

**Tema 4**  
**SENSORES GENERADORES**  
**PARTE 2**

# Introducción

## ¿Qué sensores vamos a ver?

Todos ellos son dispositivos que generan tensión, corriente o carga cuyo valor depende de la magnitud.

Algunos ejemplos son:

- **Tensión**  
Bandgap (T), termopares (T), ...
- **Corriente**  
Bandgap (T), fotodiodos, fototransistores (Luminosidad, presencia, color, etc.), fotomultiplicadores (fotón aislado, radiactividad), ...
- **Carga**  
Piezoeléctricos (Sonido, vibraciones, ...) y piroeléctricos (T), ...

**Por supuesto que puede haber otros tipos**

# Sensores Band-gap

## Fundamento

Ya se vio en temas anteriores que, en las referencias tipo *bandgap*, había una tensión interna proporcional a la temperatura, que puede usarse como sensor de temperatura.

## Ejemplos

En referencias discretas, se puede utilizar directamente esta tensión para estimar la temperatura:

**REF02:**  $(630 + 2,1 \cdot (T-25))$  mV

**AD780:**  $(560 + 1,9 \cdot (T-25))$  mV

O se preparan celdas Brokaw para dar directamente corriente:

**AD590:**  $T$   $\mu$ A, siendo  $T$  la temperatura absoluta

**Medida extremadamente sencilla aunque la no linealidad es considerable**

# Termopares

## Fundamento

Miden temperatura usando uniones de metales distintos

## Efecto termoeléctrico

Cuando se habla de la ley de Ohm, se supone que la temperatura de la resistencia es constante. Si variara, los puntos con mayor temperatura los portadores tendrían distinta movilidad y, al igual que los gases, fluirían de zonas más cálidas a zonas más frías.



$$\text{Ley de Ohm clásica} \quad \vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} = -\sigma \cdot \nabla V$$

## Efecto Termoeléctrico

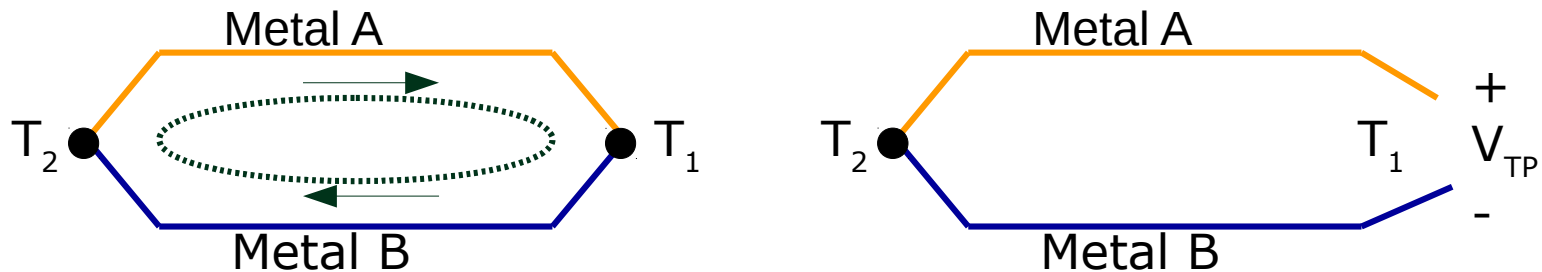
$$\vec{J} = -\sigma \cdot \nabla V - \sigma \cdot S \cdot \nabla \cdot T$$

**S: Coeficiente Seebeck, propio de cada material**

# Termopares

## Efecto Seebeck o termopar

Dos metales distintos formando un circuito cerrado a distinta temperatura. Aparece entonces una fuerza electromotriz y, si se abre el lazo, una diferencia de tensión.



## Cuantificación

En estas circunstancias, la ecuación del efecto termoeléctrico permite deducir que:

$$V_{TP} \approx (S_A - S_B) \cdot (T_2 - T_1)$$

**Se suelen dar datos de calibración para ajuste fino**

# Termopares

## Tipos de termopares

Se clasifican en tipos estandarizados con una serie de características para facilitar la identificación y calibración.

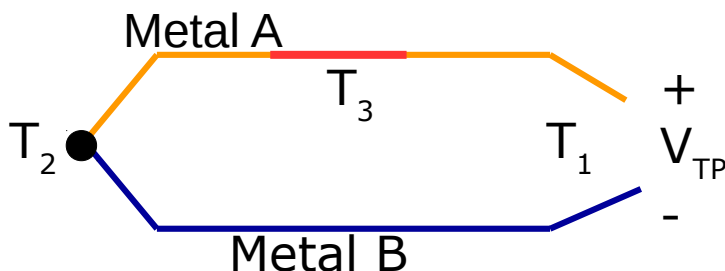
Tipo	Composición (terminal positivo - negativo)	Campo de medida recomendado	Sensibilidad (a 25°C)
J	Fe - Constantán*	0 a 760°C	51,5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
K	Cromel* - Alumel*	-200 a 1250°C	40,5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
N	Nicrosil* - Nisil*	0 a 1260°C	26,5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
T	Cu - 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)

Autor: Miguel Ángel Pérez García

**Cada termopar tiene distintas características fisicoquímicas  
Mayor rango que RTDs**

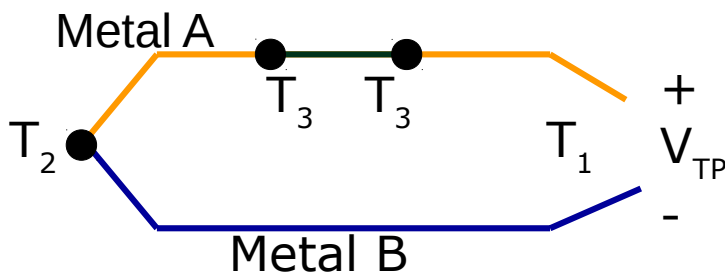
# Termopares

## Algunas leyes de interés



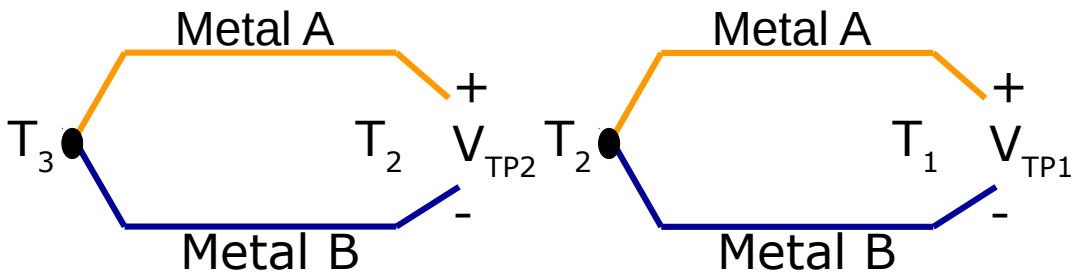
### Ley de los circuitos homogéneos

La existencia de gradientes térmicos en los cables no afecta a la medida si en los extremos la temperatura no se ve afectada



### Ley de los metales intermedios

La existencia de un tercer metal no afecta a la medida siempre y cuando las uniones estén a la misma temperatura.



