

## Tema 4 Dispositivos y Sensores

Parte 1. Diodos de semiconductor

Parte 2. El transistor bipolar

Parte 3. Transistores MOS

Parte 4. Sensores y actuadores

cei@upm.es

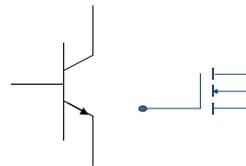


### Componentes discretos

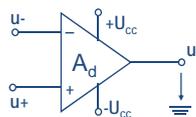
DIODO



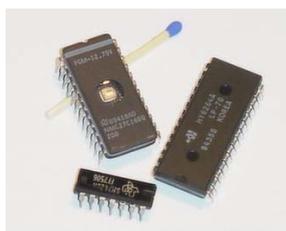
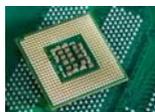
TRANSISTORES



AMPLIFICADOR OPERACIONAL



## Circuitos integrados



- Existe una gran variedad de chips en el mercado, ya que el **coste final** se reduce al fabricarlos en serie.
- Las **ventajas de integrar** incluyen, además del coste:
  - Reducción de peso
  - Aumento de prestaciones
  - Reducción de consumo
  - Confidencialidad
- Cabe destacar los **microprocesadores**, que son programables mediante software
- Los microprocesadores se utilizan tanto en los ordenadores como en sistemas embebidos (teléfonos móviles, lavadoras...)

## PARTE 1

### Diodos de semiconductor

- Símbolo, funcionamiento, curva característica
- Circuitos con diodos: rectificadores
- Diodos zener
- Circuitos con zener: estabilizador de tensión
- Diodos LED

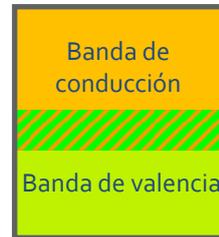
## Diagramas de bandas de Energía



Aislante ( $\text{SiO}_2$ )  
 $E_g = 9\text{eV}$



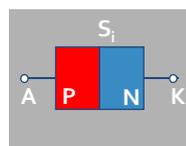
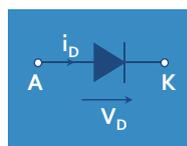
Semiconductor (Si)  
 $E_g = 1.1\text{eV}$



Conductor (Grafito)  
No hay  $E_g$

A  $0^\circ\text{K}$ , tanto los aislantes como los semiconductores no conducen, ya que ningún electrón tiene energía suficiente para pasar de la banda de valencia a la de conducción. A  $300^\circ\text{K}$ , algunos electrones de los semiconductores alcanzan este nivel. Al aumentar la temperatura aumenta la conducción en los semiconductores (al contrario que en los metales).

## Símbolo, funcionamiento, curva característica



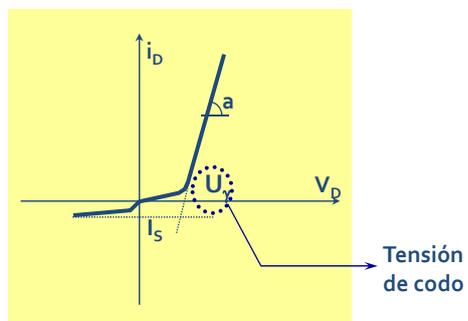
$$i_D = I_S \left[ e^{V_D / (kT/q)} - 1 \right]$$

Cuando  $V_D > V_\gamma (\approx 0,6\text{V})$

Pasa corriente de ánodo a cátodo  
Polarización directa

Cuando  $V_D < 0$   $i_D \approx -I_S$

Corriente en inversa muy pequeña



### Símbolo, funcionamiento, curva característica

**Característica linealizada**

**Característica ideal**

**Resistencia directa**

$V_D > V_\gamma \rightarrow V_D = V_\gamma + r_d \cdot i_D$

$0 < V_D < V_\gamma \rightarrow i_D = 0$

$V_D < 0 \rightarrow i_D = I_S (< 0)$

$V_D > 0 \rightarrow i_D > 0$  **Cortocircuito**

$V_D \leq 0 \rightarrow i_D = 0$  **Circuito abierto**

Fundamentos de Electrónica

### Circuitos con diodos: rectificador de media onda

**SEMICICLO POSITIVO**

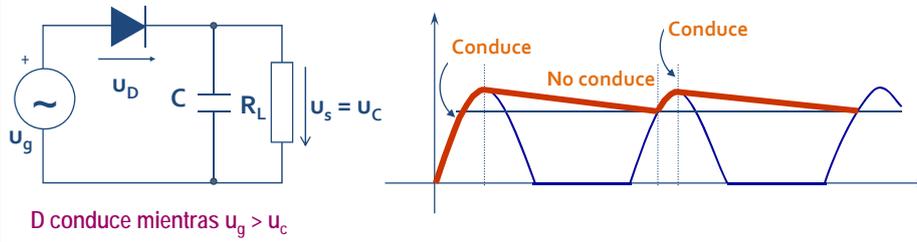
$0 < t < t_1 \quad u_g > 0 \quad u_D > 0$

**SEMICICLO NEGATIVO**

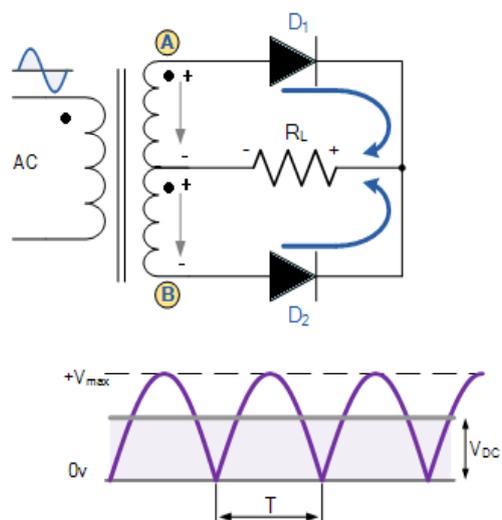
$t_1 < t < t_2 \quad u_g < 0 \quad u_D < 0$

