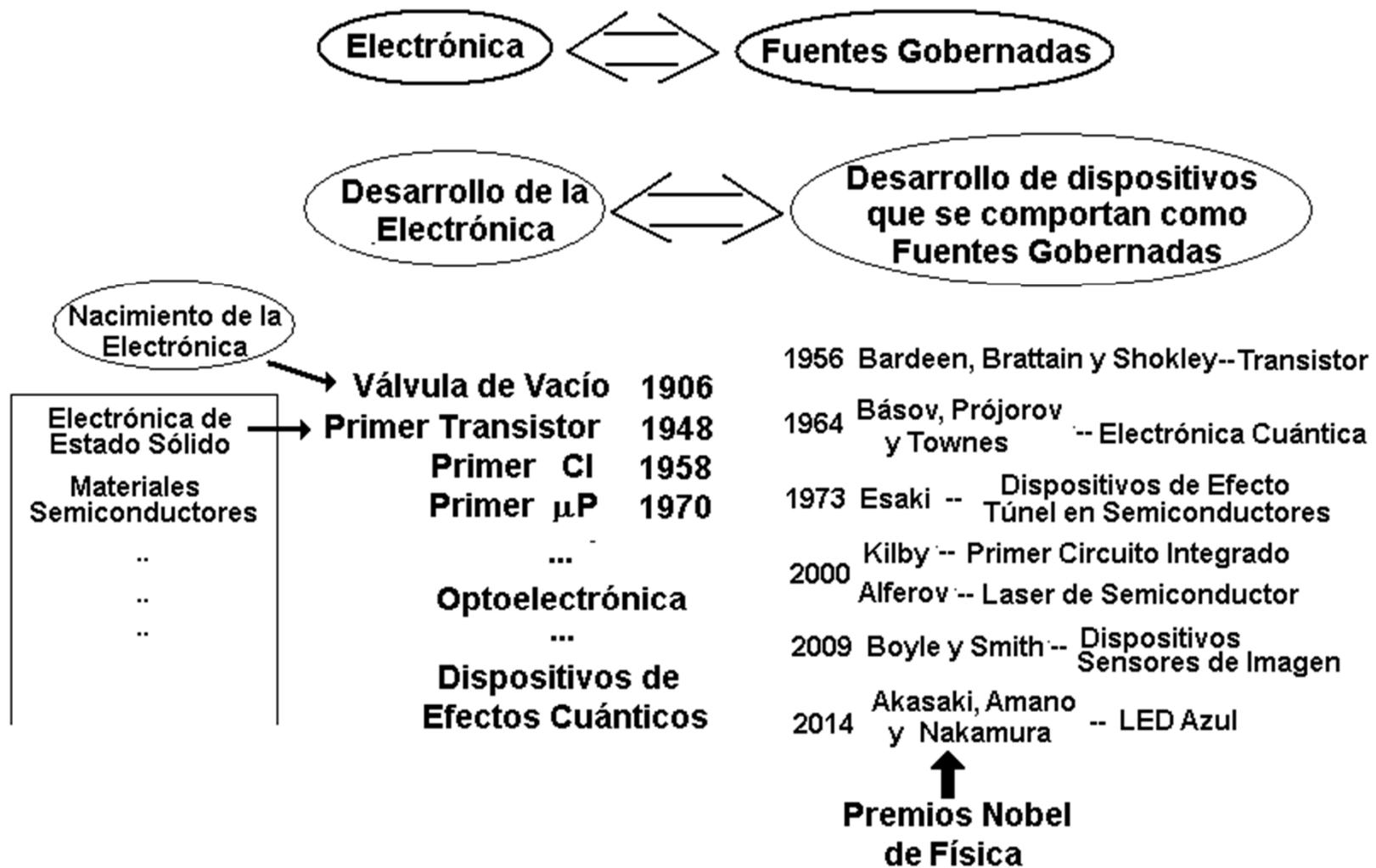


TEMA 3: AMPLIFICADORES OPERACIONALES

- a) El amplificador operacional ideal
- b) Análisis simplificado de circuitos con AO
- c) Aplicaciones lineales del AO
- d) Integradores y diferenciadores
- e) Filtros activos: análisis de la función de transferencia

TEMA 3: AMPLIFICADORES OPERACIONALES...

Introducción a los dispositivos electrónicos

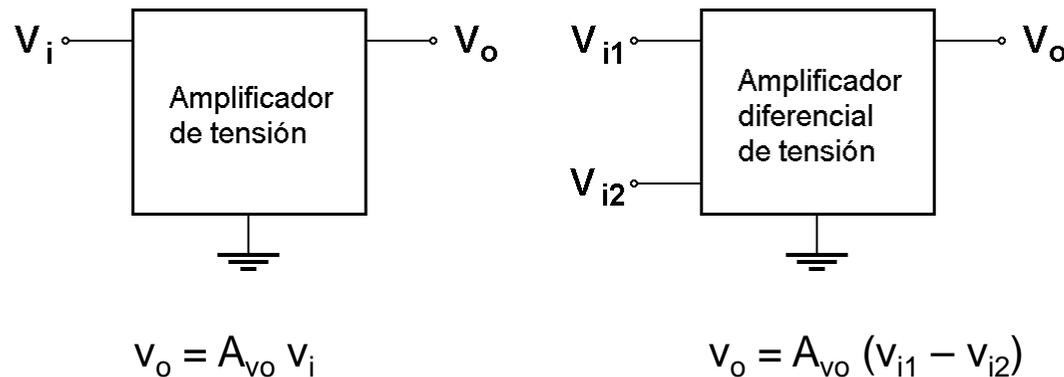


TEMA 3: AMPLIFICADORES OPERACIONALES

Amplificador: circuito o dispositivo que proporciona a la salida del mismo una señal proporcional a la de su entrada y de mayor amplitud.

Amplificador diferencial: circuito o dispositivo que proporciona a la salida del mismo una señal proporcional a la diferencia de señales entre sus entradas.

Esquemáticamente, si las señales a amplificar son tensiones,



– Es frecuente no mostrar de forma explícita el punto de referencia de las tensiones del amplificador, cuando todas ellas están referidas al mismo punto.

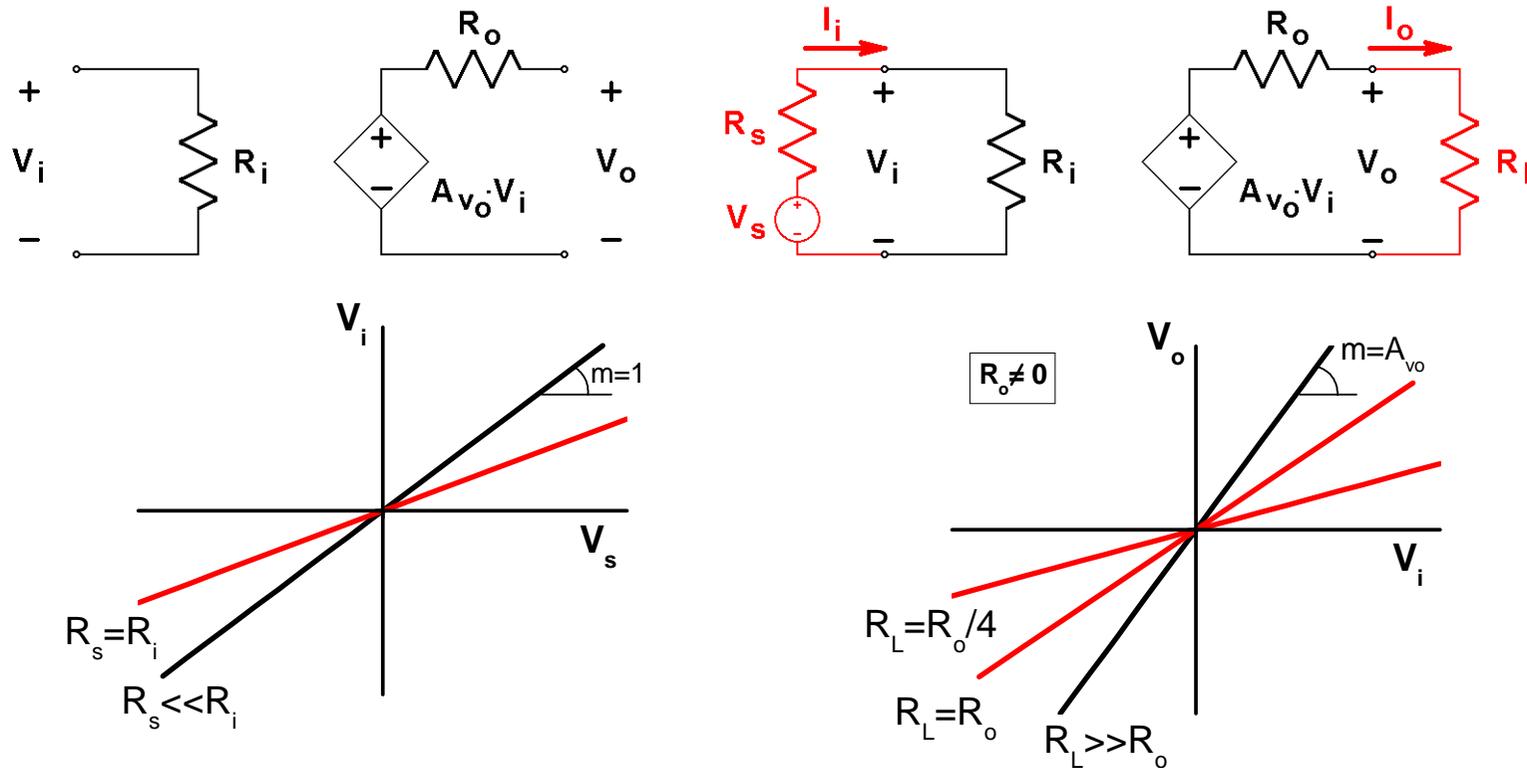
– En general, los circuitos o dispositivos amplificadores tienen numerosas aplicaciones prácticas, siendo necesario en algunos casos elementos transductores que transformen la señal débil a amplificar en señal eléctrica.