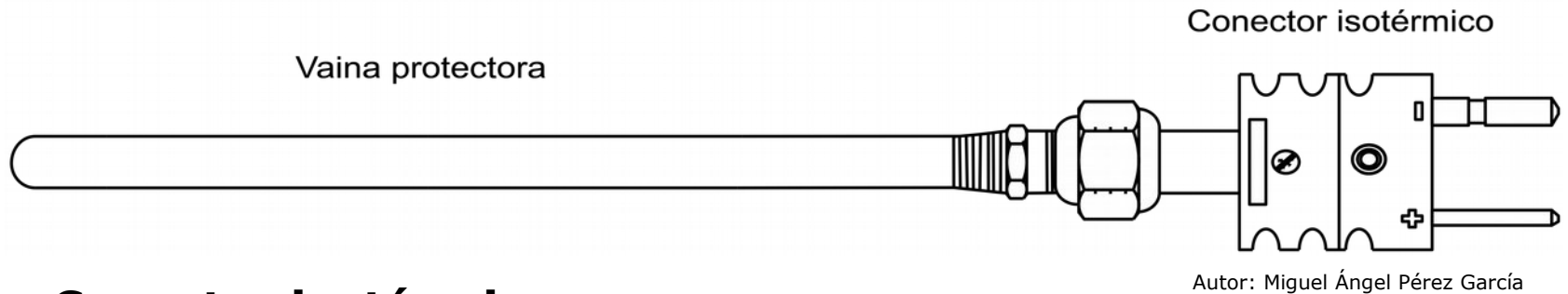
### Ley de las temperaturas intermedias

La tensión de salida con temperaturas  $T_3$  y  $T_1$ ,  $V_{TP3}$ , es igual a  $V_{TP2} + V_{TP1}$ , siendo  $T_2$  una temperatura de referencia cualquiera

# Termopares

## La temperatura del terminal de referencia

Es importante que, en el terminal de contacto, los terminales estén a la misma temperatura y que ésta sea conocida.



## Conector isotérmico

Una funda de alta conductividad térmica y gran tamaño permite que los terminales de contacto estén a la misma temperatura

## Temperatura de referencia

Esa temperatura puede controlarse de dos modos: Añadiendo un nuevo sensor tipo RTD o usando hielo fundente (sólo laboratorios)

**Muchos más detalles en Campus Virtual**



# Termopares

## Errores por efecto termoeléctrico

Al medir tensión en un circuito, se crea el equivalente a un termopar. Si el circuito está a distinta temperatura, aparece una tensión adicional que falsea la medida.

**Ejemplo: PT100 + cables de Cu y temperatura no uniforme**

## Efecto y celdas Peltier

Si tenemos dos materiales unidos y se hace pasar una corriente constante, una unión se enfría y la otra se calienta.

**Celda Peltier: Utilizada para crear focos de frío y enfriar.**

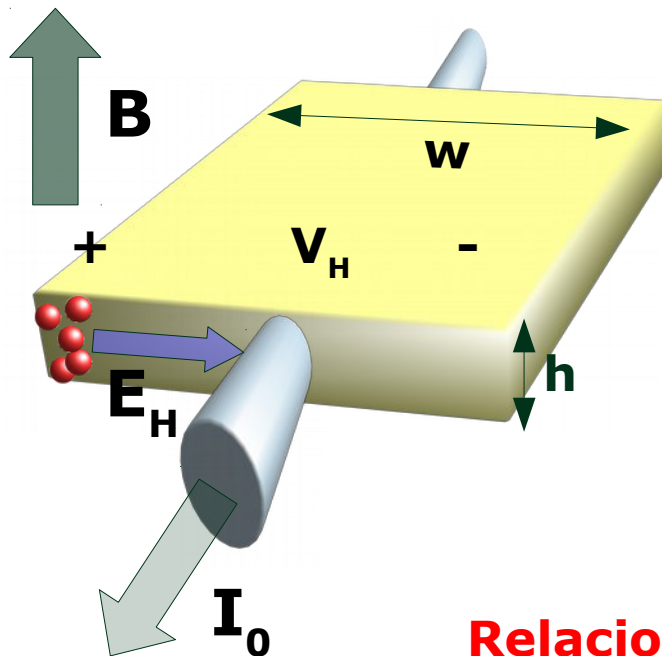
## Recolección de energía

El efecto Seebeck ha sido utilizado exitosamente en algunos sistemas sin alimentación externa.

# Sensores de Efecto Hall

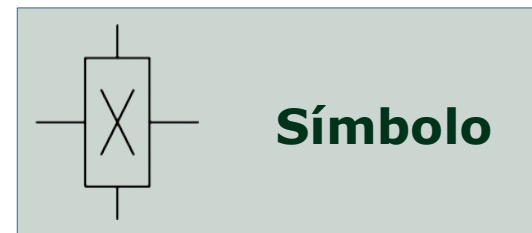
¿Qué son?

El efecto Hall es un fenómeno sobradamente conocido en física. Cuando circula corriente a través de un semiconductor (preferiblemente plano) y se aplica un campo magnético, aparece una diferencia de tensión entre las caras del semiconductor.



$$V_H = \frac{B \cdot I_0}{q \cdot h \cdot n}$$

Dependencia de los términos:  
 -  $B$ : Depende del tipo de portador  
 -  $q$ : Carga del portador  
 -  $n$ : Concentración de portadores



**Relaciona I y B: conocido uno, conocido el otro**

# Sensores de Efecto Hall

## Notas sobre los sensores

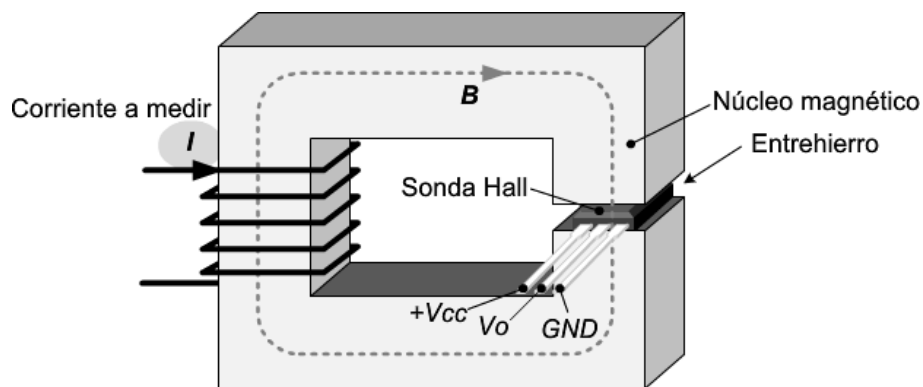
- Si se acepta que el sensor es plano, el campo magnético se debe multiplicar por el coseno del ángulo con la vertical.
- El semiconductor suele ser un compuesto de indio.
- En general, estos sensores cuentan con acondicionador de señal integrado en el sensor. Éste puede:
  - Proporcionar salida analógica.
  - Proporcionar salida lógica: Ausencia/presencia de campo
    - Un solo sentido o ambos sentidos

El acondicionamiento de señal incluye fuente de corriente y amplificación/comparación.