Fundamentos de Electrónica

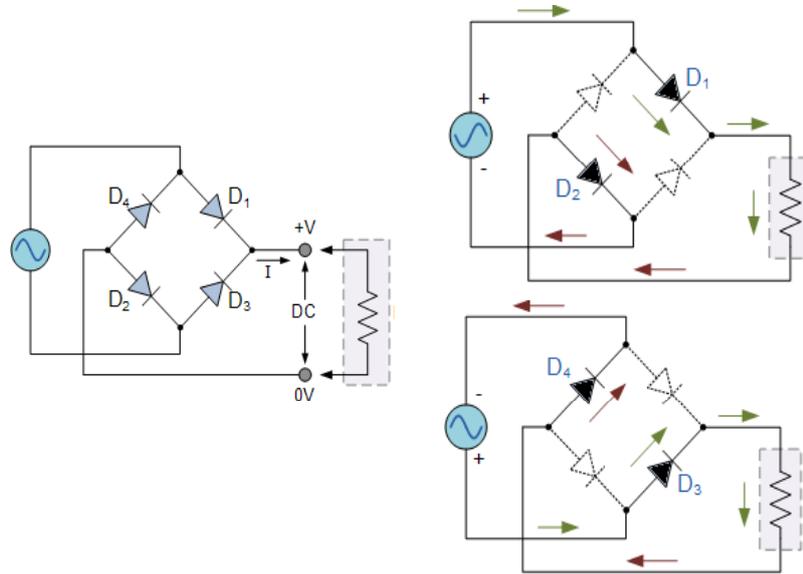
## Circuitos con diodos: rectificador de media onda



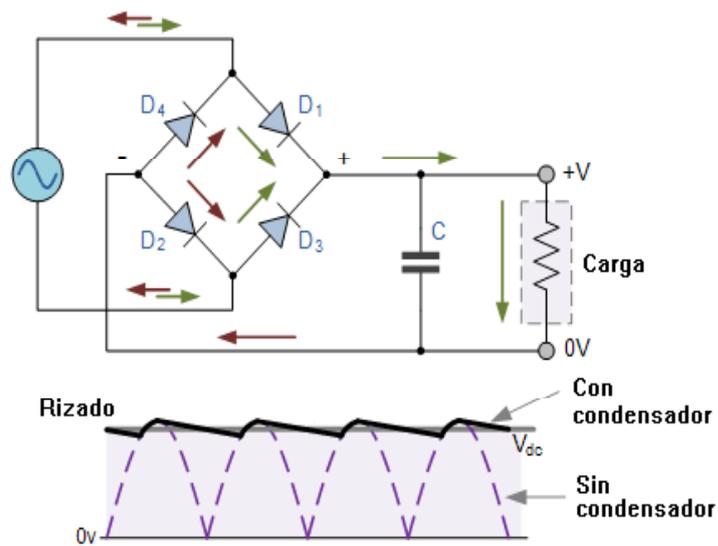
## Circuitos con diodos: rectificador de doble onda



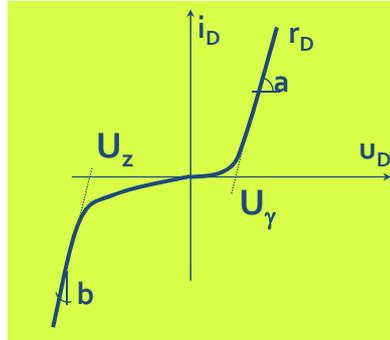
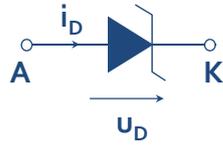
### Circuitos con diodos: rectificador de doble onda



### Circuitos con diodos: rectificador de doble onda



## Diodos zener

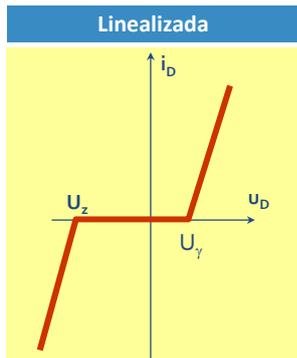


Cuando  $U_D > U_\gamma$

se comporta como un diodo normal

Cuando  $U_D < 0$  y supera  $U_z$

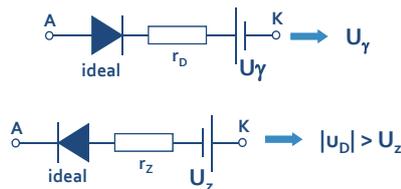
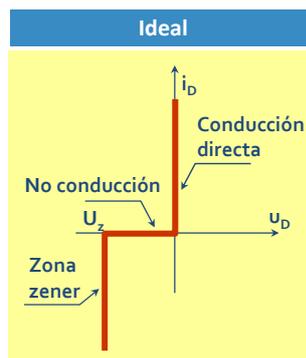
conduce en inversa



$$u_D > u_\gamma : i_D = \frac{u_D - u_\gamma}{r_D}$$

$$U_z < u_D < U_\gamma : i_D = 0$$

$$U_z < |u_D| : i_D = \frac{|u_D| - U_z}{r_z}$$



## Circuitos con zener. Estabilizador de tensión

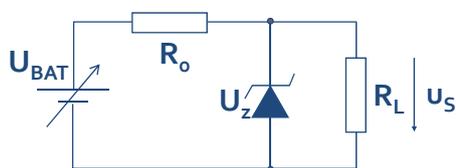
### DATOS

$$U_{\text{BAT}} = 10 \div 12\text{V}$$

$$R_o = 100\Omega$$

$$R_L = 1\text{k}\Omega$$

$$D_z \text{ ideal: } U_z = 7\text{V}$$



Si no hubiera zener:

$$u_s = U_{\text{BAT}} \frac{R_L}{R_L + R_o} = 9,1 \div 10,9\text{V}$$

## Circuitos con zener. Estabilizador de tensión

Suponemos que el zener conduce en Zona Zener.

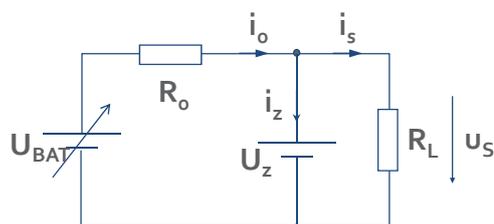
Para que esto ocurra:  $i_z > 0$  según el criterio de la figura

$$u_s = U_z = 7\text{V}$$

$$i_s = 7\text{mA}$$

$$i_{\text{omin}} = \frac{U_{\text{BATmin}} - U_z}{R_o} = 30\text{mA}$$

$$i_{\text{omax}} = \frac{U_{\text{BATmax}} - U_z}{R_o} = 50\text{mA}$$



$$i_z = i_o - i_s$$

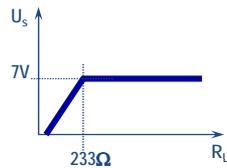
$$i_{z\text{min}} = 30 - 7 = 23\text{mA}$$

$$i_{z\text{max}} = 50 - 7 = 43\text{mA}$$

## Circuitos con zener. Estabilizador de tensión

¿Hasta qué valor de  $R_L$  estabiliza la tensión este circuito?