Ejemplos: electrocardiógrafos, sistemas de seguimiento sísmico, reproductores de audio,...

TEMA 3: AMPLIFICADORES OPERACIONALES

- **Modelo ideal de un amplificador de tensión:**

- R_i, R_o : resistencias de entrada y salida del amplificador
- A_{vo} : ganancia de tensión en circuito abierto; supondremos A_{vo} real, con $A_{vo} > 0$
- Un buen amplificador de tensión debe tener $R_i \rightarrow \infty$ y $R_o = 0$ (así como ganancia adecuada) para tener un óptimo aprovechamiento de las señales de entrada y salida

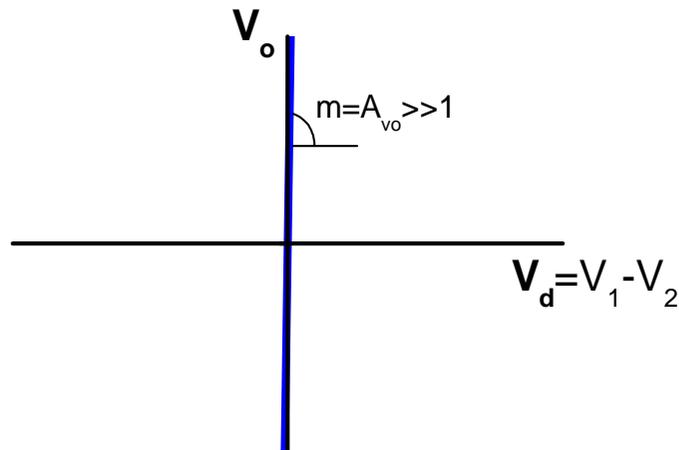
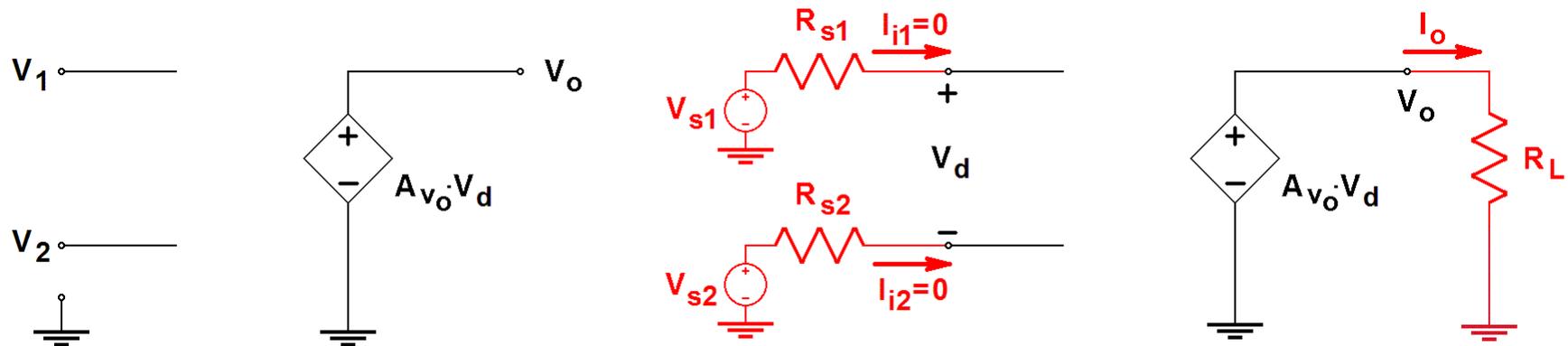


TEMA 3: AMPLIFICADORES OPERACIONALES

El amplificador operacional ideal es un amplificador diferencial de tensión tal que:

$$R_i \rightarrow \infty, R_o = 0 \text{ y } A_{v_o} \gg \gg 1$$

gráficamente,



– Si $A_{v_o} \equiv A_o = \text{ganancia en lazo abierto}$,
 $\Rightarrow v_o = A_o v_d = A_o (v_1 - v_2) = A_o (v_{s1} - v_{s2})$,
 pues $I_{i1} = 0, I_{i2} = 0$

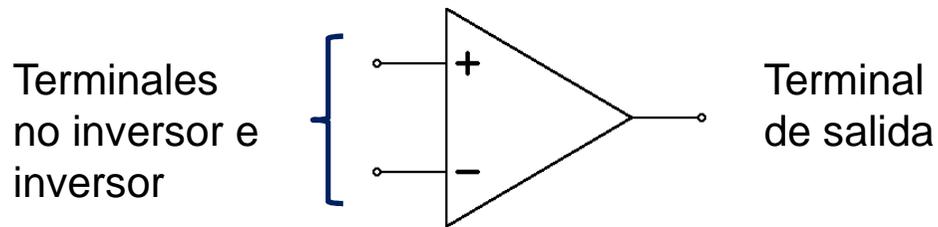
– $A_o \gg \gg 1$ y v_o finita $\Rightarrow v_d \approx 0$ (ó $v_1 \approx v_2$)
 (Principio de “cortocircuito virtual”)

– Observación: $A_o \gg \gg 1$ puede no ser deseable

(Curva característica de transferencia)

TEMA 3: AMPLIFICADORES OPERACIONALES

- **Símbolo y terminales del A.O. ideal**



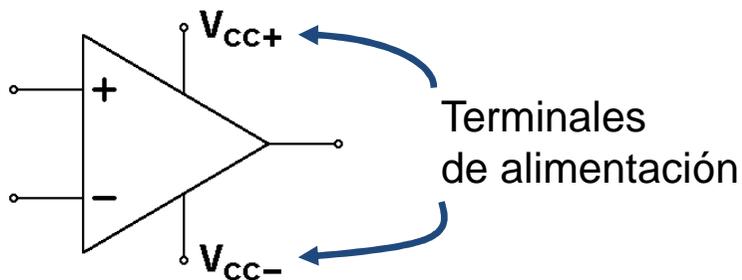
$$v_o = A_o (v_+ - v_-)$$

- Si $v_- = 0$, $sg(v_o) = sg(v_+)$
- Si $v_+ = 0$, $sg(v_o) = -sg(v_-)$

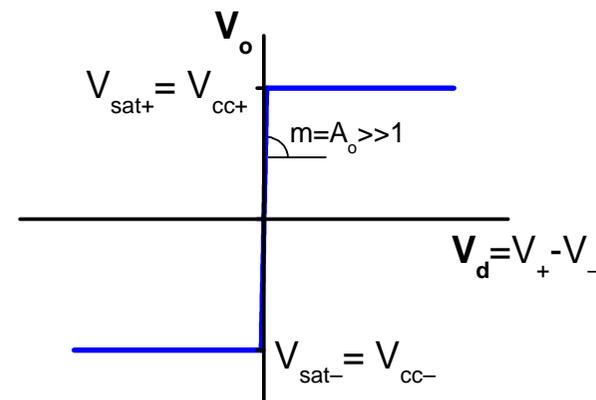
– Es habitual omitir el terminal de referencia de las tensiones cuando es el mismo para las entradas y para la salida.

- **El A.O. semi-ideal**

Reproduce más fielmente el comportamiento de un A.O. real, al tener en cuenta que la tensión de salida siempre está limitada. Mantiene las propiedades $R_i \rightarrow \infty$ y $R_o = 0$.