En cualquier caso, hay que olvidarse de la constante Hall y fijarnos sólo en las características de cada sensor proporcionadas por el fabricante.

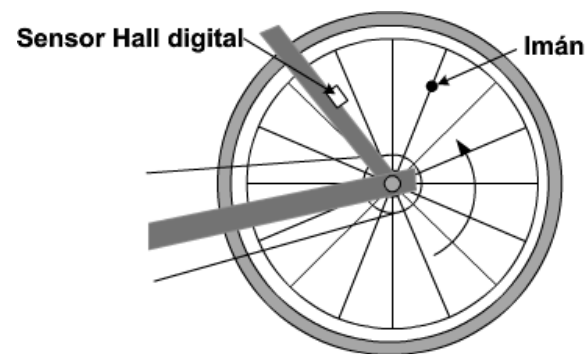
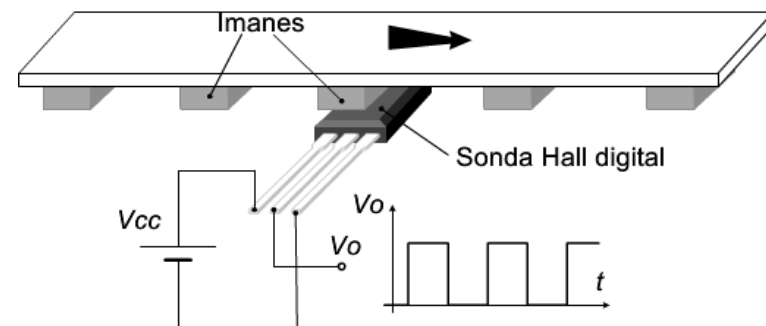
# Sensores de Efecto Hall

## Ejemplos de uso en electrónica



### Medida de corriente

El campo magnético generado en el núcleo de hierro puede medirse con el sensor y de ahí deducir la corriente.



### Control de paso

Un sensor Hall digital puede contar el número de veces que pasa un objeto (u objetos que pasan) y así determinar cantidades o velocidad.

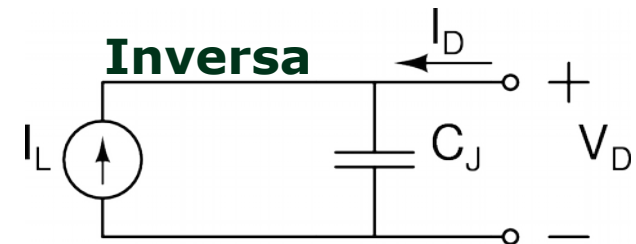
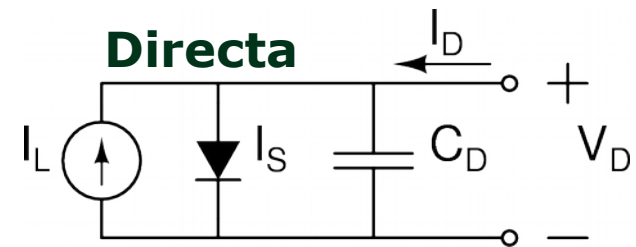
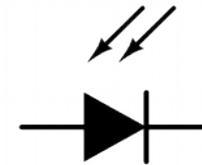
# Fotodiodos

## ¿Qué son?

Cuando se ilumina una unión PN, la radiación electromagnética puede crear pares e-h en la zona de vaciamiento generando de este modo una corriente.


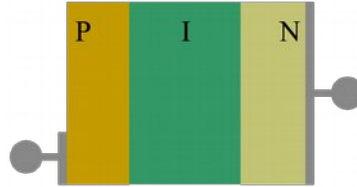

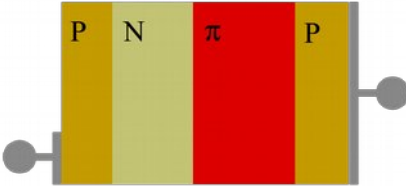
### Propiedades físicas

- Anchura de banda prohibida
- Coeficiente de penetración (Ley de Beer-Lambert)
- Corriente en oscuridad
- Respuesta espectral
- Tiempo de bajada/subida
- Ruido



# Fotodiodos

## Tipos

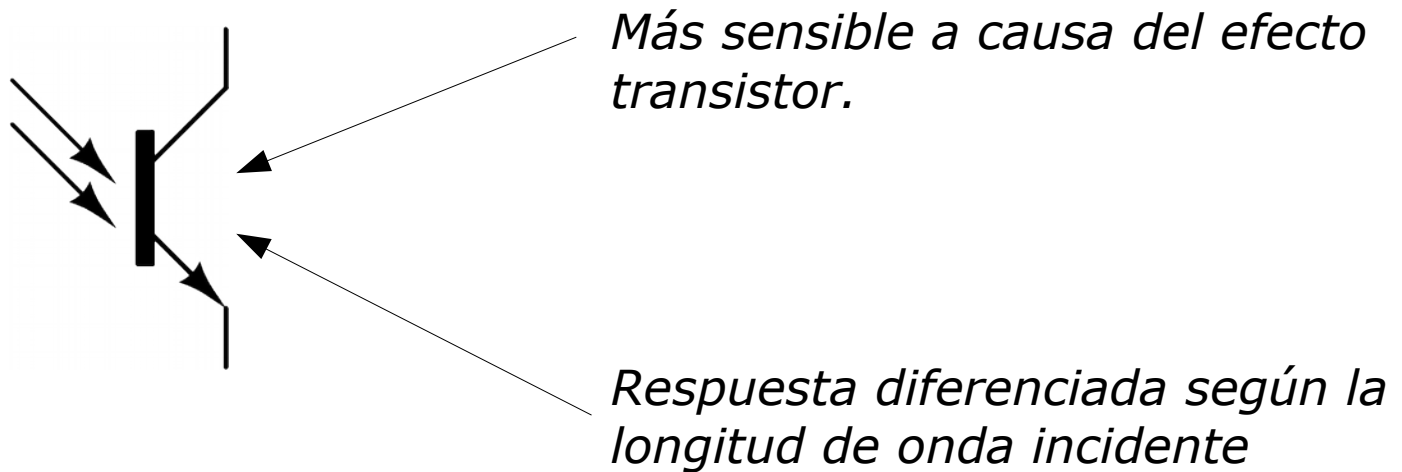
Tipo	Estructura	Características
PN		Buenas características generales
PIN		Tensión inversa 5-100V Capacidad de transición pequeña Muy rápidos
Schottky		Buena respuesta en el ultravioleta
Avalancha		Tensión inversa 150-200V $G \sim 100$ Muy rápidos

