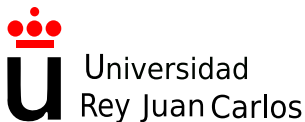


## 4. Sensores de color, luz y visión

Julio Vega

[julio.vega@urjc.es](mailto:julio.vega@urjc.es)



Sensores y actuadores



(CC) Julio Vega

*Este trabajo se entrega bajo licencia **CC BY-NC-SA**.  
Usted es libre de (a) compartir: copiar y redistribuir el material en  
cualquier medio o formato; y (b) adaptar: remezclar, transformar  
y crear a partir del material. El licenciador no puede revocar estas  
libertades mientras cumpla con los términos de la licencia.*

# Contenidos

- 1 Introducción
- 2 IRLED, sensores fotodiodo y fototransistor
- 3 Fotorresistencia o LDR (*Light Dependent Resistor*)
- 4 Sensor de color
- 5 Sensor de visión
- 6 Anexo

- Veremos todos los sensores que miden variables físicas mediante luz.
- Luz muy eficiente para medir dist.,  $T^a$ , comp. química, color, etc.
- Luz compuesta por fotón, o llamado “cuanto de luz” por A. Einstein.
  - Fotón: partícula elemental de luz o “cuanto de energía EM”.
- Energía presente en luz tiene dualidad onda-partícula.
  - A pesar de que su masa es nula, tiene comporta/ corpuscular (CC).
    - CC: elemento se considera partícula elemental que compone un objeto.
    - E.g. efecto fotoeléctrico: incide fotón en material y este emite  $e^-$ .
- Luz se usa general/ para referirse al espectro electromagnético.
  - Espectro EM: representación de cuánta energía contiene una onda EM.
    - Energía fotón/ondaEM depende de su long. onda: -long. = +energía.
- Para medición de variables físicas, luz se considera un haz (no onda).

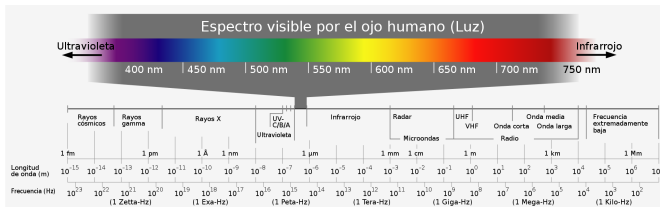


Figura: Imagen extraída de Wikipedia



- Diodo: SC (unión PN) en el que la corriente fluye en un solo sentido.
  - SC tipo  $P$ : tienen impurezas aceptoras; generan  $\uparrow\uparrow$  *portadores huecos* $^{+}$ .
  - SC tipo  $N$ : tienen impurezas donoras; generan  $\uparrow\uparrow$  *portadores  $e^{-}$* .
  - La conducción se produce en polarización directa ( $P$  a  $V^{+}$  y  $N$  a  $V^{-}$ ).
- Transistor: SC controlado por  $I$  y del que se obtiene  $I_{amplificada}$ .
  - Unipolar: transistor de efecto campo (FET, *Field Effect Transistor*).
  - El canal de un FET es dopado para producir un SC tipo N o uno tipo P.
  - Tres terminales: puerta (*Gate*), drenador (*Drain*) y fuente (*Source*).
  - Si  $V^{+}$  entre  $D - S$  y conectando  $G$  a  $S \Rightarrow \exists$  corriente (de drenador).
  - Si  $V^{-}$  en  $G$  (tensión de estrangulamiento)  $\Rightarrow \nexists$  corriente en canal.
  - Variantes: JFET ( $\cup$  PN), CMOS ( $\cup$  MOSFET $_{n/p}$ ), IGBT, TFT.
- Uso. Diodo: convertir CA en CC o rectific. Trans.: amplif. y regulador.
- El silicio y el germanio son los materiales semiconductores +comunes.