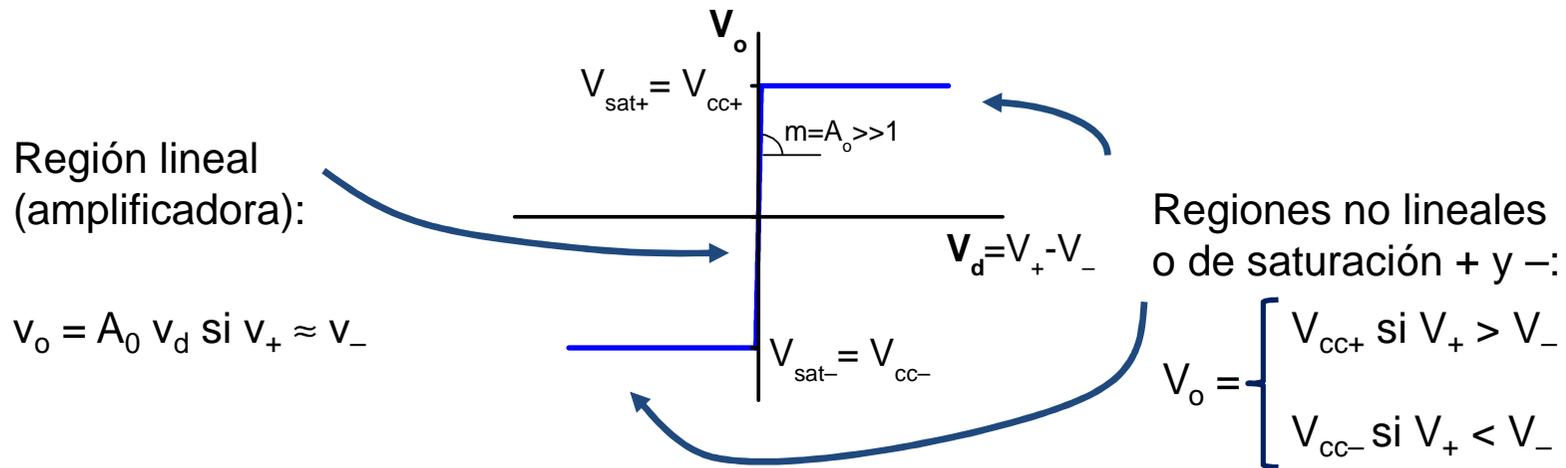
Símbolo



Curva característica de transferencia

TEMA 3: AMPLIFICADORES OPERACIONALES

- Regiones de funcionamiento del A.O. semi-ideal



Observación: La región de trabajo de un A.O. va a depender del circuito en el que se encuentra:

- Si el circuito “permite” al A.O. hacer próximos los valores de tensión de sus entradas, el A.O. trabajará en la región lineal
- Si no lo permite, trabajará en una de las regiones de saturación

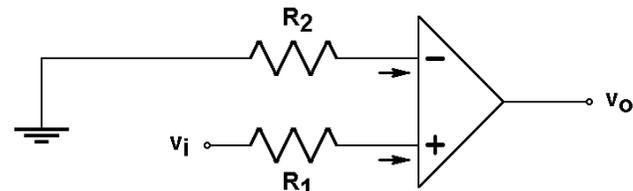
- ♣ Ejemplo 1:

$$i_+ = 0 \Rightarrow v_+ = v_i$$

$$i_- = 0 \Rightarrow v_- = 0$$

$$v_o = V_{sat+} \text{ si } v_i > 0, V_{sat-} \text{ si } v_i < 0 \text{ (y } v_o = 0 \text{ si } v_i = 0)$$

Circuito que compara la tensión v_i con la tensión $V_{ref} = 0$



TEMA 3: AMPLIFICADORES OPERACIONALES

♣ Ejemplo 2:

$$i_+ = 0 \Rightarrow v_+ = v_i$$

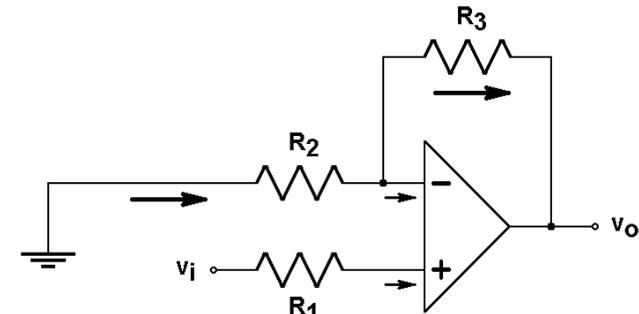
$$i_- = 0 \Rightarrow i_{R2} = i_{R3}; \quad \frac{-v_-}{R_2} = \frac{v_- - v_o}{R_3}$$

v_- no está prefijada \Rightarrow el A.O. tiene libertad para establecer $v_+ \approx v_-$ adecuando las corrientes i_{R2} e i_{R3}

Para conocer v_o , podríamos utilizar además $v_o = A_o (v_+ - v_-) = A_o (v_i - v_-)$

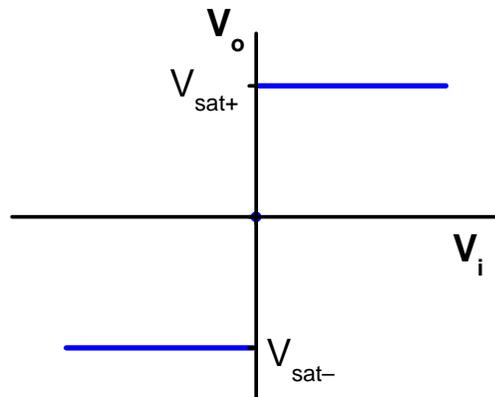
Como habitualmente se desconoce el valor de A_o , se suele aproximar $v_+ = v_-$:

$$\frac{-v_i}{R_2} = \frac{v_i - v_o}{R_3} \Rightarrow v_o = \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right) v_i \quad \text{Amplificador de tensión de ganancia: } A_v = \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right)$$

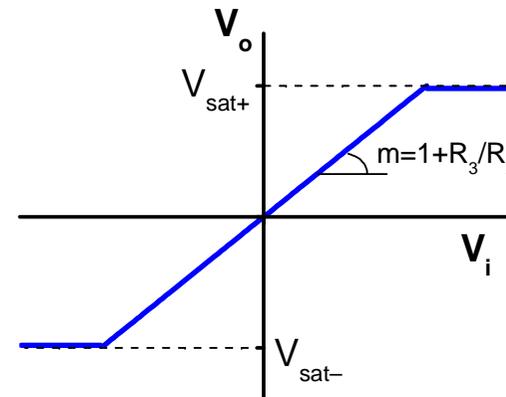


Curvas características de transferencia de estos circuitos:

♣ Ejemplo 1: circuito comparador



♣ Ejemplo 2: circuito amplificador no inversor



TEMA 3: AMPLIFICADORES OPERACIONALES

- **Concepto de realimentación**

Los ejemplos anteriores corresponden a dos configuraciones de circuitos con A.O. que se conocen como:

- En lazo abierto: no hay conexiones entre las entradas del A.O. y su salida
- Con realimentación negativa: hay conexión entre la entrada inversora del A.O. y su salida

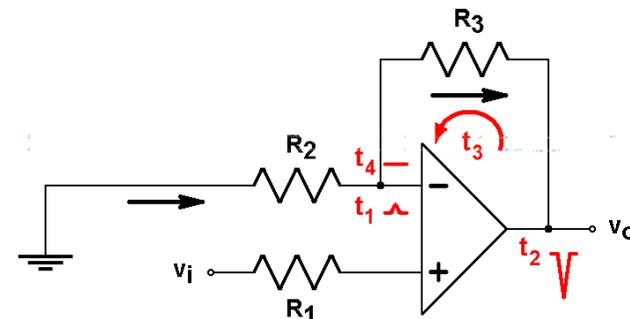
Además de permitir al A.O. equilibrar las tensiones de sus entradas, la realimentación negativa realiza otra función: eliminar variaciones entre las tensiones de entrada debidas al ruido eléctrico que pueda existir en un circuito real:

$t_0:$ $v_o(t_0) = \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right) v_i$

$t_1:$ aparición de ruido eléctrico en v_-

$t_2:$ $v_o(t_2) = v_o(t_0) - A_0 \cdot v_{\text{ruido}}$

t_3 y $t_4:$ propagación de “ $-A_0 \cdot v_{\text{ruido}}$ ”
y extinción del origen del ruido, $v_- = v_+$



Existe un tercer tipo de circuitos con A.O., en los que hay conexión entre la entrada no inversora y su salida: circuitos con realimentación positiva. Es fácil comprobar que en ellos, las variaciones entre las tensiones de entrada se refuerzan a través del lazo de realimentación, provocando el paso del A.O. de la región lineal a una de las regiones de saturación.