Autor: Miguel Ángel Pérez García

# Fototransistores

## ¿Qué son?

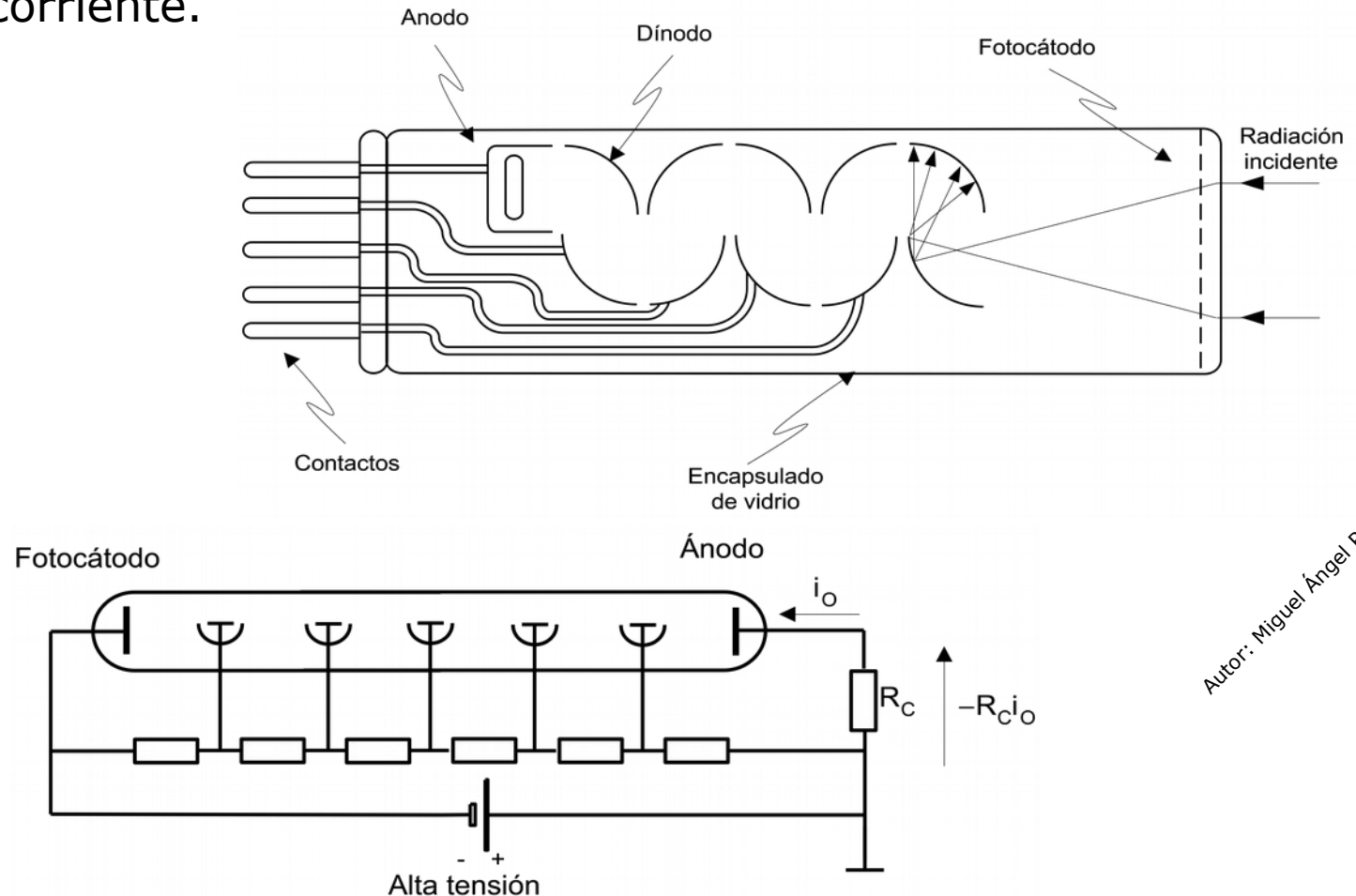
Transistores bipolares cuya base está al aire (o unida al emisor con resistencia para estabilizar) y que se activan con la acción de la luz



# Fotomultiplicadores

## ¿Qué son?

Son dispositivos capaces de detectar uno o más fotones. Usan potentes campos eléctricos para multiplicar la intensidad del pulso de corriente.



Autor: Miguel Ángel Pérez García



# **Fotomultiplicadores**

## **¿Cómo se usan?**

Desde el punto de vista práctico, se pueden considerar casi como fotodiodos pues responden con un pulso de corriente más o menos proporcional a la luz incidente.

## **¿Cuál es su aplicación?**

Se utiliza en sistemas de instrumentación óptica que vayan a trabajar a muy baja iluminación (p.e., telescopios).

Un diseño similar se usa para detectar radiación ionizante.

# Acondicionamiento de dispositivos optoelectrónicos

## Fotodiodos y fotomultiplicadores

Deben acondicionarse con un op amp en configuración de conversor I-V o con una simple resistencia si es todo/nada

## Fototransistores

En general, basta una simple resistencia de *pull-up* o *pull-down* ya que trabajan en colector abierto.

### **NOTA:**

El acondicionamiento de dispositivos optoelectrónicos es complicado y, si se plantea el uso, es necesario profundizar en el conocimiento. **P.e., ¿cómo afectan las capacidades parásitas?**

## Dispositivos CCD

Son fotodiodos con un condensador preparado para almacenar la carga generada en el pulso de corriente (píxel).

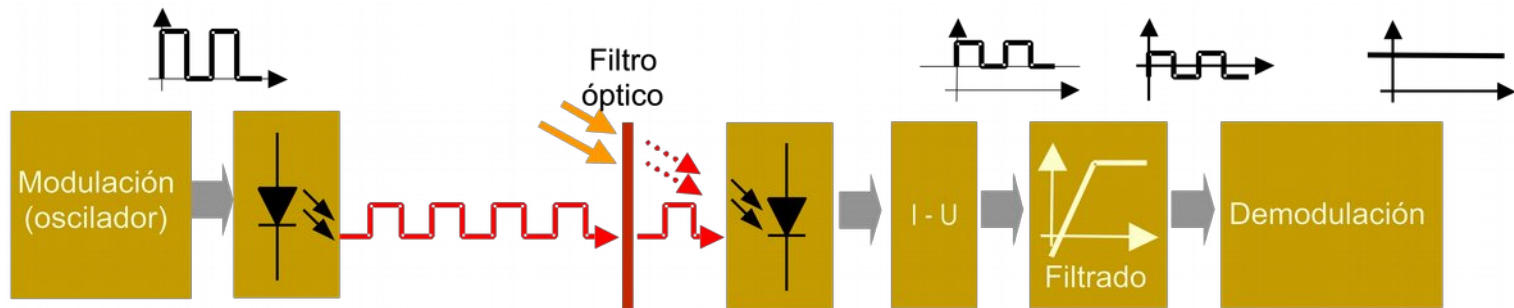
Su control es complejo y (quizá) no se mostrará en este curso.