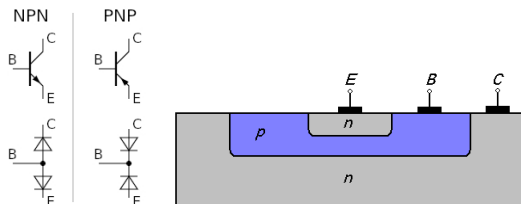
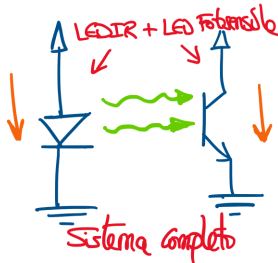


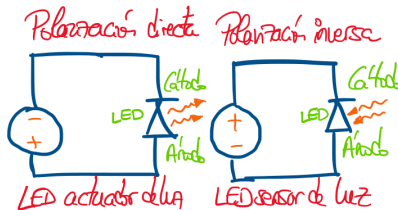
Figura: Imágenes extraídas de Wikimedia Commons

- BJT (*Bipolar Junction Transistor*): 2 uniones PN muy cercanas.
  - Permite, además de controlar  $I$  entre sus terminales,  $\uparrow I$  y  $\downarrow V$ .
- $I$  producida por mvto. de portadores de dos polaridades:  $h^+$  y  $e^-$ .
- Tres terminales: emisor (directa,  $\downarrow R$ ), base y colector (inversa,  $\uparrow R$ ).
  - E  $\uparrow\uparrow$  dopado (=comporta como metal), emite portadores de carga.
  - $I_C = \beta I_E \iff$  base es alimentada por fuente de corriente continua.
    - $\beta$ : Beta del transistor = factor amplificación o ganancia entre  $I_C$  e  $I_B$ .
- Tipos: PNP (E=P, B=N, C=P) y NPN (E=N, B=P, C=N).
  - NPN: el +usado, pues movilidad de  $e^- > h^+$  en los SC  $\implies I \uparrow$ .
- Usos: en electrónica analog., aunque tb en dig. (TTL, BiCMOS).

- Consumo en modo estático muy bajo (veremos en Sección CMOS).
- Gran capacidad de integración dado su  $\downarrow$  tamaño (e.g. CMOS).
  - Tamaño ( $\frac{1}{2}\mu$ )  $\ll$  al transistor bipolar.
  - Ad+, circuito hecho con MOSFETs no necesita  $R_s \Rightarrow \downarrow$  tamaño aún.
- Controlados por  $V \Rightarrow \uparrow\uparrow$  *Impedancia*<sub>entrada</sub>.
  - Dada su  $\uparrow\uparrow R_{entrada}$  y  $\downarrow\downarrow R_{salida} \Rightarrow$  muy usado en amplif. (e.g. audio).
- $\uparrow\uparrow v_{conmutacion}[\eta s] \Rightarrow$  muy usados en apps.  $\uparrow$  frec. y  $\downarrow$  potencia.

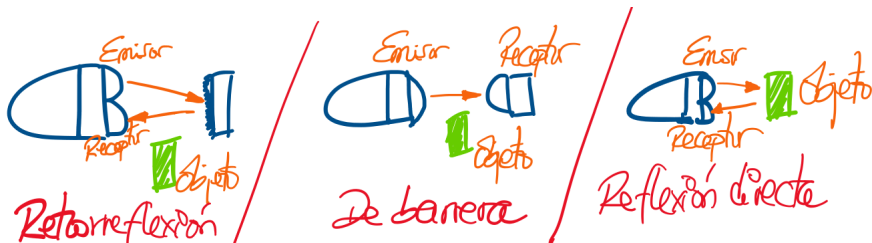


- Este sistema es muy empleado en los encoders y sist. de presencia.
  - Emisor de luz y elem. fotosensible detectan cambio de estado.
- IRLED emite luz en espectro infrarrojo cuando se polariza en directa.
  - Cuando  $V+$  se aplica a ánodo (-) y cátodo (+) a toma de tierra.



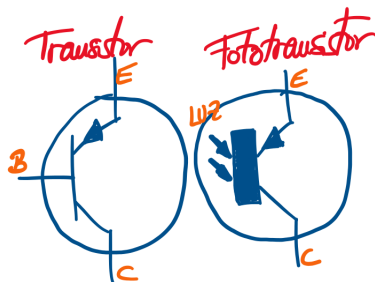
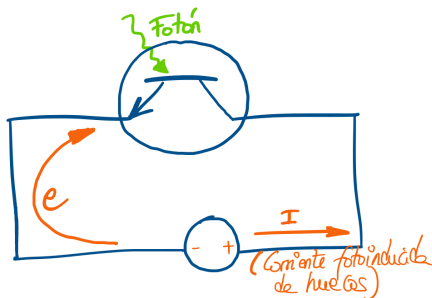


- Aplicaciones diversas: detectar/medir presencia/distancia objeto.
  - Objeto reflectante, ranuras transparentes/opacas en encoder óptico.
  - Y calibrando el sistema: distancia a objeto, intensidad de color.