Para el valor que haga  $i_z = 0$



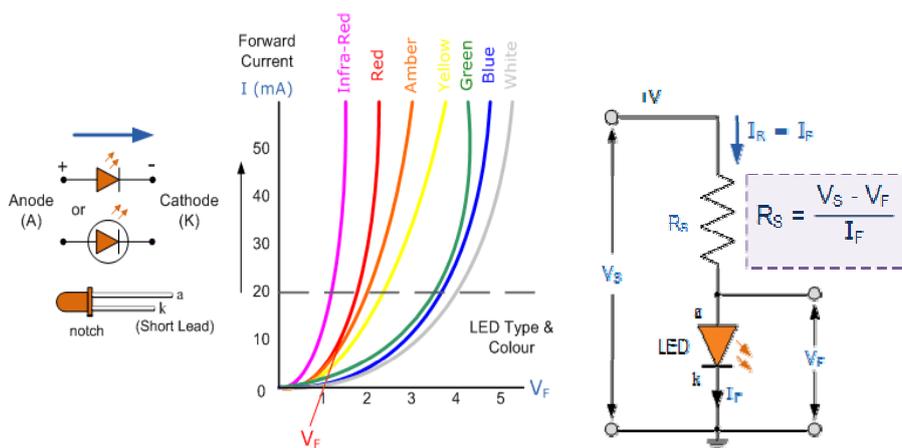
$$U_{\text{BAT}} = 10\text{V} \quad i_o = 30\text{mA} = i_s$$

$$R_{L\text{limite1}} = \frac{7}{30} = 233\Omega$$

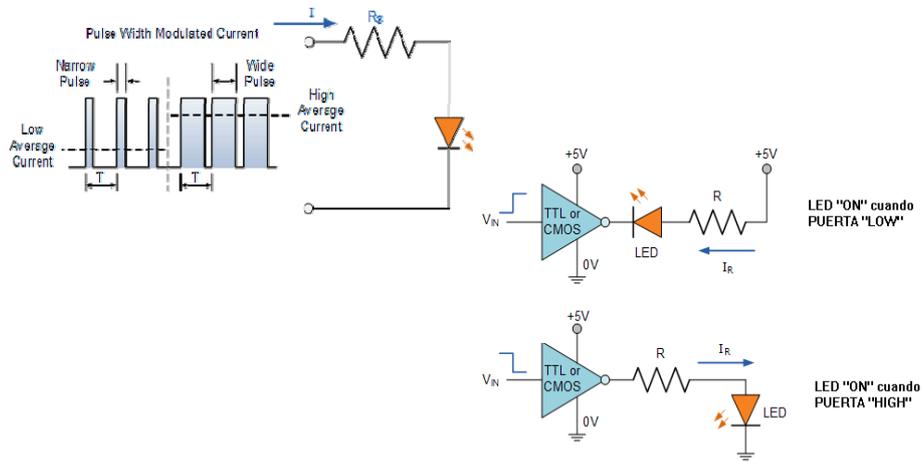
$$U_{\text{BAT}} = 12\text{V} \quad i_o = 50\text{mA} = i_s$$

$$R_{L\text{limite2}} = \frac{7}{50} = 140\Omega$$

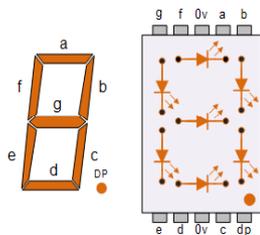
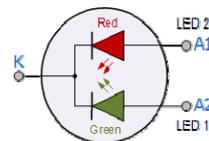
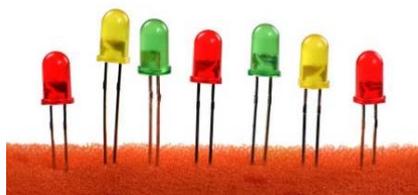
## LED: Light Emitting Diode 1



## LED: Light Emitting Diode 2

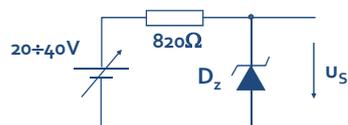


## LED: Light Emitting Diode 3



## Problemas. Enunciados

- 1 Sobre el circuito de la figura, calcular las variaciones de la tensión de salida para las variaciones de la tensión de entrada dadas.