# LEDs y fotorreceptores

## Uso de estos dispositivos

De especial importancia en el mundo de las comunicaciones:  
Mandos a distancias, fibras ópticas, ...

Un LED genera, un fotodiodo o fototransistor recibe.



Autor: Miguel Ángel Pérez García

## Luz ambiental

Para eliminar el efecto de la luz ambiental, se pueden usar filtros ópticos que permitan sólo el paso de luz de una determinada longitud de onda.

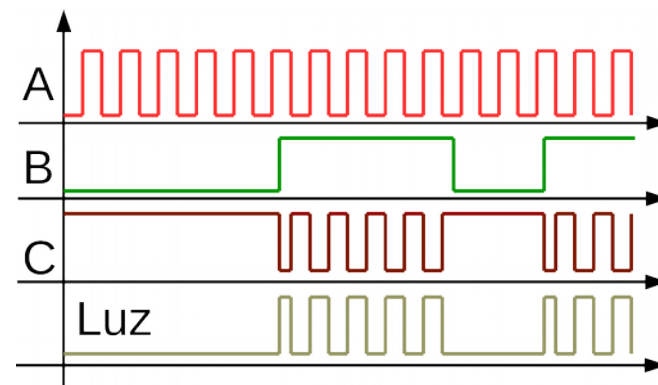
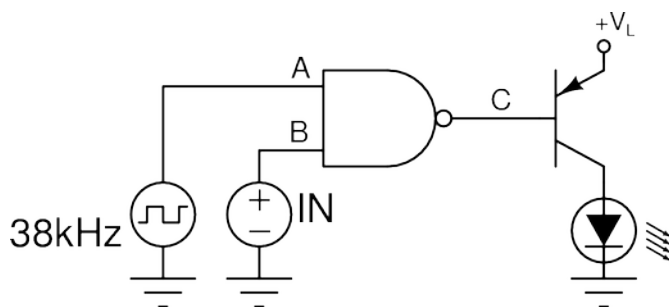
O modular en una frecuencia característica.

# Modulación a 38 kHz

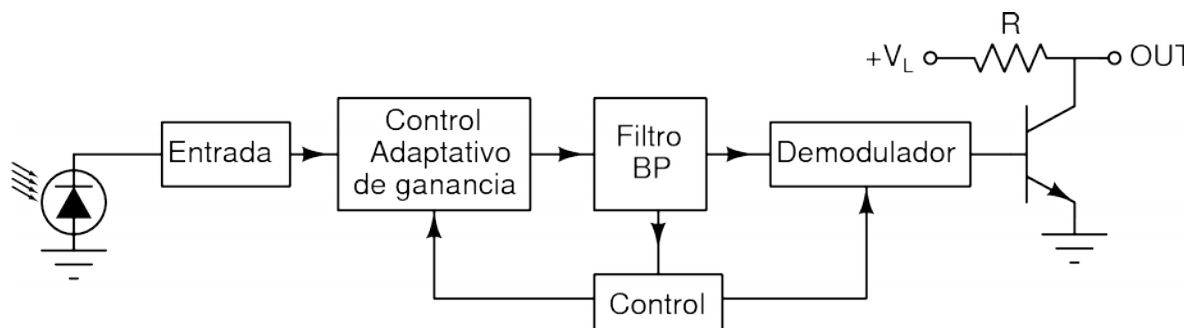
## ¿Por qué?

En ambientes reales, hay demasiadas fuentes de luz que enmascaran la señal transmitida y no tenemos garantía de que la potencia sea suficiente. Se soluciona modulando en amplitud.

### Emisión (ejemplo)



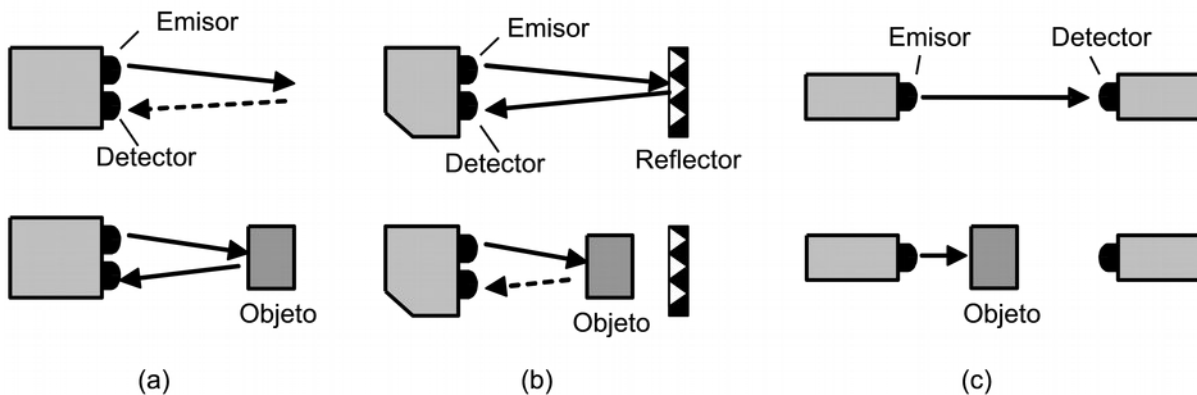
### Recepción



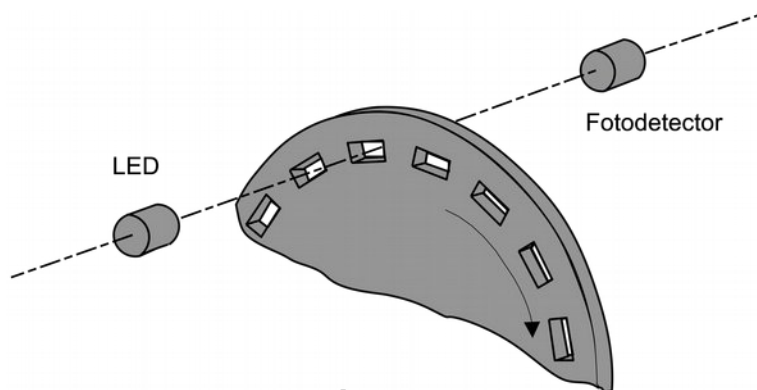
**Técnica muy utilizada (mandos a distancia, detectores, etc.)**

