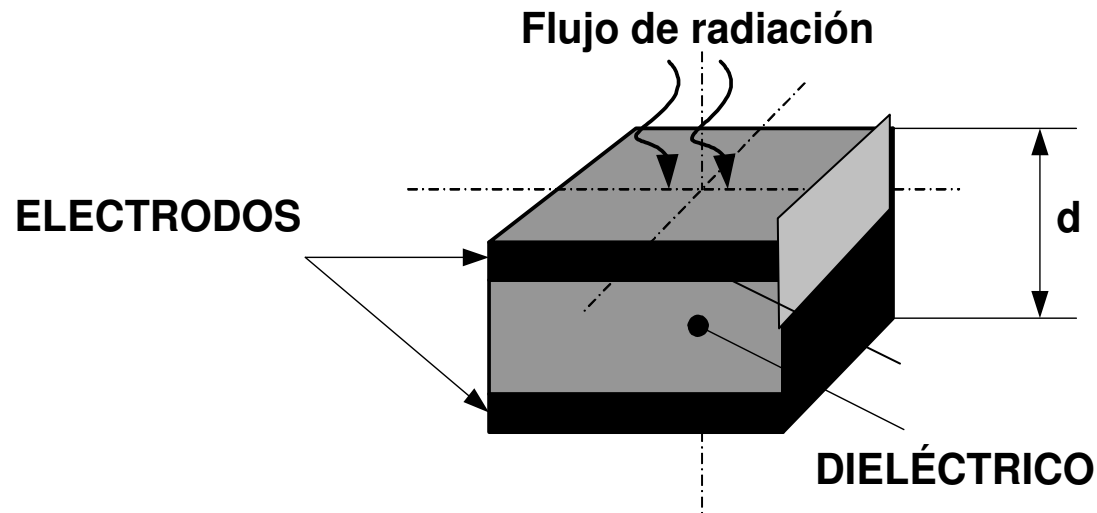
Se utiliza para detectar radiaciones electromagnéticas del espectro infrarrojo.



## SENSORES PIROELÉCTRICOS

Los sensores piroeléctricos están basados en la piroelectricidad y se suelen denominar pirómetros.

Se construyen en forma de un pequeño condensador, cuyo dieléctrico está constituido por una capa muy fina de material cerámico ferroeléctrico. Sobre dicha capa se colocan dos electrodos en los que se inducen las cargas eléctricas cuando recibe la radiación infrarroja.





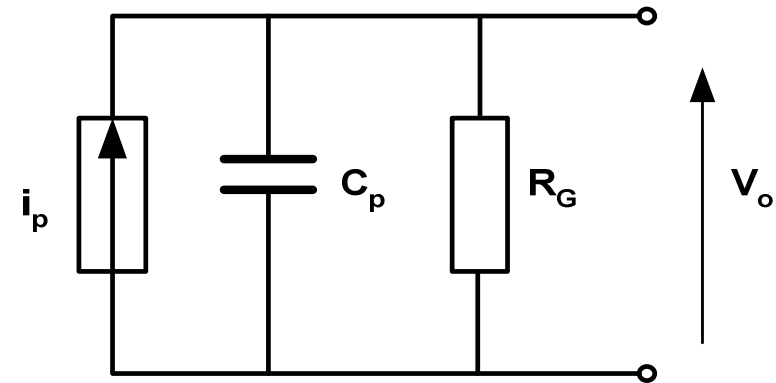
## SENSORES PIROELÉCTRICOS

### CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

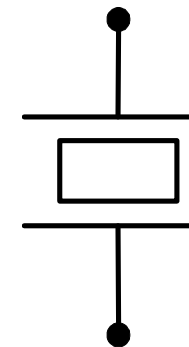
El modelo eléctrico de un sensor piroeléctrico es el de la figura en el cual:

- $C_p$  = Capacidad del sensor
- $R_G$  = Resistencia de pérdidas (Del orden de  $10\text{ G}\Omega$ )

Se caracteriza por tener una alta impedancia de salida y proporcionar una corriente muy reducida, al igual que los piezoeléctricos.



Circuito equivalente



Símbolo eléctrico

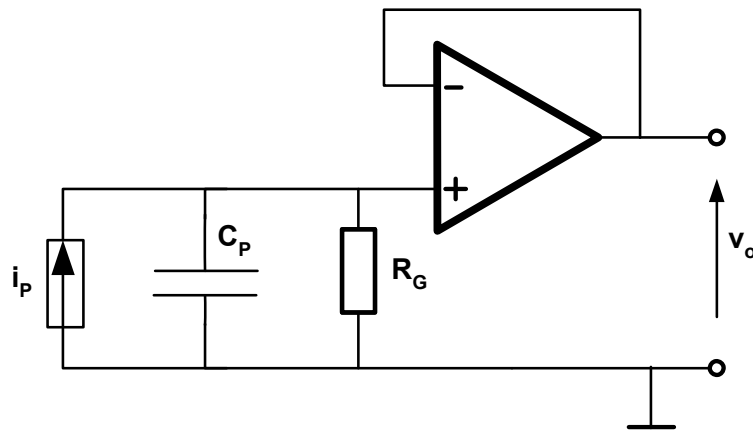


## SENSORES PIROELÉCTRICOS

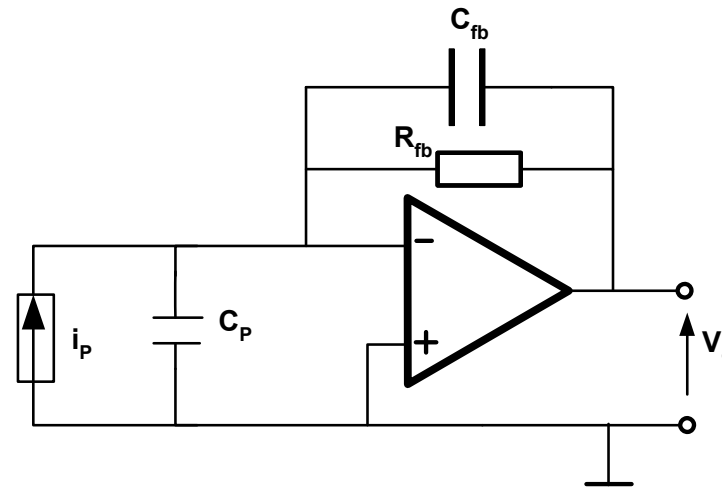
### ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL