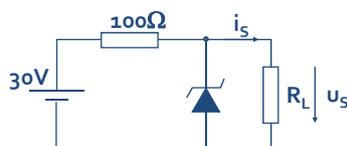


### DATOS

$$D_z: U_Z = 10V$$

$$R_Z = 7\Omega$$

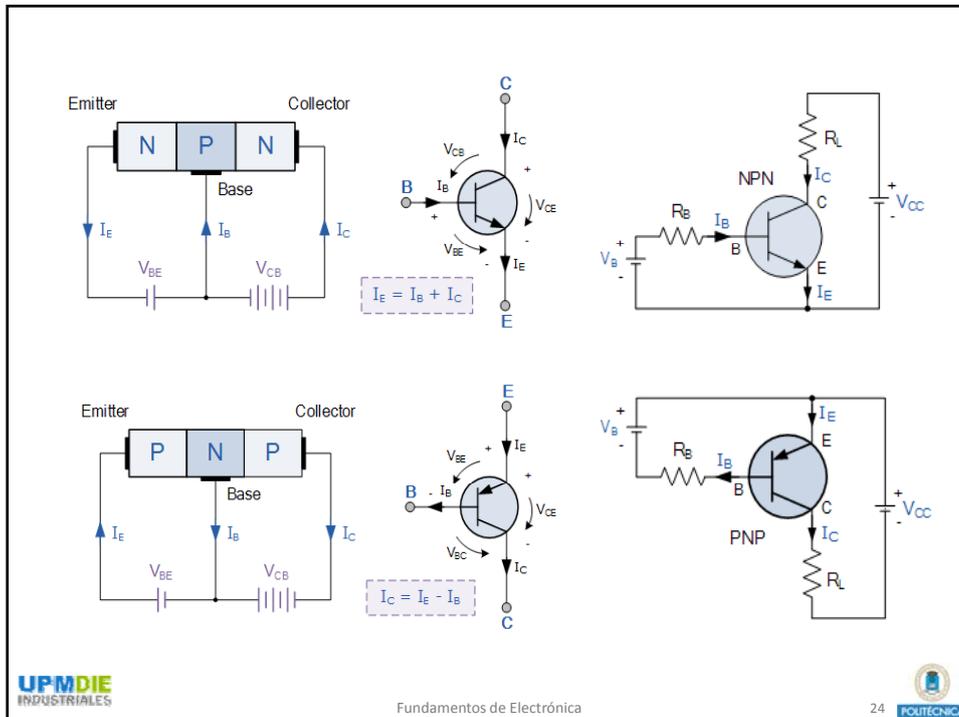
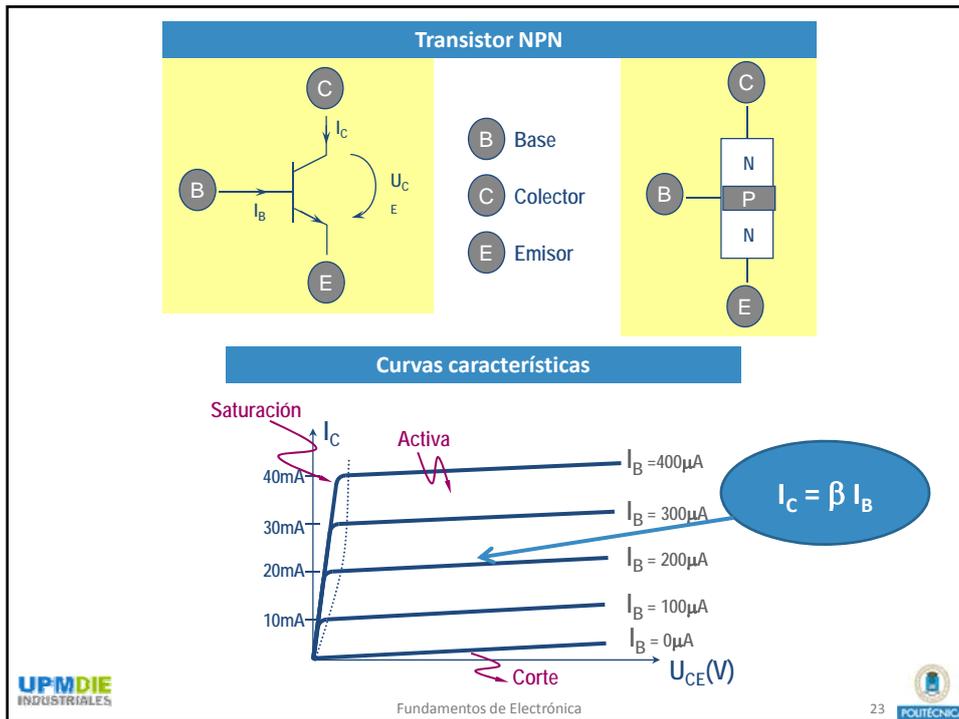
- 2 Se define como curva de regulación de un estabilizador a la que relaciona la tensión de salida  $u_s$  con la corriente de salida  $i_s$ . Se pide dibujar dicha curva para el circuito de la figura, sabiendo que la carga  $R_L$  varía entre  $300\Omega$  y  $100\Omega$  y que el diodo zener puede considerarse ideal con  $U_z=20V$ . ¿Entre qué valores de  $R_L$  el funcionamiento del estabilizador es correcto?



## PARTE 2

# El transistor bipolar

- Símbolo, funcionamiento, curva característica
- Polarización, recta de carga
- Ejemplos de aplicación

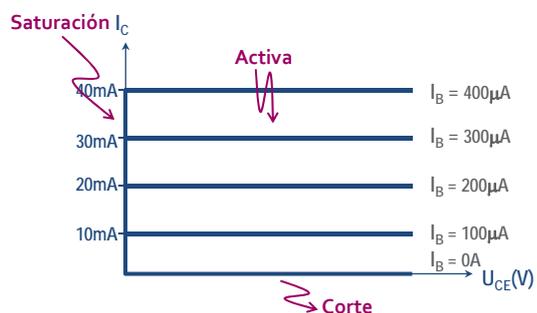


## Zonas de funcionamiento

	$I_B$	$U_{BE}$	$U_{CE}$	$I_C$
ZONA DE CORTE	= 0	< 0V		= 0
ZONA ACTIVA	> 0	≈ 0,6V	> 0,3V	= $\beta I_B$
ZONA DE SATURACIÓN	> 0	≈ 0,6V	≈ 0V÷0,3V	< $\beta I_B$

CORTE	Interruptor abierto	
ACTIVA	Zona lineal	$I_C = \beta I_B$
SATURACIÓN	Interruptor cerrado	

## Transistor ideal

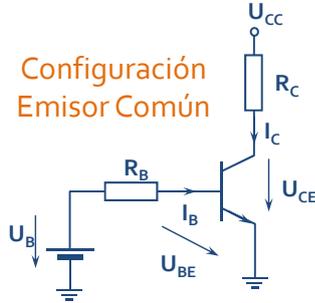


- $\beta = \text{Constante}$
- $U_{BE} \text{ sat. o activa} = 0V$
- $U_{CE} \text{ saturación} = 0V$
- $I_C \text{ corte} = 0$

## Polarización. Recta de carga

**POLARIZAR:** Alimentar al transistor, darle un punto de trabajo

Configuración Emisor Común



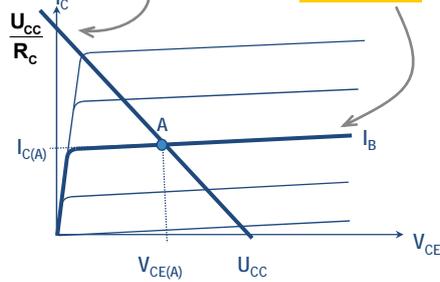
Punto de trabajo A ( $V_{CE(A)}$ ,  $I_{C(A)}$ )

Recta de carga

$$U_{CC} = R_C I_C + U_{CE}$$

$$U_B = R_B I_B + U_{BE}$$

$$I_B = \frac{U_B - U_{BE}}{R_B}$$



El *punto de trabajo* viene dado por el corte de la recta de carga y la curva característica para la corriente de base  $I_B$

## Ejemplo I: Circuitos con transistores

### DATOS

Transistor ideal

Zona activa:

$$\beta = 100$$

$$V_{BE} = 0V$$

Zona saturación:

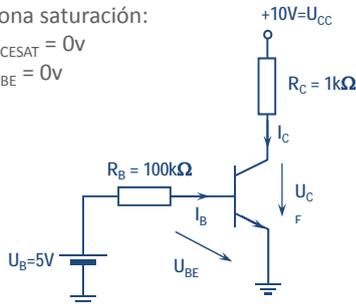
$$V_{CESAT} = 0V$$

$$V_{BE} = 0V$$

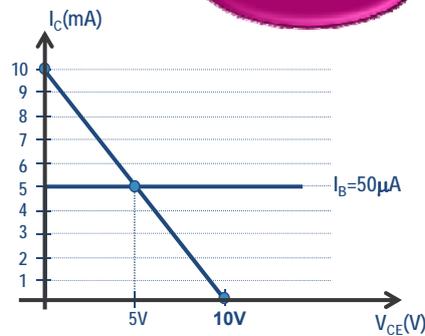
$$R_B = 100k\Omega$$

$$I_B = \frac{U_B}{R_B} = 50\mu A$$

$$I_C = \beta I_B \rightarrow I_C = 5mA$$



Zona Lineal



### Ejemplo II: Circuitos con transistores

**DATOS**

Transistor ideal  
 Zona activa:  
 $\beta = 100$   
 $V_{BE} = 0v$   
 Zona saturación:  
 $V_{CESAT} = 0v$   
 $V_{BE} = 0v$

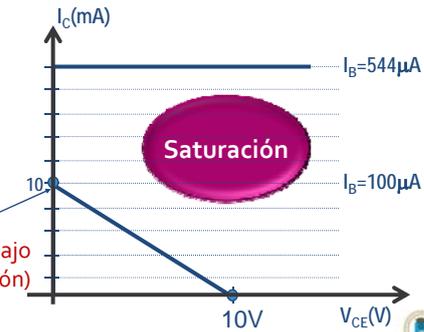
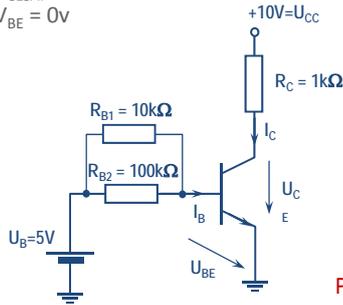
$R_B = 9.09k\Omega$      $I_B = \frac{U_B}{R_{B1} // R_{B2}} = 544\mu A$      $I_C = \beta I_B = 54,4mA$

No puede estar en zona Lineal

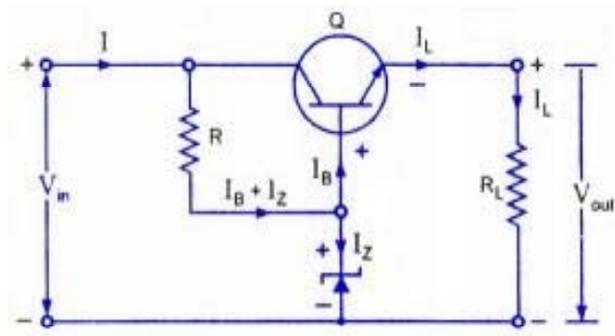
$U_{CC} = R_C I_C + U_{CE} \rightarrow U_{CE} = -44,4V!!!$

Transistor en saturación  $\rightarrow U_{CE} \approx 0V$

$U_{CC} = R_C I_C + U_{CE} \rightarrow I_C = 10mA$

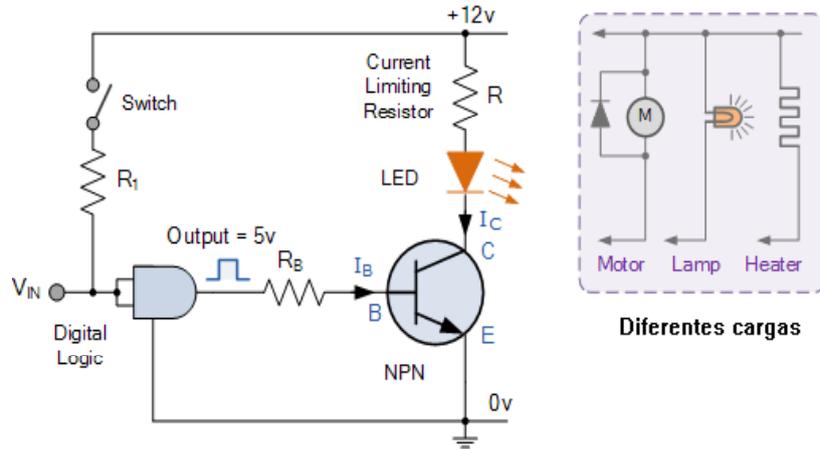


### Ejemplo III: Estabilizador de tensión. ZONA LINEAL



$V_{out} = V_z - U_{be}$

### Ejemplo IV: CORTE y SATURACIÓN (Interrupción)



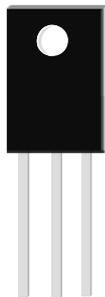
### Encapsulado de transistores

Encapsulado  
TO-92



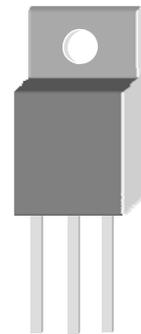
BC548 (NPN)  
BC558 (PNP)

Encapsulado  
TO-126 (SOT-32)



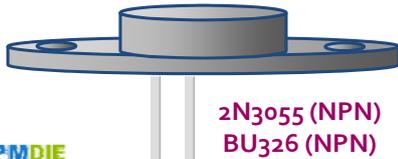
BD135 (NPN)  
BD136 (PNP)

Encapsulado  
TO-220



MJE13008 (NPN)  
IRF840 (MOSFET, N)  
BDX53C (Darlington)

Encapsulado  
TO-3

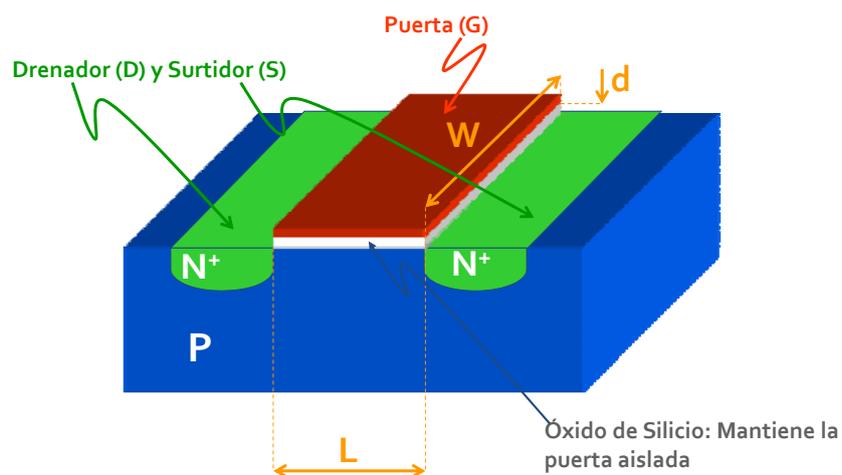


2N3055 (NPN)  
BU326 (NPN)