# LEDs y fotorreceptores

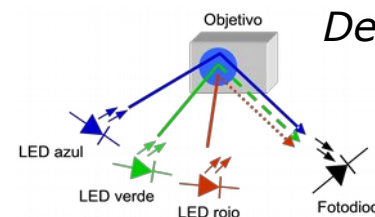
## Otros usos de estos dispositivos



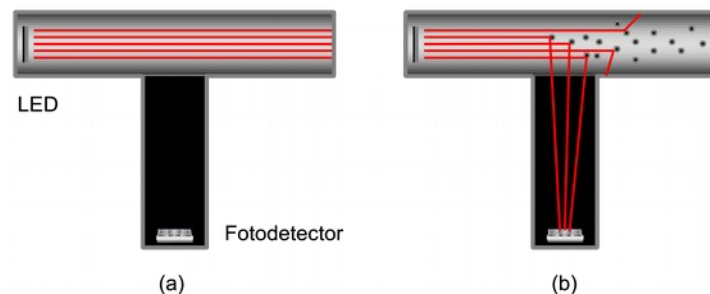
*Técnicas de detección de proximidad*



*Codificador óptico para determinar velocidad de giro*



*Detección del color*



*Detección de humo*

# Piroeléctricos y piezoelectricos

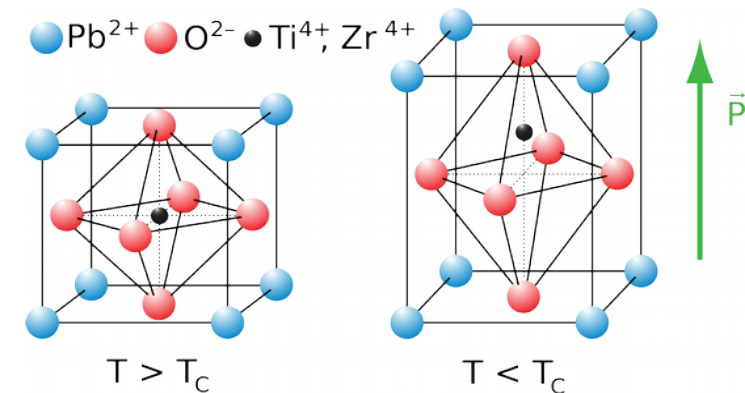
## ¿Qué son?

En algunos materiales, la peculiar distribución de iones en la red cristalina conlleva la aparición de dipolos eléctricos al ser sometidos bien a presión (piezoelectricidad), bien a cambios de temperatura (piezoelectricidad).

**Cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), sacarosa, turmalina, algunos compuestos orgánicos y cerámicos.**

En la práctica:

- **PZT:** Titanato-Zirconato de **plomo** (perovskita cerámica)
- **NKN:** Niobato de sodio y potasio (perovskita cerámica)
- **Dióxido de silicio:** Pero en un entorno muy especial...



Fuente: Wikipedia

**Piezoelectricidad y piezoelectricidad suelen ir de la mano**

# Piroeléctricos y piezoeeléctricos

## Puntos que tener en cuenta

- **Temperatura de Curie,  $T_c$** : Al alcanzar esta temperatura, el material pierde su carácter piezo/piroeléctrico.
- El efecto piezoeeléctrico aparece al deformar el material (carácter estático o dinámico). El piroeléctrico al someterlo a cambios de temperatura (siempre dinámico).
- La piezoelectricidad es bidireccional. Tensiones variables producen deformaciones: **Altavoces**
- Cuando deformamos un dispositivo piezoeeléctrico, intervienen:
  - La fuerza deformante
  - La respuesta del material (Lay de Hooke)
  - La fuerza de rozamiento (viscosidad)

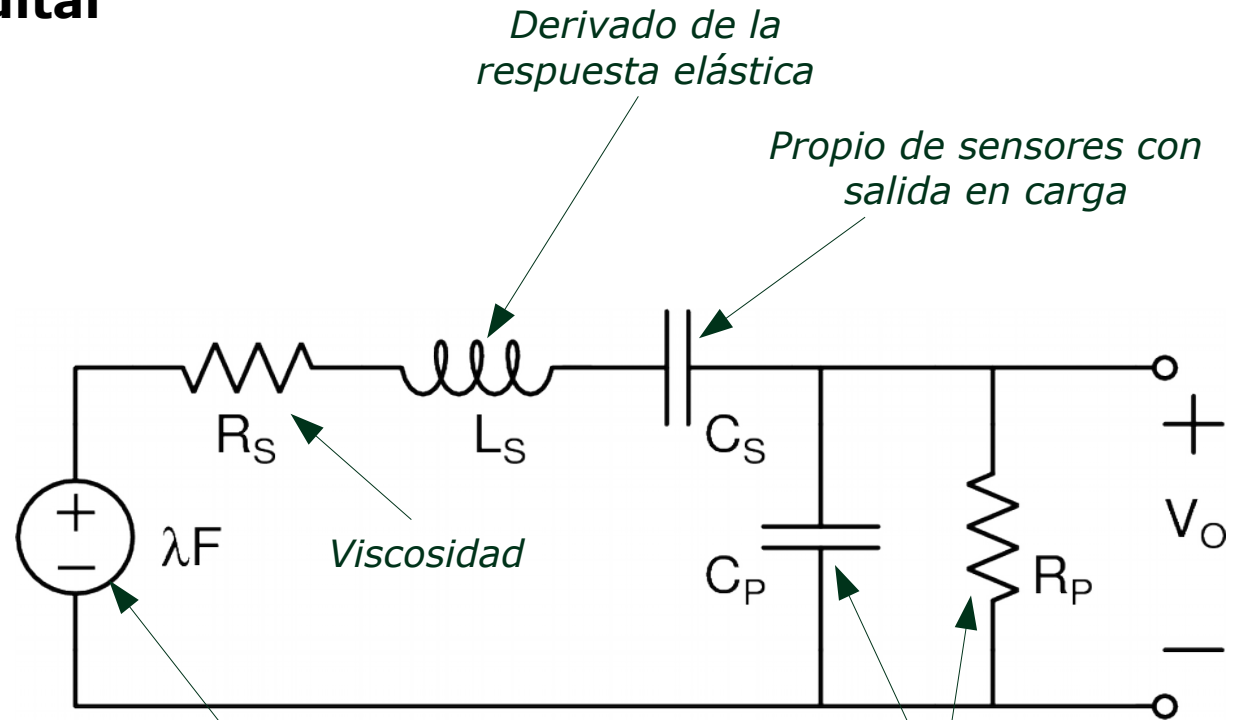
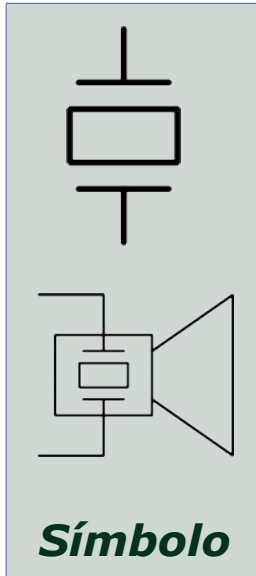
Esto conlleva la aparición de una ec. diferencial de orden 2.