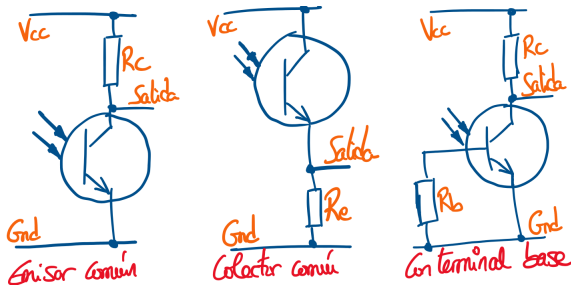


- Configuraciones del IRLED + elemento fotosensible:
  - De retrorreflexión: emisor+receptor en un lado, reflectante en otro.
  - De barrera: emisor y receptor en lados opuestos (encoder, presencia).
  - De reflexión directa: emisor+receptor en un lado, reflexión en objeto.

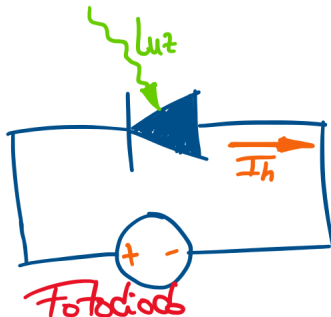
- IRLED es fuente de luz, se necesita elemento fotosensible detección.
  - Elem. fotosensible puede ser: fotodiodo o fototransistor.
- Fototransistor: transductor entre luz y señal eléctrica.
  - Convierte energía contenida en fotón en par electrón-hueco ( $e^-$ ,  $h^+$ ).
  - Hueco: no es partícula, sino la falta de electrón  $\Rightarrow$  carga  $+$ .



- Al conectar fuente de  $V$  en circuito base-emisor-colector...
  - ...se busca que la unión base-emisor se polarice en inversa...
  - ...para que, al percibir luz en la base, se genere  $I_{\text{fotoinducida}}$ .



- Emisor común: generar cambio en señal eléctrica, de alto a bajo.
  - Conectar colector a fuente de  $V$  a través de resistencia de carga.
  - Emisor se conecta a tierra, y  $V_{out}$  se mide en colector.
  - Uso: como amplif., de la  $I$  generada en base, por presencia de luz.
- Colector común: cambia de bajo a alto en presencia de luz en base.
  - Emisor se conecta a tierra a través de resistencia de carga.
  - Colector conectado a fuente de  $V^+$ ;  $V_{out}$  se mide en emisor.
- Con terminal base: cuando se desee  $\uparrow$  o  $\downarrow$  nivel luz permisible...
  - ...que provoque cambio de estado en el fototransistor.



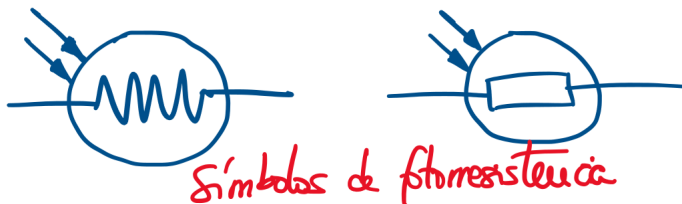
- Dispositivo óptico semiconductor (SC) con propósito=fototransistor.
- En directa ( $P$  a  $V^+$  y  $N$  a  $V^-$ ) es como diodo común (unión  $PN$ ).
  - Corriente de oscuridad:  $I$  que circula por diodo gracias a fuente  $V$ .
  - Cuando diodo se expone a luz, incremento de  $I$  despreciable ( $\approx 0$ ).
- En inversa, corriente de oscuridad  $\approx 0$ . Con luz, incremento  $\uparrow\uparrow$ .
  - $e^-$  generados por efecto fotoeléctrico fluyen hacia  $V^+$  (Fig. dcha.).
  - O, dicho de otro modo, se genera un flujo de huecos  $I_h$  hacia  $V^-$ .