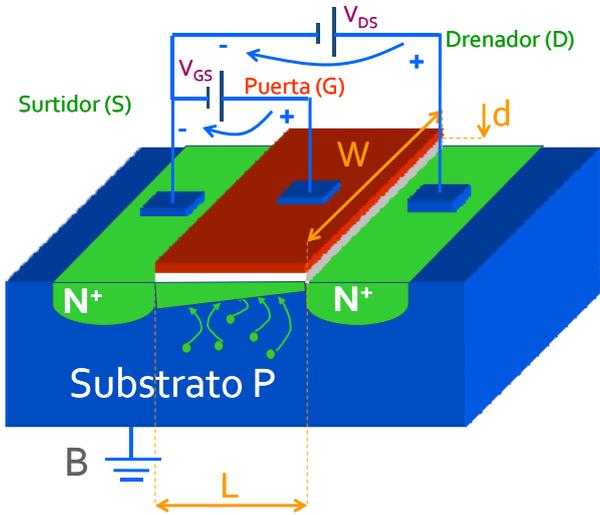
## PARTE 3 Transistores MOS

- Símbolo, funcionamiento, curva característica
- Ejemplos de aplicación

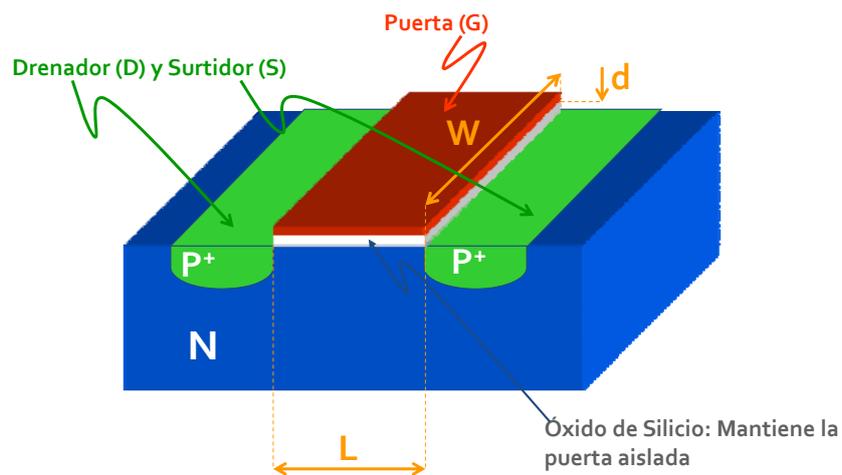
### El Transistor nMOS

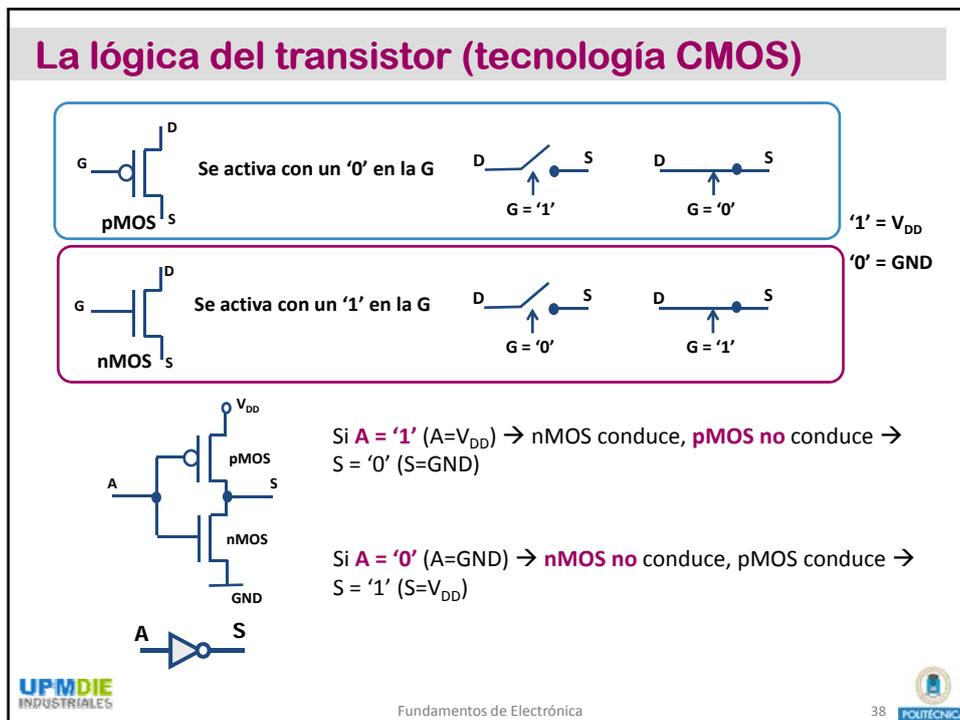
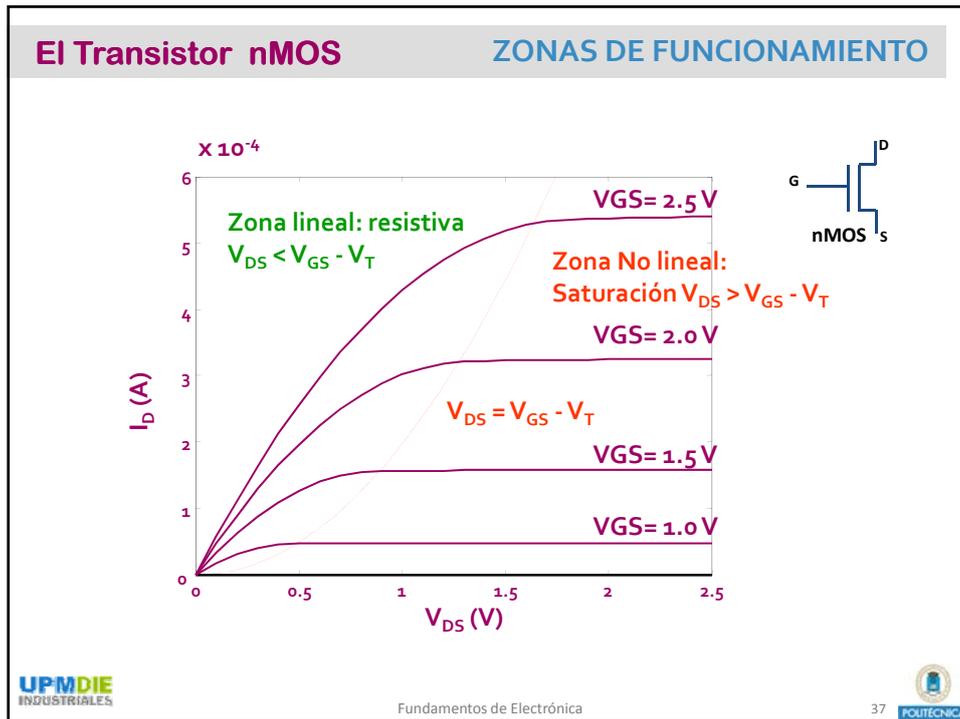