TEMA 3: AMPLIFICADORES OPERACIONALES

⊗ En resumen:

- Un A.O. es un amplificador diferencial de resistencia de entrada infinita, resistencia de salida nula y ganancia de tensión muy elevada.
- Debido a su elevada resistencia de entrada, las corrientes en sus terminales de entrada son nulas: $i_+ = 0$, $i_- = 0$ (¡pero puede suministrar corriente a la salida!)
- Presenta dos regiones de funcionamiento: lineal y de saturación
- El funcionamiento en la región lineal sólo es posible en circuitos con realimentación negativa. En esta región se verifica que $v_o = A_0 v_d$ y que $v_+ \approx v_-$
- Habitualmente no se conoce A_0 , por lo que se hace uso de la aproximación $v_+ = v_-$ para poder conocer la tensión de salida del circuito cuando el A.O. trabaja en la región lineal
- El funcionamiento en la región de saturación tiene lugar en configuración de lazo abierto o con realimentación positiva. También con realimentación negativa, cuando se “intenta” obtener del A.O. valores de tensión más allá de los de alimentación
- Para conocer la tensión de la salida en circuitos en lazo abierto (V_{sat+} ó V_{sat-}), basta con evaluar el signo de la tensión $v_d = v_+ - v_-$

(Nota: Para conocer la tensión de la salida en circuitos con realimentación positiva (V_{sat+} ó V_{sat-}), puede no ser suficiente evaluar el signo de la diferencia $v_+ - v_-$. El estudio de esta configuración no se abordará este curso)

TEMA 3: AMPLIFICADORES OPERACIONALES

- **Otras aplicaciones lineales del A.O.**

Además de permitir amplificar señales de tensión con la ganancia deseada, hay otras aplicaciones interesantes de los circuitos con A.O. realimentados negativamente. Estas son algunas de ellas:

– Seguidor de tensión (o buffer de corriente):

$$v_+ = v_i; v_- = v_o$$

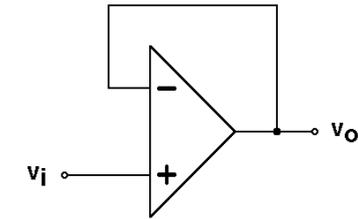
$$v_o = A_0(v_+ - v_-) = A_0(v_i - v_o) \Rightarrow v_o = \frac{A_0 v_i}{A_0 + 1}, \quad \text{o bien: } \boxed{A_v = \frac{A_0}{A_0 + 1}}$$

Si no se conoce A_0 , se puede tomar $v_+ = v_-$:

$$v_o = v_i \Rightarrow \boxed{A_v = 1}$$

En la expresión anterior: $\lim_{A_0 \rightarrow \infty} A_v \rightarrow 1$

Propiedad: $\boxed{Z_i \rightarrow \infty}$



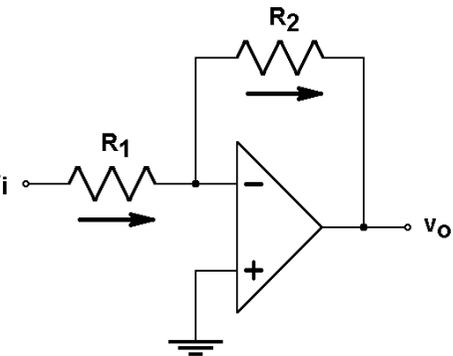
– Amplificador inversor:

$$i_{R1} = i_{R2}; \frac{v_i - v_-}{R_1} = \frac{v_- - v_o}{R_2}$$

$$v_+ = 0; v_- = v_+ \Rightarrow v_o = -\frac{R_2}{R_1} v_i; \quad \boxed{A_v = -\frac{R_2}{R_1}}$$

Si se conoce A_0 puede demostrarse que

$$\boxed{A_v = -\frac{A_0 R_2}{R_1(1 + A_0) + R_2}}$$



(solución exacta)

Propiedad: $\boxed{Z_i = R_1}$

TEMA 3: AMPLIFICADORES OPERACIONALES

- **Otras aplicaciones lineales del A.O.**

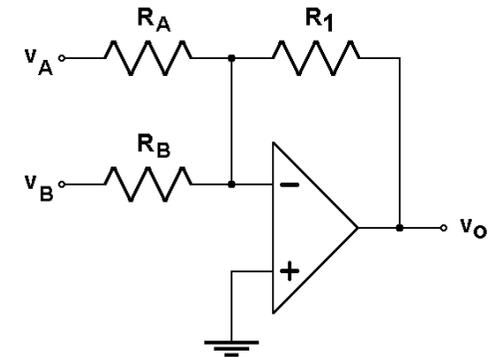
En los siguientes circuitos, se hará uso del principio de cortocircuito virtual, para mayor sencillez:

– Sumador:

$$i_{R_A} + i_{R_B} = i_{R_1}; \frac{v_A - v_-}{R_A} + \frac{v_B - v_-}{R_B} = \frac{v_- - v_o}{R_1};$$

$$v_- \left(\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_1} \right) = \frac{v_A}{R_A} + \frac{v_B}{R_B} + \frac{v_o}{R_1}$$

$$v_+ = v_- = 0 \Rightarrow v_o = -R_1 \left(\frac{v_A}{R_A} + \frac{v_B}{R_B} \right)$$

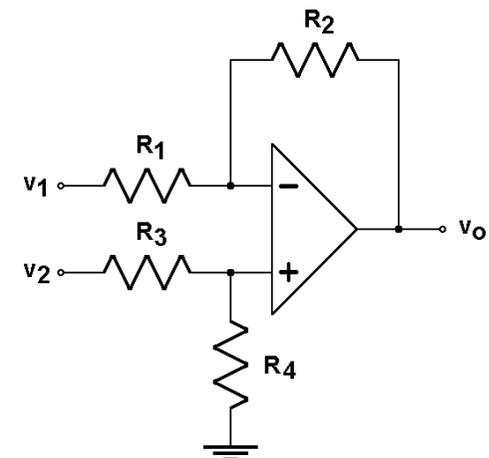


– Restador:

$$i_{R_1} = i_{R_2}; \frac{v_1 - v_-}{R_1} = \frac{v_- - v_o}{R_2}; v_- \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{v_1}{R_1} + \frac{v_o}{R_2}$$

$$i_{R_3} = i_{R_4}; \frac{v_2 - v_+}{R_3} = \frac{v_+}{R_4}; v_+ \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right) = \frac{v_2}{R_3}$$

$$v_+ = v_- \Rightarrow v_o = -\frac{R_2}{R_1} v_1 + \frac{R_4}{R_1} \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} v_2$$



TEMA 3: AMPLIFICADORES OPERACIONALES

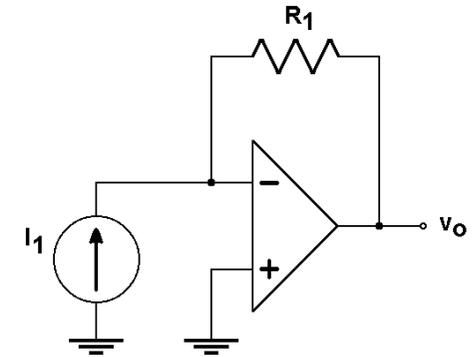
- **Otras aplicaciones lineales del A.O.**

- Convertor I-V:

$$v_- = v_+ = 0$$

$$v_o = v_- - I_1 R_1 \Rightarrow \boxed{v_o = -R_1 \cdot I_1} \quad \text{Además, } \boxed{Z_i = 0}$$

Notar que R_1 , además de una resistencia, es el factor de conversión corriente-tensión, y es habitual expresar su valor en V/mA.



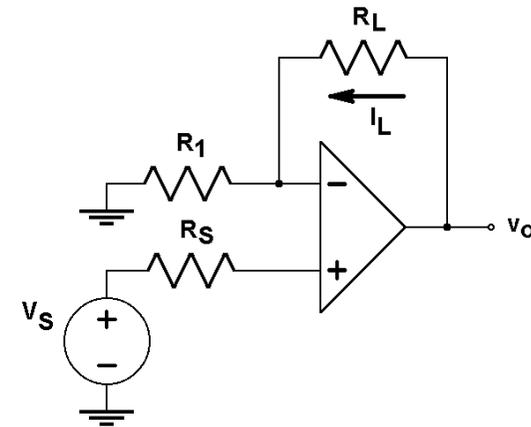
- Convertor V-I:

$$i_+ = 0 \Rightarrow v_+ = V_S$$

$$i_- = 0 \Rightarrow I_L = \frac{v_-}{R_1}$$

$$v_+ = v_- \Rightarrow \boxed{I_L = \frac{V_S}{R_1}}$$

Observación: la corriente I_L será la misma, con independencia de cuál sea el valor asignado a la resistencia R_L



¿Quién suministra esa corriente?: la salida del A.O. Recordar que el A.O. puede suministrar (o sumir) corriente, con independencia de que en sus entradas sea nula.