- Tipos:

- PN: fue el 1º.  $\downarrow$  rendimiento  $\implies$  mejorado por nuevos con = ppio.
- PIN: incluye material  $P$ ,  $N$  e  $I$  (SC Intrínseco = puro, sin impurezas).
- De avalancha:  $\uparrow$  ganancia  $\implies$  se usa solo en sitios con  $\downarrow$  irradiación.
- Schottky: basado en diodo Schottky. Ideal para aplicac. en  $\uparrow$  frec.

- Modos de operación de un fotodiodo:

- Fotovoltaico: operar al fotodiodo como una fuente de corriente.
- Fotoconductor (conv. luz-voltaje): se aplica  $V$  en inversa en fotodiodo.



- Elemento resistivo cuya magnitud de su resistencia es  $\propto$  luz.
- Transductor entre luz incidente y resistencia eléctrica a la salida.
- Usos: sistemas de control ilumin. alumbrado, fotografía, pantallas.
  - También como sensor de presencia, forma e, incluso, color.
- Ppio. físico: al incidir luz,  $\uparrow n^o$  pares  $e^- - h^+$  libres...
  - ...para conducción  $\Rightarrow \downarrow$  la resistividad del material.
  - Si conectamos esta resistencia a batería  $\Rightarrow$  varía  $I_{\text{circuito}}$ .
- Ef. fotoeléctrico:  $\downarrow$  iluminación  $\Rightarrow R_{LDR} \uparrow$ , y vcvs.

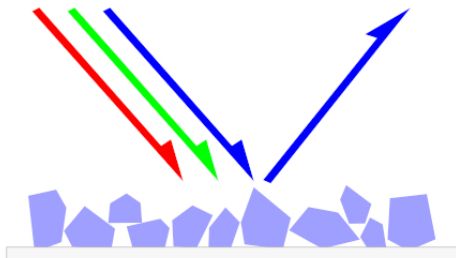
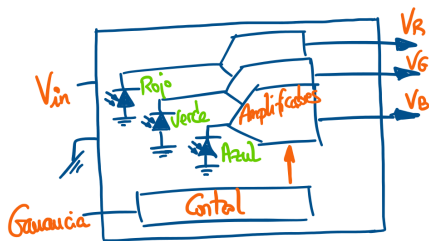


Figura: Imagen extraída de Wikipedia

- El color que percibimos se debe a la long. de onda reflejada en objeto.
  - E.g. percibir azul: objeto absorbe todas long. onda excepto azul.
- Ojo humano puede absorber algunas long. de onda y otras las rechaza.
- Sensores basados en: filtros de color o en irradiación/reflexión luz.
  - Usos: ajuste color impresora, sist. control según color, videojuegos.



- Sensor de color basado en filtros de color:
  - Es lineal; proporciona  $V_{out}$  directa/  $\propto$  irradiación.
  - Tres salidas/canales/fotodiodos, cada uno con filtro de color R,G,B.
    - E.g. con objeto azul,  $V_B$  es mayor que  $V_R$  y  $V_G$ .
  - Normal/ se añade pin de ganancia para calibrarlo según luz ambiente.
- Sensor de color basado en irradiación de fuente de color fija:
  - Incluye luz propia, que se hace incidir sobre objeto a detectar.
    - Además de un elemento fotosensible para medir  $I$  de luz reflejada...
    - ...lo que supone una gran dvtaja.; ha de ser calibrado para cada color.
  - Tipos: luces (R,G,B) compactadas en LED RGB, o tres ledes separados.
  - Ppio.: al incidir luz azul sobre objeto azul, este la refleja intensa/.



- Para obtener información del entorno mediante captura de imágenes.
  - Imágenes pueden ser en color, escala de grises, monocromático, etc.
  - Imágenes compuestas por píxeles; cada uno obtenido por celda unitaria.
  - Celdas se basan en efecto fotoeléctrico: convertir luz en corriente.
- Celdas compuestas por sensores de estado sólido cuya tecnología es:
  - CCD: + extendido hasta aparecer CMOS.
  - SuperCCD: optimización del CCD para mejorar sensibilidad.
  - CMOS: + extendido actual/ por facilidad y < coste de fabricación.
  - Foveon X3: CMOS marca Foveon, no realiza interpolación de colores.
- Uso extendido: teléfonos, coches, cámaras, seguridad, robótica con IA.