- Además, los contactos forman un condensador parásito

**De aquí se puede extraer el modelo circuital del sensor**

# Piroeléctricos y piezoeléctricos

## Modelo circuital



La excitación original se modela como una fuerza en piezoeléctricos y con el incremento de  $T$  en piroeléctricos

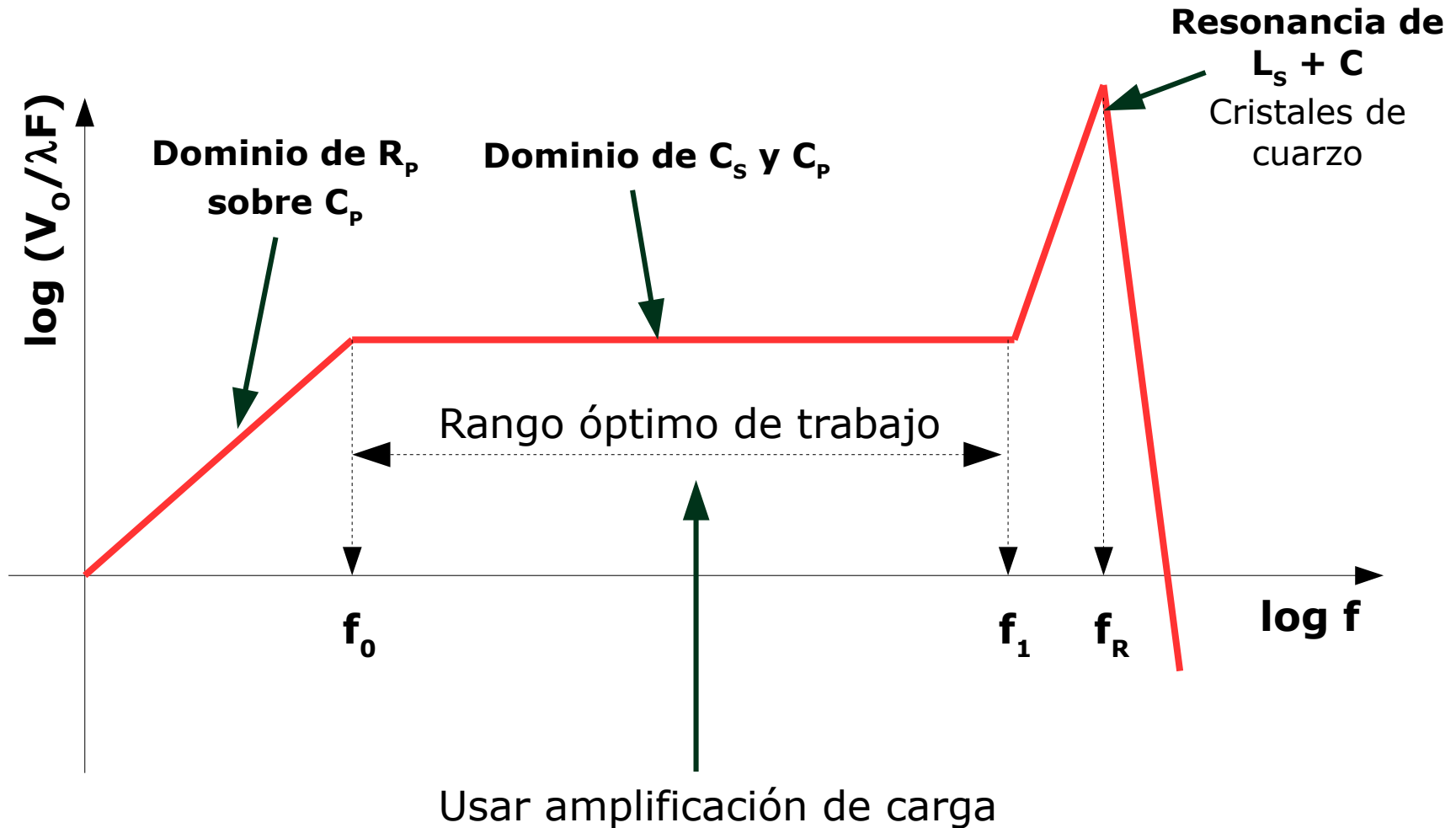
Capacidad asociada a los electrodos con su resistencia en paralelo