TEMA 3: AMPLIFICADORES OPERACIONALES

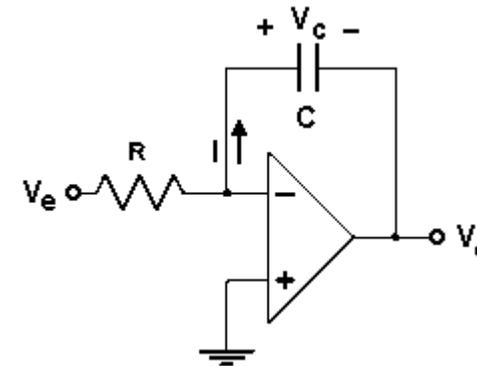
- **Otras aplicaciones lineales del A.O.**

- Integrador:

$$v_- = v_+ = 0$$

$$v_o = v_- - V_C = -\frac{Q_C}{C} = -\frac{\int Idt}{C} = -\frac{\int V_e / R dt}{C}$$

$$v_o = -\frac{1}{RC} \int V_e \cdot dt$$

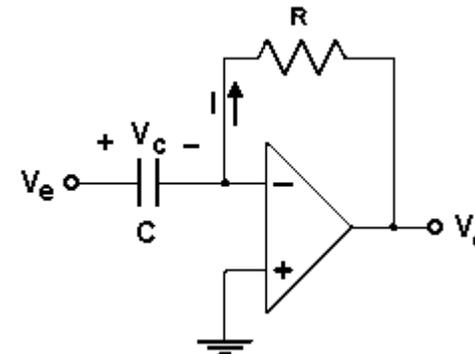


- Diferenciador:

$$v_- = v_+ = 0 \quad V_C = V_e - v_-$$

$$v_o = v_- - IR = -R \frac{dQ_C}{dt} = -R \frac{d(CV_C)}{dt} = -RC \frac{dV_C}{dt}$$

$$v_o = -RC \frac{dV_e}{dt}$$



TEMA 3: AMPLIFICADORES OPERACIONALES

- **Otras aplicaciones lineales del A.O.**

- Filtro activo:

Cuando las redes del circuito con A.O. contienen elementos reactivos, y la señal de entrada es alterna, la tensión de salida dependerá del valor de su frecuencia pudiéndose comportar como un filtro con un elemento activo. En el circuito de la figura:

$$v_+ = 0; v_- = v_+ = 0$$

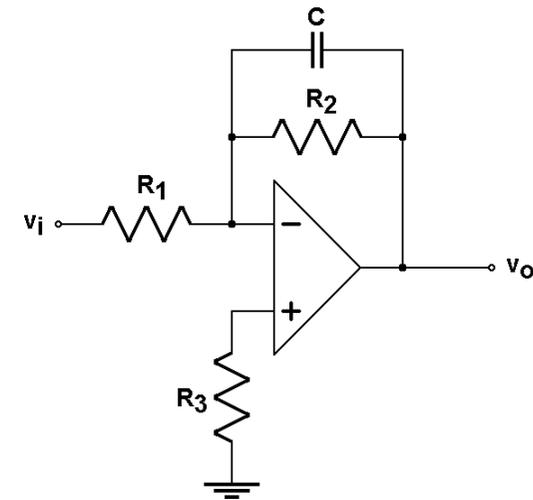
$$\frac{v_i}{R_1} = \frac{-v_o}{Z_P}, \quad \text{siendo } Z_P \equiv R_2 \parallel Z_C$$

$$A_V(j\omega) = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{Z_P}{R_1} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + j\omega R_2 C}$$

$$|A_V|(f) = \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi R_2 C f)^2}}; \quad \varphi(f) = \pi - \arctg(2\pi R_2 C f)$$

Este resultado indica que el circuito es un filtro paso-bajo, con una ganancia máxima de valor R_2/R_1 . Escogiendo $R_2 > R_1$, el circuito tendrá ganancia mayor que 1, a diferencia del filtro paso-bajo pasivo que se estudió en el tema anterior, en el que la ganancia máxima era 1

También se pueden construir filtros activos paso-alto, paso-banda y rechaza-banda

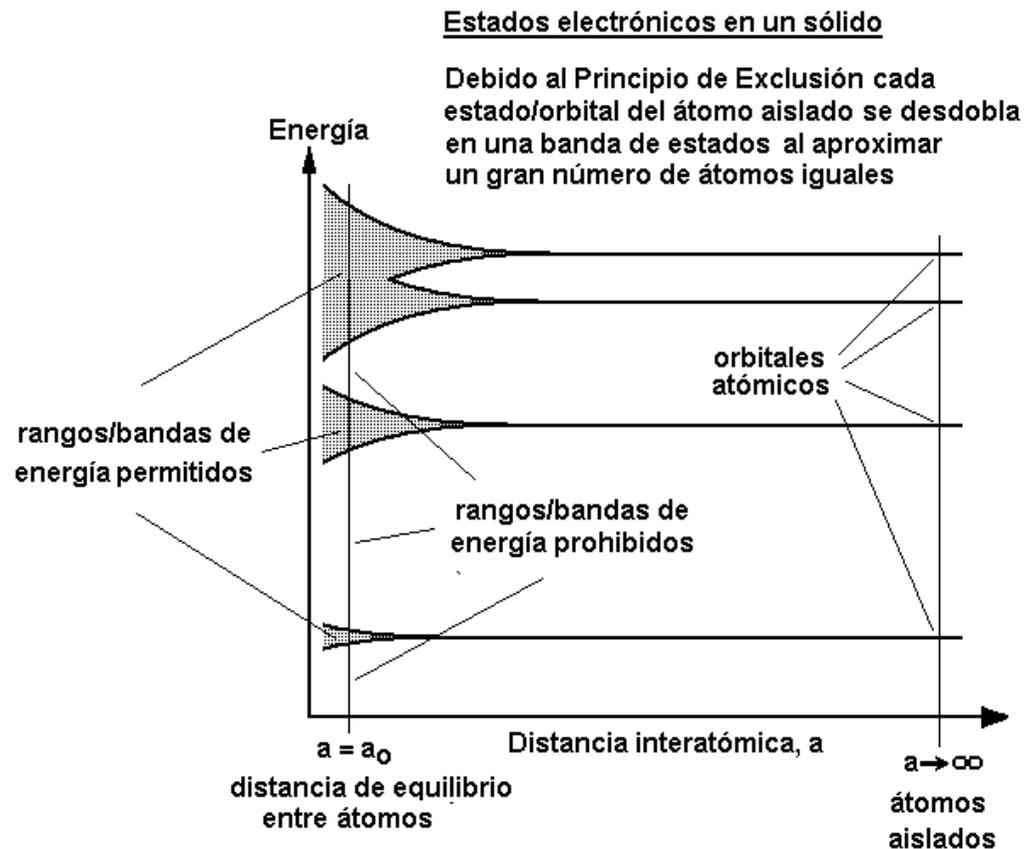


TEMA 4: Diodos

- a) Curva característica del diodo de unión p-n
- b) Modelos lineales
- c) Circuitos recortadores
- d) Otros diodos: Zener, LED y fotodiodo