## El Transistor nMOS



## El Transistor pMOS





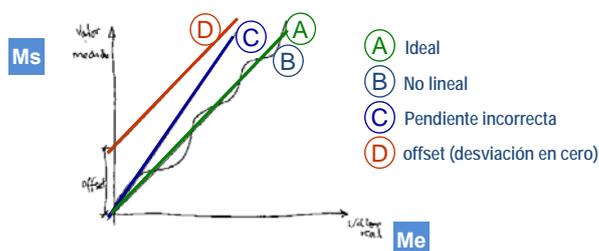
## PARTE 4

# Sensores y actuadores

- Procesos de media
- Sensores
- Actuadores

### Procesos de medida

- En un proceso de medida puede haber errores: diferencias entre el resultado obtenido y el valor real

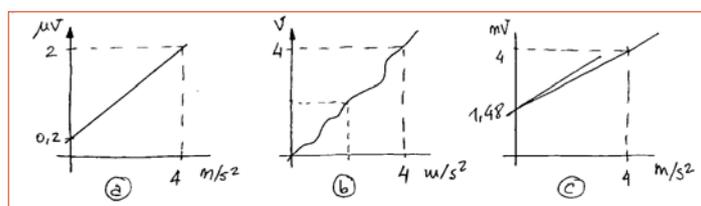


- La **linealidad** refleja si hay o no una relación lineal entre el valor real y el medido. La **no linealidad** es difícil de corregir y, por tanto, es un parámetro importante.
- El **offset** o **desviación de cero** refleja el valor medido cuando el sensor debería devolver cero. Genera un error, pero es más fácil de corregir.

## Características básicas de los sensores

Precisión	Error máximo esperado
Offset	Desviación de cero
Linealidad	Desviación respecto de una línea recta en la curva de respuesta
Sensibilidad	Variación de la magnitud de salida al variar la magnitud a medir $dM_s/dM_e$
Margen de medida	Rango de variación de la magnitud a medir en el que se asegura una cierta precisión
Resolución	Mínima variación de la magnitud de entrada que puede apreciarse a la salida
Rapidez de respuesta	Capacidad del sistema de medida para seguir las variaciones de la magnitud de entrada
Derivas	Las medidas pueden ser diferentes en función de las variaciones ambientales (temperatura, humedad, envejecimiento,...)
Repetitividad	Error esperado al repetir varias veces la misma medida

## Ejemplo: Acelerómetros (margen $0 \div 4 \text{ m/s}^2$ )



- a) Lineal, poca sensibilidad, bajo offset
- b) No lineal, alta sensibilidad, sin offset
- c) Lineal, sensibilidad media, alto offset

## Tipos de sensores

Activos  
y  
pasivos

**Activos:** Generan una señal eléctrica (termopares, etc.)  
**Pasivos:** Modifican una característica eléctrica (resistividad, capacidad, etc.)

Directos y de  
accionamiento  
intermedio

**Directos:** La magnitud de salida se obtiene directamente.  
**Accionamiento intermedio:** La magnitud de entrada se convierte en otra que es medida directamente

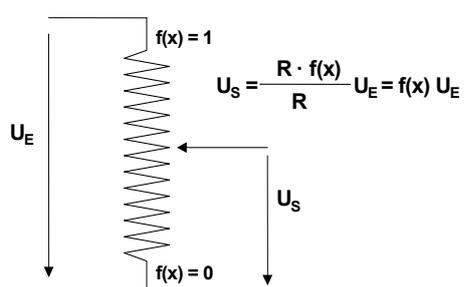
Analógicos  
y  
digitales

**Analógicos:** Devuelven una señal de tipo continuo  
**Digitales:** Devuelven una señal de tipo discreto

## Resistivos

## POTENCIÓMETROS

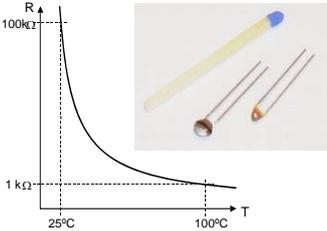
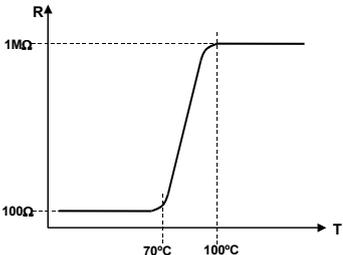
Producen una señal eléctrica proporcional a la posición



Son lineales

Tienen mala estabilidad térmica

Resistivos	RTD (Resistance Temperature Detector)
Se basan en la variación de la resistencia con la temperatura	
<b>Margen de medida</b>	-200°C ÷ 850°C
<b>Variación de resistencia respecto de la temperatura</b>	$R = R_0 (1 + \alpha T)$ $R_0 = 100 \Omega ; \alpha = 3.9 \cdot 10^{-3}$
<b>Características</b>	<p>Poco sensibles (<math>\alpha</math> es muy pequeño)</p> <p>Son muy precisas (0,01°C)</p> <p>Son caras</p> <p>Tienen buena linealidad (fáciles de calibrar)</p> <p>Alto margen de medida</p> <p>Bajas derivas</p>
	
  	

Resistivos	Termistores NTC y PTC
Tienen alta sensibilidad, aunque mala linealidad	
<b>NTC</b> (Negative Temperature Coefficient)	<b>PTC</b> (Positive Temperature Coefficient)
	
<b>Margen de medida</b>	-50°C ÷ 150°C
<b>Características</b>	<p>Se hacen con óxidos metales</p> <p>No son lineales</p> <p>Alta sensibilidad</p> <p>Alta resolución (0,01°C)</p>
<b>Características</b>	<p>Se hacen con cristales de titanato de bario</p> <p>Se utilizan principalmente para protecciones térmicas</p>
  	

## Resistivos: LDR

### LDR (Light Dependent Resistor)

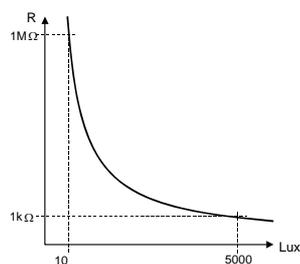


Dispositivo resistivo que disminuye el valor de su resistencia al incrementar la intensidad de la luz

Se hacen con sulfuro de cadmio (SCd)

Velocidad de respuesta baja (10ms)

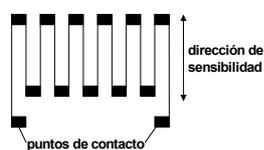
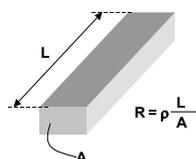
Longitudes de onda en VISIBLE: 380nm y 750nm



## Sensores de fuerza y extensimetría

### Galga extensiométrica

Miden deformaciones variando su resistencia



### Dispositivos piezoeléctricos

Se usan para medir fuerzas.