Se utilizan amplificadores de carga y su componente básico es un amplificador con una impedancia de entrada elevada y tensiones de asimetría (*Offset*) muy pequeñas.

El circuito de acondicionamiento se puede realizar en modo tensión o en modo corriente.



Modo tensión



Modo corriente



# **EFEECTO FOTOVOLTAICO**

## **FUNDAMENTOS**

**Generación de un potencial eléctrico cuando una radiación ioniza una región de un semiconductor en la que existe una barrera de potencial.**

**En una unión P-N pasan electrones de la zona N a la P y huecos de la P a la N por difusión y se forma una barrera de potencial.**

**Si la unión se somete a una radiación cuya energía supera la anchura de la banda prohibida se generan pares electrón-hueco adicionales que se desplazan bajo la acción del campo eléctrico presente en la unión. De esta forma en la zona N se acumulan electrones y en la zona P huecos y se genera un potencial que se puede medir externamente.**

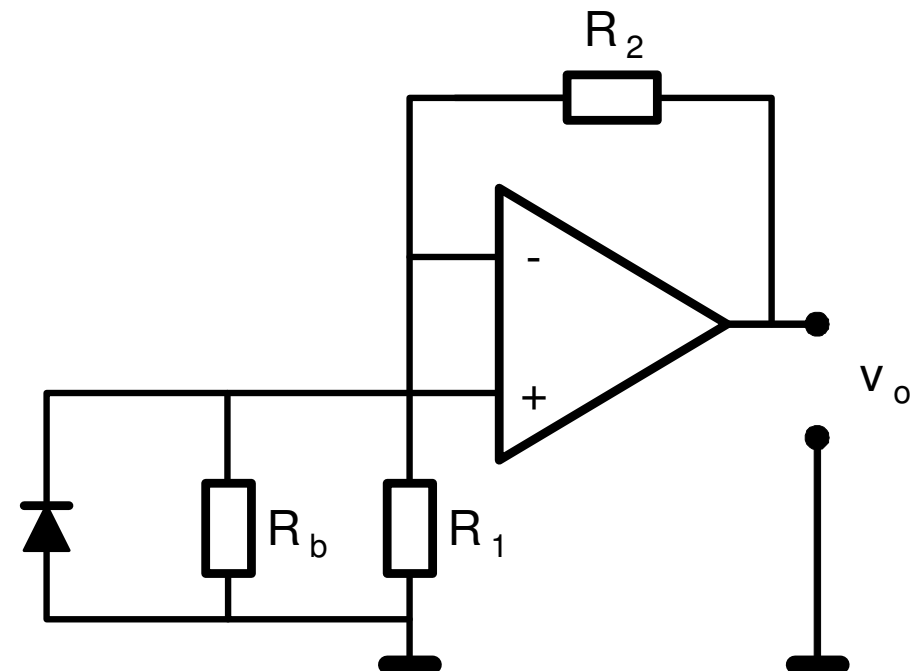
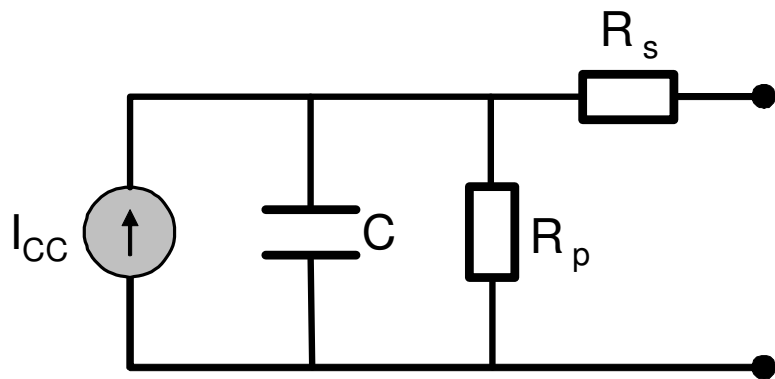


## SENSORES FOTOVOLTAICOS

Los sensores fotovoltaicos están basados en el efecto fotovoltaico. Son más lineales que los fotoconductores pero es necesario amplificar la señal que generan.

Circuito de acondicionamiento

Circuito equivalente simplificado de un sensor fotovoltaico







## SENSORES ELECTROQUÍMICOS

Reciben el nombre de sensores electrolíticos potenciométricos (*Potentiometer Electrochemical Sensors*) y generan una diferencia de potencial en función del cambio de concentración de una solución química.

Son sensores electrolíticos potenciométricos los sensores selectivos de ión denominados ISE (*Ion Selective Electrodes*) que se basan en la generación de un diferencia de potencial en la zona en la que interactúan (zona de interfase) dos soluciones químicas que tienen concentraciones diferentes.

La impedancia de salida de un ISE varía entre  $20\text{M}\Omega$  y  $1\text{G}\Omega$  y proporcionan tensiones muy pequeñas, que se deben amplificar mediante amplificadores electrométricos (Tema 14)