TEMA 4: DIODOS

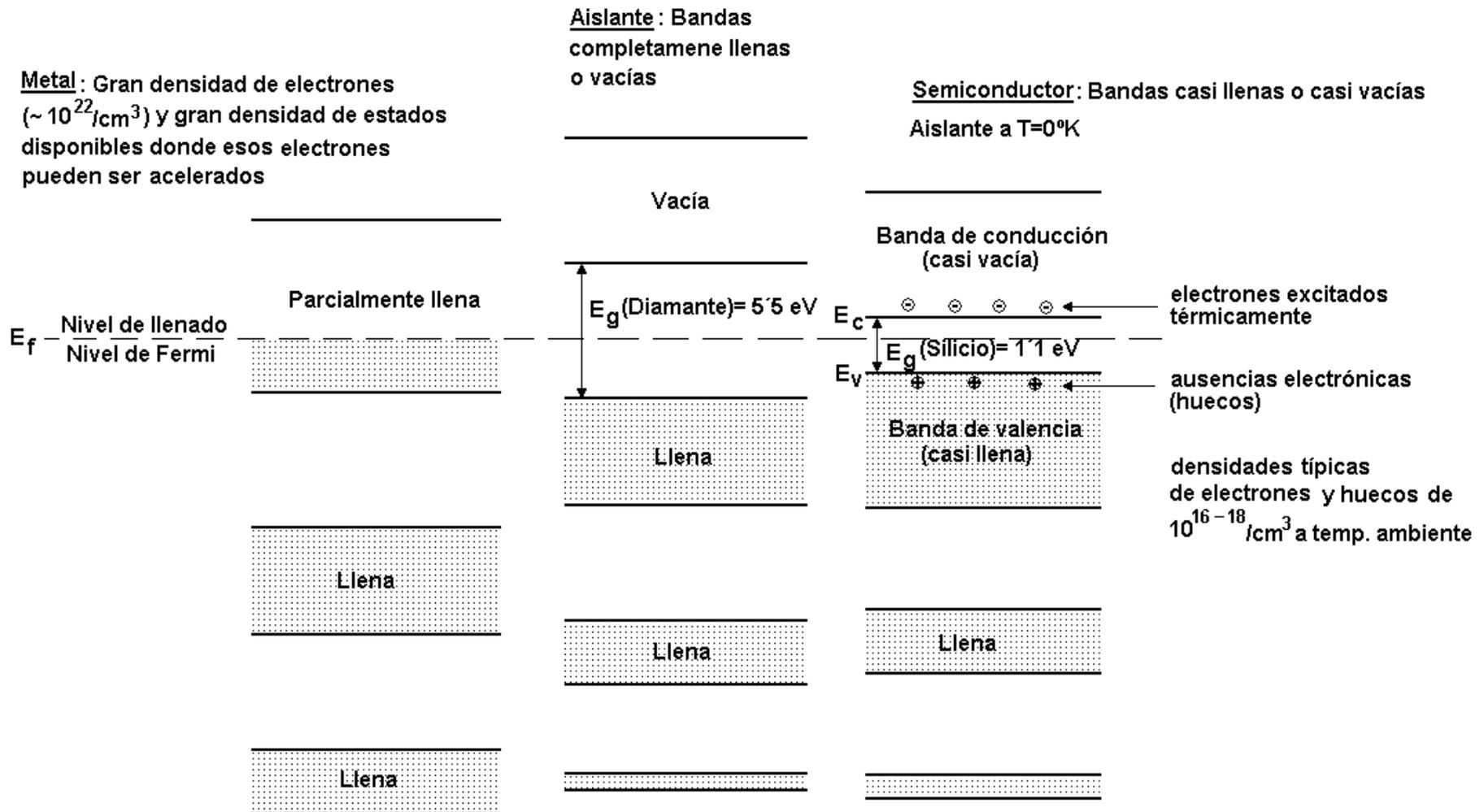
- **Bandas de energía en sólidos**



- Un orbital ocupado da lugar a una banda llena de electrones
- Un orbital desocupado da lugar a una banda vacía de electrones
- Un orbital parcialmente ocupado (p. ej. en átomos de la 1ª columna, dos estados con la misma energía y diferente spin, ocupado sólo uno de ellos) da lugar a una banda parcialmente llena
- Una banda completamente llena de electrones no contribuye a la conducción de corriente: hay tantos electrones con velocidad en una dirección como en la opuesta, y no hay más estados a los que los electrones puedan ser acelerados

TEMA 4: DIODOS

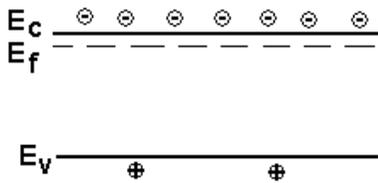
- Metales, aislantes y semiconductores



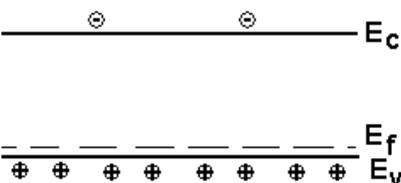
TEMA 4: DIODOS

- La unión p-n

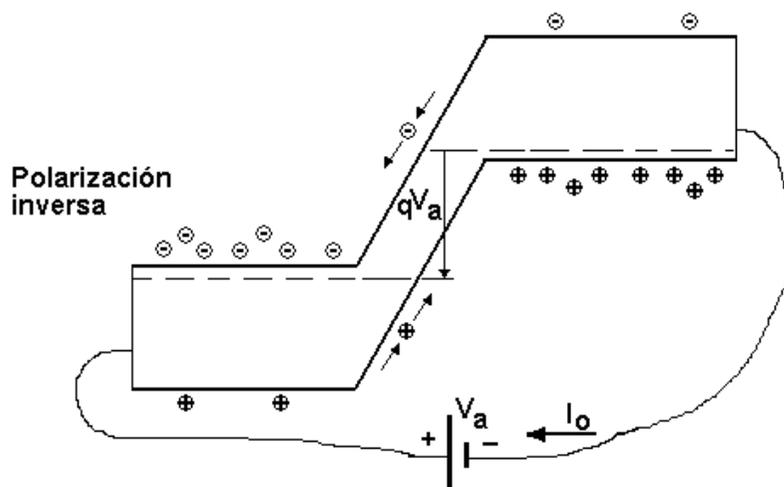
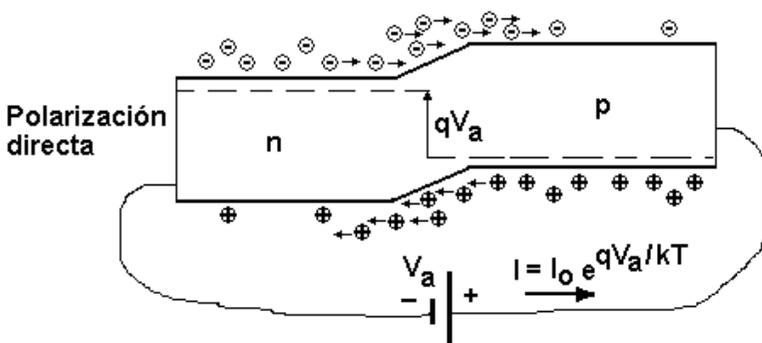
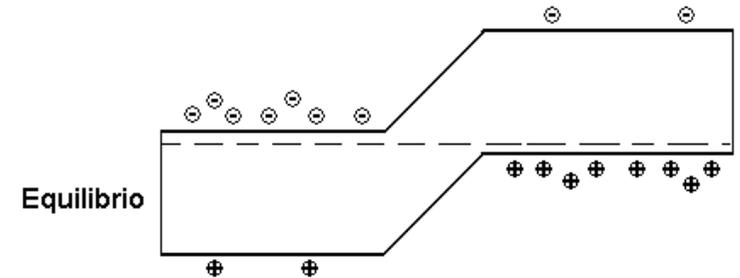
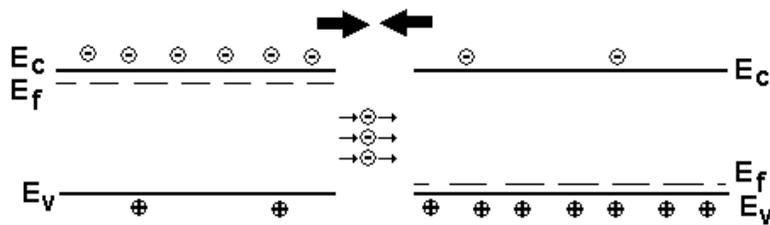
Semiconductor tipo-n ($n \gg p$)
 n : densidad de electrones en BC