Se caracterizan por generar una salida eléctrica al someterlos a un esfuerzo mecánico

## Sensores de fuerza y extensimetría



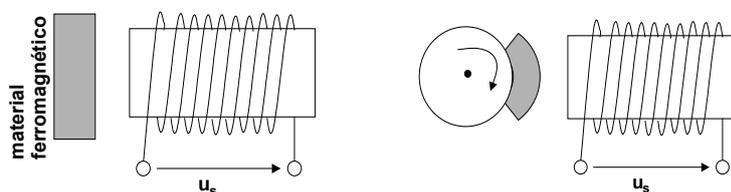
Strain gauges

Load cells



## Inductivos

La inductancia de una bobina se ve afectada por la presencia de material ferromagnético



Situando en el rotor una chapa de material ferromagnéticos, cada vez que el rotor dé una vuelta, la inductancia de la bobina cambiará.

Contando el tiempo que tarda el rotor en dar una vuelta, se podrán calcular las revoluciones por minuto a las que gira el rotor.

## Inductivos: ABS

### ABS rueda delantera de moto

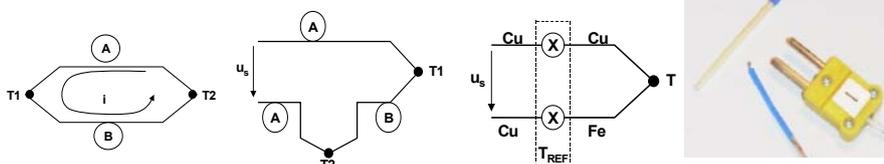


## Termopares

Se basan en el **Efecto Seebeck**:

“Si dos metales distintos se unen por dos puntos a distintas temperaturas, se produce una circulación de corriente eléctrica”

Si se abre el circuito por uno de los metales, se tendrá una tensión proporcional a la diferencia de temperaturas (potencial termoelectrónico)



**Margen de medida** -200°C ÷ 2000°C

### Características

Metales: Cu, Fe, constantán, cromel, alumel, Pt, Rh, Re, etc.  
 Respuesta rápida  
 Robustos  
 Tensión termoelectrónica muy baja → amplificadores de precisión  
 Baja sensibilidad (50µV/°C)

## Semiconductores

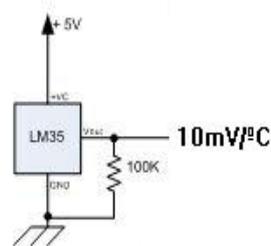
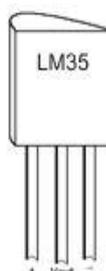
## Sensores de Temperatura

En un diodo, con una corriente fija, la tensión entre los terminales varía  $2\text{mV}/^{\circ}\text{C}$  aproximadamente

## Características

Son baratos y fáciles de usar  
Tiene un margen de medida bajo ( $-50^{\circ}\text{C} \div 150^{\circ}\text{C}$ )

## Ejemplo: LM35



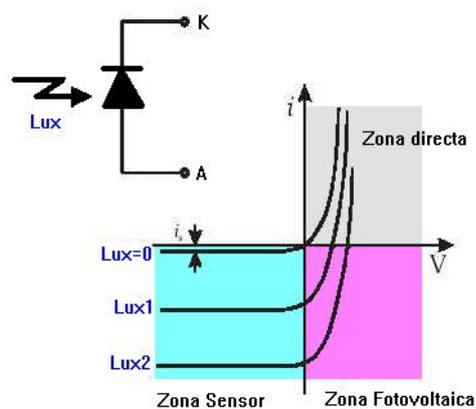
## Semiconductores

## Fotodiodos

Al incidir la luz sobre él, se producirá una circulación de corriente que es proporcional a la intensidad de la luz

Su sensibilidad es baja. Se utilizan los **fototransistores** para incrementarla.

Velocidad de respuesta alta ( $1\mu\text{s}$  o menos)

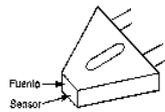


## Optoacopladores

Dispositivo para medir otras magnitudes (longitudes, ángulos, etc) o para detectar la presencia o ausencia de un objeto.

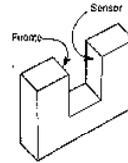
Consiste en un sensor de luz (fototransistor) y una fuente de luz (LED, diodo emisor de luz)

### REFLEXIVO



El sensor y la fuente de luz están montadas sobre la misma superficie de forma que la presencia de un objeto reflexivo hará que la luz llegue al sensor y circule corriente a través del fototransistor

### RANURADO



El sensor y la fuente de luz están uno frente al otro de forma que la presencia de un objeto interrumpa el paso de la luz

## Actuadores I

Se alimentan con una señal eléctrica y producen variación de una magnitud física. EJEMPLOS:



## Actuadores II

### Calor

Calentadores resistivos  $P = R \cdot I^2$



### Luz

Diodos emisores de luz: LEDs  
GaAs; GaP;... depende del color/infrarrojos

Visualizadores de 7 segmentos

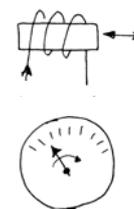
LED infrarrojos para comunicación a corta distancia (control remoto)



## Actuadores III

### Relés y Contactores

Una bobina con una pieza de material ferromagnético que se puede mover. Dependiendo del sentido de la corriente, la pieza es atraída hacia dentro o hacia fuera



TGV Madrid - Málaga  
París 20/12/07, Portugal

### Motores

**MOTORES DE CA:** Alta potencia y poca precisión

**MOTORES DE CC:** Media potencia y precisión

**MOTORES PASO A PASO:** Posicionamiento

## Actuadores IV

### Altavoces

Constan de un imán permanente más una bobina móvil que mueve un diafragma, el cual, al vibrar, emite sonido.



### Motor piezoeléctrico

A muy alta frecuencia se utilizan actuadores piezoeléctricos.