**Además hay que incluir los efectos del cable, voltímetro, ...**



# Piroeléctricos y piezoeléctricos

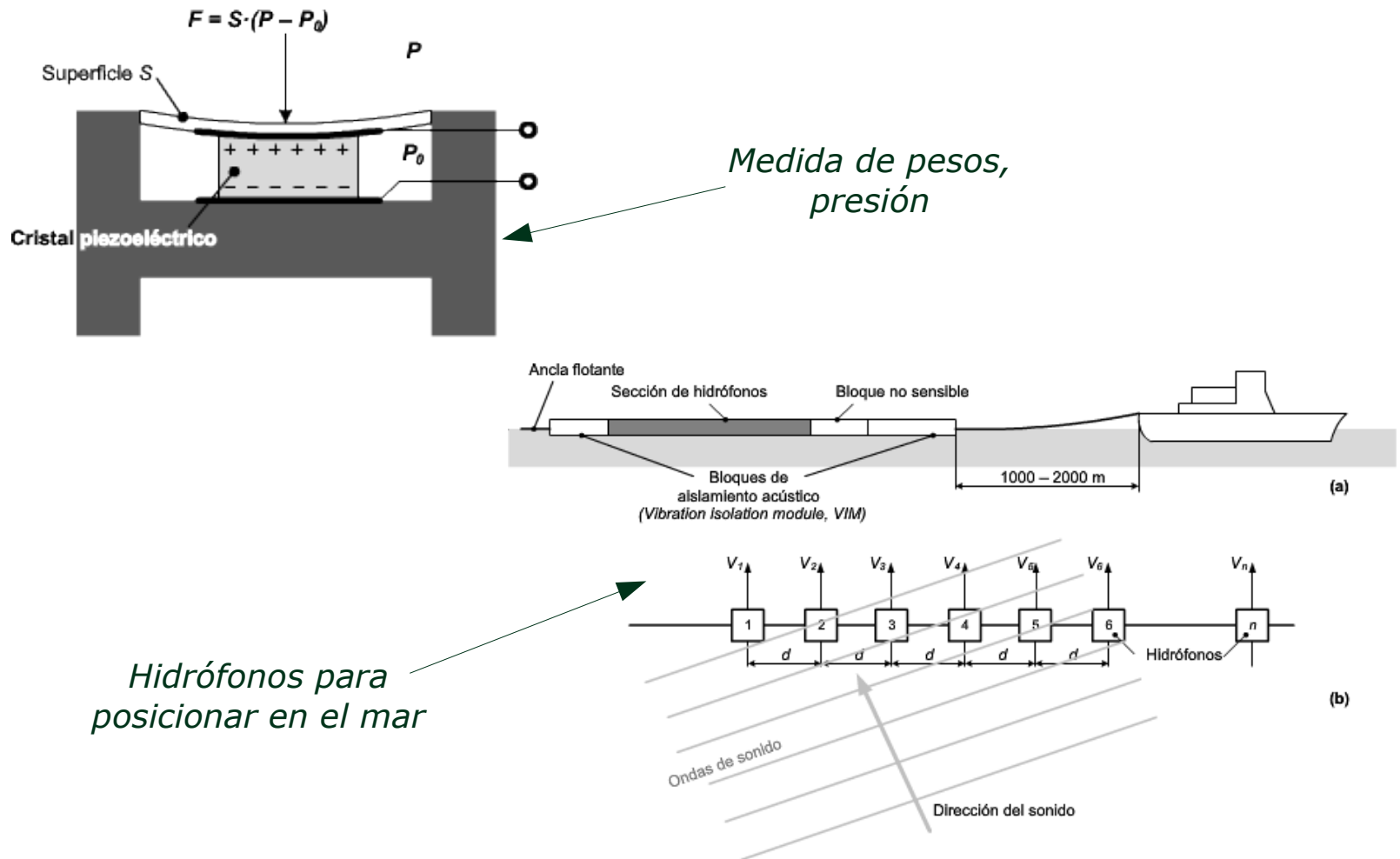
## Respuesta en frecuencia



**Y hay que incluir los efectos del cable, voltímetro, ...**

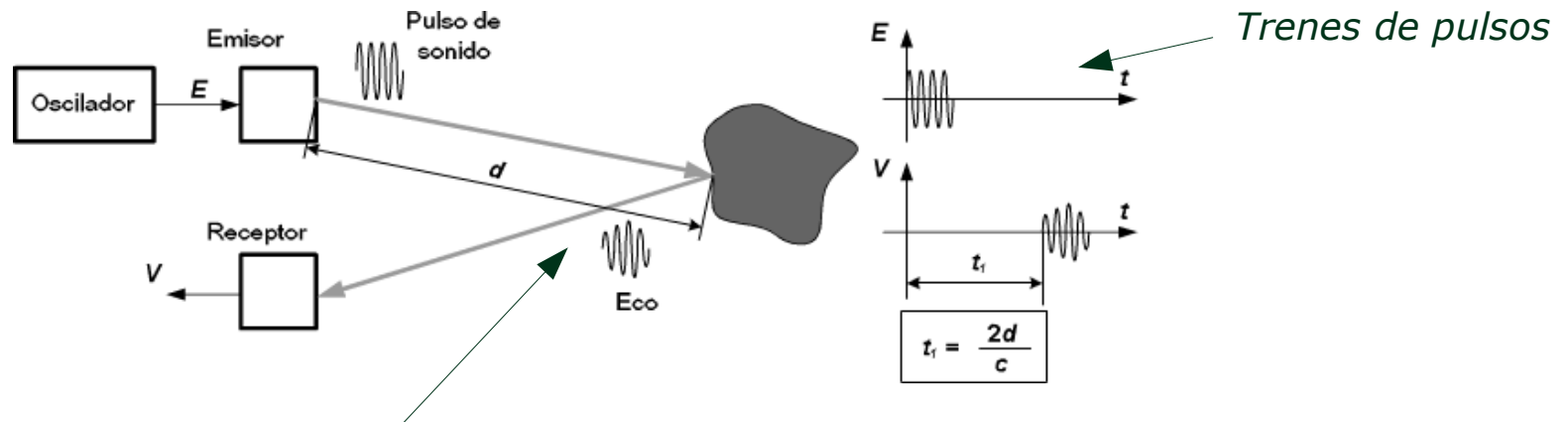
# Piroeléctricos y piezoeléctricos

## Aplicaciones de piezoeléctricos (I)



# Piroeléctricos y piezoeléctricos

## Aplicaciones de piezoeléctricos (II)



### **Posicionamiento por sonido.**

- *Incertidumbre asociada a la fracción de onda.*

### **Posicionamiento por sonido.**

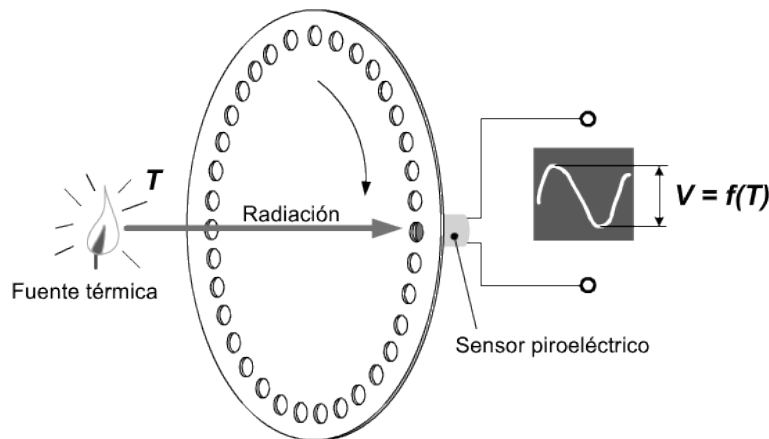
- *Incertidumbre por velocidad del sonido*
- *Efecto Doppler*

**¿Cuántos piezoeléctricos podríamos encontrar en un teléfono móvil?**

# Piroeléctricos y piezoeléctricos

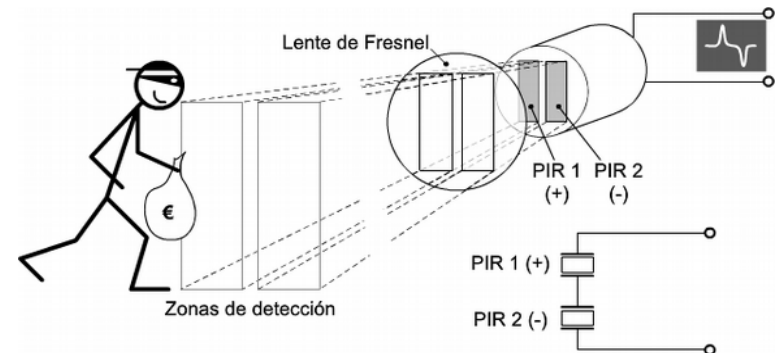
## Aplicaciones de la piroelectricidad

Circuitalmente, sólo hay que cambiar fuerza aplicada por evolución temporal de la temperatura. Especialmente indicada para la medida de la radiación infrarroja emitida por un cuerpo. **Se debe inducir algún cambio en la temperatura del sensor.**



### **Rueda agujereada**

- *Los ciclos de sombra/luz inducen cambios de temperatura en el sensor.*
- *Relacionable con temperatura*



### **Detección de presencia**

- *El paso de un cuerpo caliente se registra como un pico en la salida del sensor*