Semiconductor tipo-p ($p \gg n$)
 p : densidad de huecos en BV



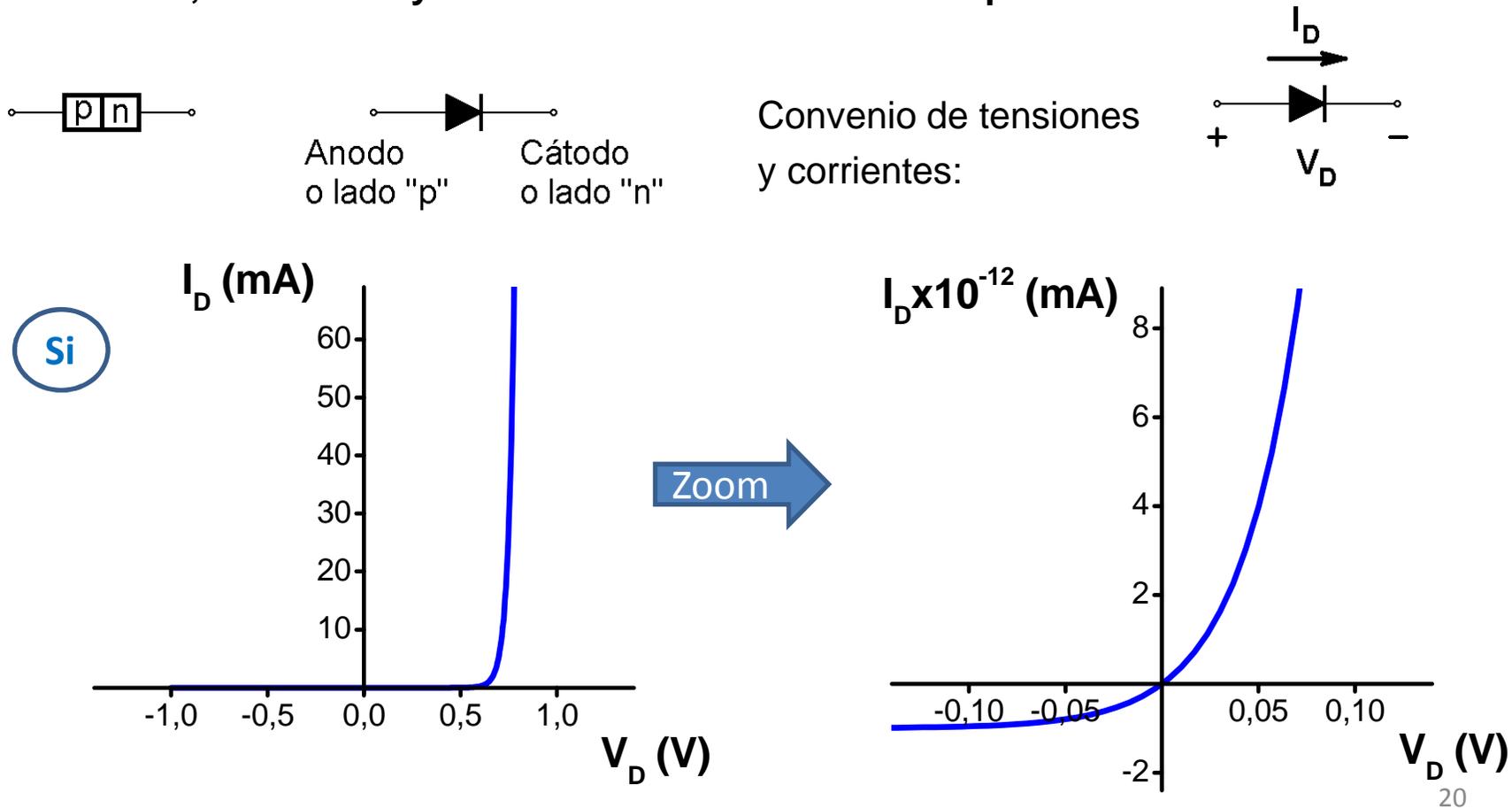
Formación de la unión p-n



TEMA 4: DIODOS

El **diodo de unión o diodo p-n** es un dispositivo semiconductor de dos terminales, de comportamiento no lineal, que conduce en un único sentido. Debido a esta propiedad se dice que el diodo tiene carácter "rectificador". Se construye a partir de la unión de dos tipos de semiconductores de diferente comportamiento eléctrico, llamados "p" ó "n".

- **Símbolo, terminales y curva característica del diodo p-n**



TEMA 4: DIODOS

La característica I-V del diodo de Si muestra que éste sólo conduce corrientes apreciables (~mA) cuando la tensión entre sus terminales es $V_D \approx 0,5-0,7V$ (**conducción**), comportándose como un circuito abierto para tensiones inferiores (**corte**).

La ecuación matemática que mejor describe la característica I-V del diodo es una expresión exponencial (ecuación de Shockley):

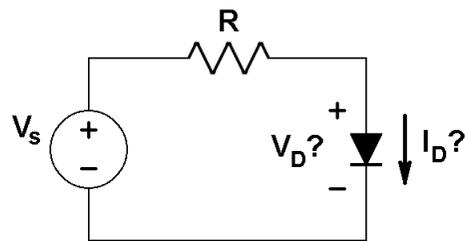
$$I_D(V_D) = I_S \left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right)$$

I_S : Corriente inversa de saturación ($I_S \approx 10^{-15} A$ en Si)

n : Coeficiente de idealidad ($1 < n < 2$)

$V_T \equiv kT/q_e$: tensión equivalente a temperatura

- **Polarización del diodo: valores de I_D y V_D en un circuito con fuentes de c.c.**



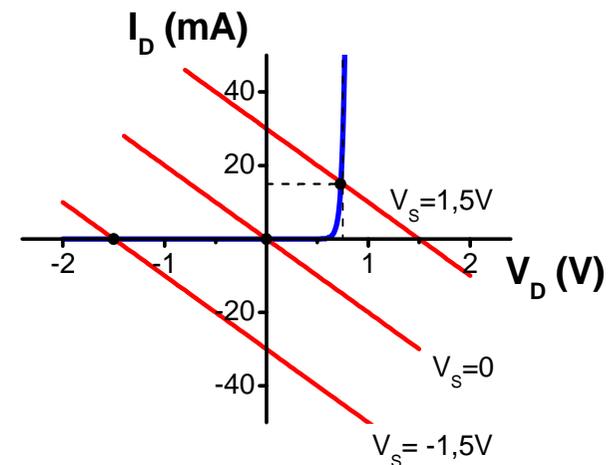
Polarización directa: $V_s > 0$

Polarización inversa: $V_s < 0$

LKM: $-V_s + I_D R + V_D = 0$

“Recta de carga”:

$$I_D = \frac{V_s}{R} - \frac{1}{R} V_D$$

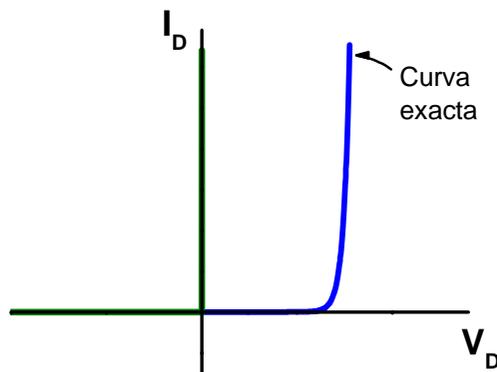


TEMA 4: DIODOS

- El diodo sólo puede conducir con polarización directa suficiente ($V_s \sim 0,6V$)
- Si la tensión aplicada es inferior a la del codo de la exponencial, $I_D \approx 0$, $V_D \approx V_s$
- Si la tensión aplicada es superior a la del codo, I_D y V_D se pueden determinar gráficamente o bien resolviendo un sistema de ecuaciones trascendente
- Circuitos de polarización más complejos o con mayor número de diodos: necesidad de utilizar un modelo aproximado (no exponencial) para el diodo

• Modelos lineales (aproximados)

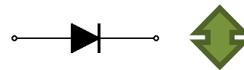
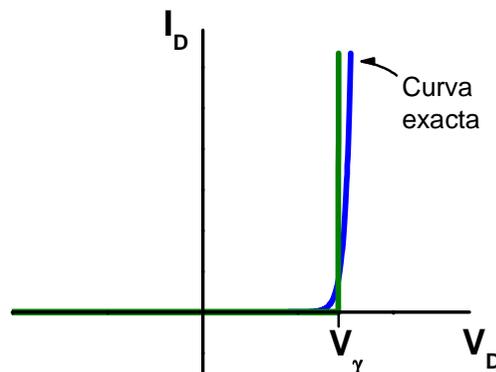
Interruptor



Corte: ($I_D=0$, $V_D < 0$) — —

Cond: ($I_D > 0$, $V_D = 0$) ———

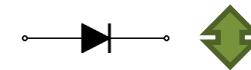
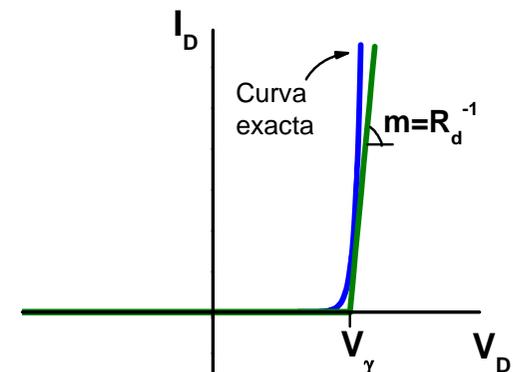
De la tensión umbral



Corte: ($I_D=0$, $V_D < V_\gamma$) — —

Cond: ($I_D > 0$, $V_D = V_\gamma$) —|—
 V_γ

De la resistencia dinámica



Corte: ($I_D=0$, $V_D < V_\gamma$) — —

Cond: ($I_D > 0$, $V_D > V_\gamma$) —|—
 V_γ R_d ²²

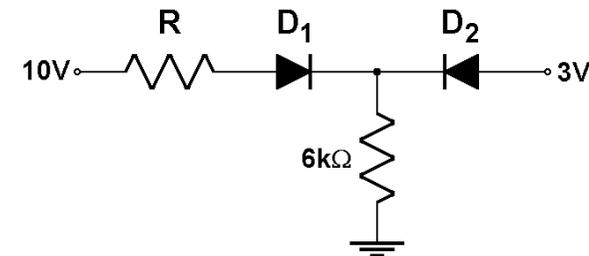
TEMA 4: DIODOS

- La tensión umbral y la resistencia dinámica del diodo (V_γ y R_d) son parámetros que dependen del rango de corrientes que circulan por él
- Sus valores pueden ser obtenidos experimentalmente, a partir de la pendiente de la recta tangente a la curva en un cierto punto y su corte con el eje de tensiones
- Es frecuente que se nos proporcionen los valores de los parámetros del modelo lineal a considerar

♣ Ejemplo 3: determinación (aproximada) del punto de polarización de los diodos del circuito, siendo a) $R=19k\Omega$; b) $R=4k\Omega$. Datos: suponer para ambos diodos una tensión umbral $V_\gamma=0,6V$.