- CMOS = Complementary Metal-Oxide-Semiconductor.
- Usado por mayoría de circuitos integrados ( $\mu Proc$ , memorias, etc.).
- Formado por la unión de transistores  $pMOSFET$  y  $nMOSFET$ .
  - $MOSFET = Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect-Transistor$ .
  - Configurados para que, en reposo,  $E_{consumida} = I_{parasitas}$  (solo).
    - (p-n)MOS con  $p$  en *modo enriquecimiento*: si  $p = 1 \Rightarrow n = 0$ .
    - nMOS: D conectada a tierra ( $V_{SS} = 0$ )  $\Rightarrow \nexists I_S \Rightarrow V_{DD}^{salida} = 0$ .
    - pMOS, por contra, sí está en estado de conducción  $\Rightarrow V_{DD}^{salida} = 1$ .
- Corolario: C (de CMOS) se debe al modo de trabajo Complementario.
  - Cuando un transistor está encendido, el otro está apagado (y vcvsa.).

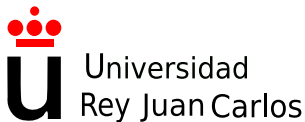
- Historia: < 60s, lógica se solía implementar con transist. bipolares.
  - NPN (E=N,B=P,C=N) +usado; movilidad  $e^- > h^+$  en SC  $\Rightarrow I \uparrow$ .
    - Entonces,  $V_{CC} = V^+$  (C=Colector) y  $V_{EE} = V^+$  (E=Emisor).
- En > 60s se empezó a usar el tr. unipolar (FET), y los voltajes son:
  - $V_{DD}$ : alimentación positiva (**D**rain  $\cong$  agotar  $\cong$  va de  $+$   $\rightarrow$   $-$ ).
  - $V_{SS}$ : alimentación negativa (**S**ource  $\cong$  fuente,nacimiento  $\cong - \rightarrow +$ ).
- Con CMOS no tiene sentido. Tiene canales N y P complement. (T.4).
  - Formado por unión de  $p$ MOSFET y  $n$ MOSFET ¡en igual  $n.^o$ !
  - Por tanto, si  $n.^o P = n.^o N \Rightarrow V_{DD}$  no es más + que  $V_{SS}$ .
  - Pero, por razones históricas,  $V_{DD}$  y  $V_{SS}$  se siguen usando así.
- Corolario:  $V_{CC}$  y  $V_{EE}$  para tr. bipolares;  $V_{DD}$  y  $V_{SS}$  para unipolares.
  - En la práctica,  $V_{CC} \cong V_{DD}$  y  $V_{EE} \cong V_{SS}$ .

- *Letter Symbols for Semiconductor Devices* (IEEE Std. 255-1963)
- Símbolos en mayúscula: máximo (pico), media (CC) (e.g.  $I$ ,  $V$ ,  $P$ ).
- Símbolos en minúscula: para valores instantáneos (e.g.  $i$ ,  $v$ ,  $p$ ).
- Subíndice mayúsc.: valor de CC y valor inst. total (e.g.  $i_C$ ,  $p_C$ ).
- Subíndice minúsc.: valores de CA (e.g.  $i_c$ ,  $I_c$ ,  $v_{eb}$ ,  $P_c$ ).
- Se duplica subínd. alimentación tensión para evitar ambigüedad.
  - Ejemplos, los que hemos visto:  $V_{CC}$ ,  $V_{DD}$ ,  $V_{EE}$ ,  $V_{SS}$ .
- Tres subínd. alimentación tensión: indica el terminal de referencia.
  - $V_{CCB}$ : voltaje en Colector, con la Base como referencia.
    - $V_{CC}$ : voltaje en Colector, con toma de tierra como referencia.
  - ¿Y si, p. ej., dispositivo tiene dos Bases? No podríamos usar  $V_{BB}$ .
    - Se especificaría V de Base 1 a Base 2 así:  $V_{B1-B2}$ .
  - Más interesante, ¿cómo poner V de Base de Disp. 1 a Base de Disp. 2?
    - En este caso, la sintaxis no es quizás tan obvia:  $V_{1B-2B}$ .

## 4. Sensores de color, luz y visión

Julio Vega

[julio.vega@urjc.es](mailto:julio.vega@urjc.es)



Sensores y actuadores