Antes de plantear ecuaciones observamos que, consideradas individualmente:

- La fuente de 10V: polariza a D_1 en directa
polariza a D_2 en inversa
- La fuente de 3V: polariza a D_1 en inversa
polariza a D_2 en directa



⇒ ¿estado de conducción de D_1 y D_2 ? 4 posibilidades. Supondremos una de ellas, hallaremos las tensiones y corrientes en el circuito y verificaremos la hipótesis (“reducción al absurdo”).

Puesto que $10V > 3V$, parece lógico suponer que D_1 conduce y que D_2 está en corte.

Observación: si D_1 y D_2 estuvieran en serie, sólo existirían 2 posibilidades.

TEMA 4: DIODOS

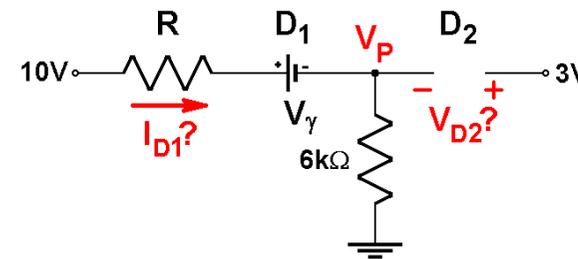
Sustituimos los diodos por los modelos correspondientes, y resolvemos el circuito resultante mediante las técnicas de resolución de circuitos estudiadas:

$$-10V + RI_{D1} + V_{\gamma} + 6k\Omega I_{D1} = 0 \Rightarrow I_{D1} = \frac{10V - 0,6V}{R + 6k\Omega};$$

a) $I_{D1} = 0,376\text{mA}$; b) $I_{D1} = 0,94\text{mA}$

$$V_{D2} = 3V - V_P = 3V - 6k\Omega I_{D1};$$

a) $V_{D2} = 0,744\text{V}$; b) $V_{D2} = -2,64\text{V}$



Analizamos los resultados en ambos casos:

a) $V_{D2} > V_{\gamma} \Rightarrow$ inconsistente, si D_2 en corte \Rightarrow hipótesis falsa

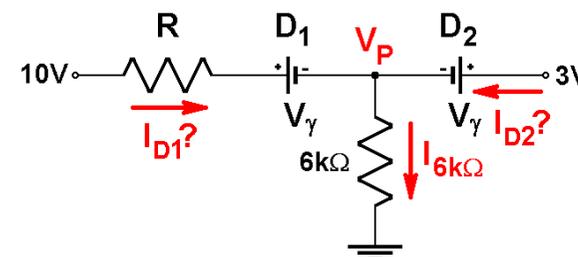
b) $V_{D2} < V_{\gamma} \Rightarrow$ consistente con D_2 en corte; $I_{D1} > 0 \Rightarrow$ consistente con D_1 en conducción
 \Rightarrow puntos de polarización: $(V_{D1}, I_{D1}) = (0,6\text{V}, 0,94\text{mA})$, $(V_{D2}, I_{D2}) = (-2,64\text{V}, 0)$

Planteamos una nueva hipótesis para el caso a): D_1 y D_2 en conducción.

$$V_P = 3V - V_{\gamma} = 2,4\text{V}$$

$$I_{D1} = \frac{10V - (V_P + V_{\gamma})}{R} = \frac{7V}{19k\Omega} = 0,368\text{mA} > 0$$

$$I_{D2} = I_{6k\Omega} - I_{D1} = \frac{V_P}{6k\Omega} - 0,368\text{mA} = 0,032\text{mA} > 0$$



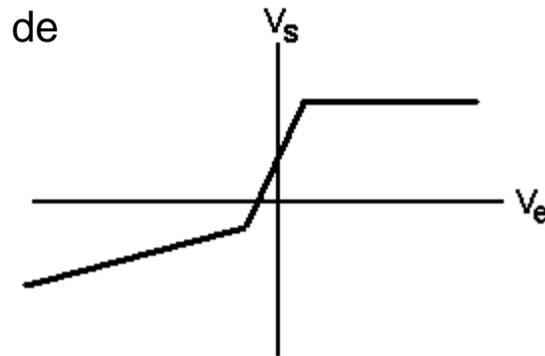
Luego $(V_{D1}, I_{D1}) = (0,6\text{V}, 0,368\text{mA})$, $(V_{D2}, I_{D2}) = (0,6\text{V}, 0,032\text{mA})$

TEMA 4: DIODOS

- **Circuitos con diodos. Circuitos limitadores y rectificadores**

Cuando el punto de operación del diodo va pasando periódicamente de conducción a no conducción, a causa de fuentes de valor variable, es muy útil determinar previamente la curva característica de transferencia de tensión del circuito (comportamiento de V_s en función de V_e).

Cuando utilizamos modelos lineales para determinar esta curva, la aproximación obtenida está formada por la concatenación de varios segmentos rectilíneos, cada uno de los cuales se corresponde con uno de los posibles estados de conducción/corte de los distintos diodos del circuito.



Determinación de la curva característica

Para cada una de las posibles combinaciones de conducción/corte de los distintos diodos:

- 1) Sustituir cada diodo por su modelo lineal correspondiente
- 2) Resolver el circuito lineal resultante y determinar la relación $V_s(V_e)$
- 3) Determinar, en ese circuito, el rango de tensiones de V_e en el que, para todos los diodos del circuito, los valores de I_D o V_D son compatibles con su modelo lineal usado ($I_D > 0$ o $V_D < V_\gamma$)

(La resolución de los circuitos debe hacerse en las condiciones de carga en que trabaje el mismo).

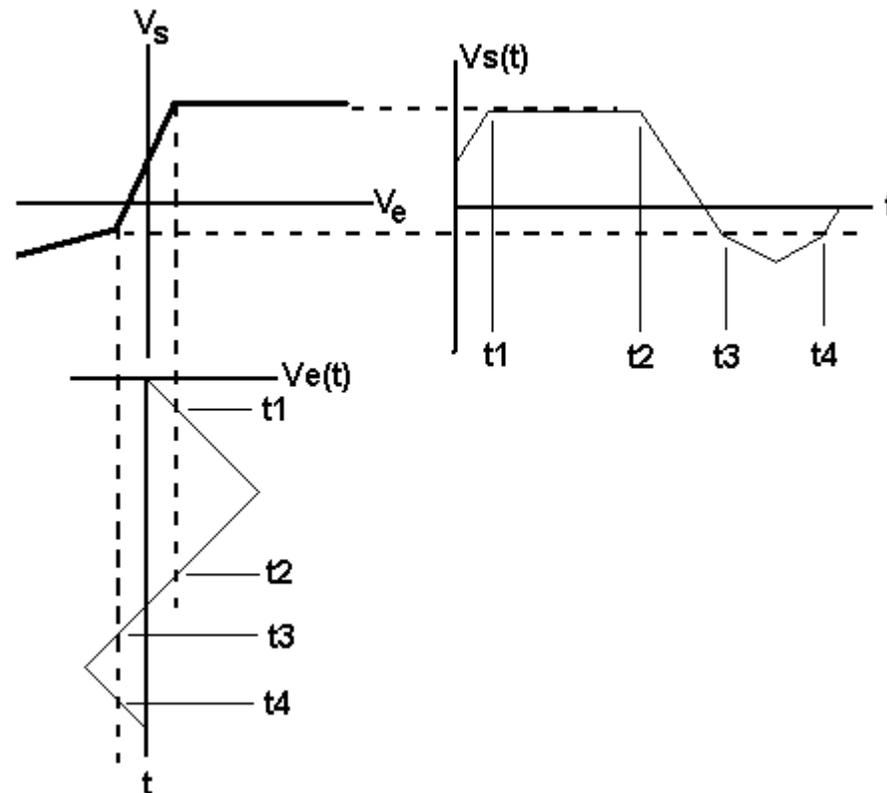
TEMA 4: DIODOS

Puede haber combinaciones de estados de conducción/corte que no sean posibles en ningún rango de tensiones de entrada. Con frecuencia estas combinaciones son descartables sin necesidad de hacer una resolución completa del circuito.

En circuitos simples puede ser más sencillo, para hallar los intervalos de tensión, imponer simultáneamente $I_D=0$ y $V_D=V_\gamma$, lo que nos da el punto donde se unen dos segmentos.

La curva resultante nunca puede ser discontinua

Una vez determinada la curva característica de transferencia, podemos determinar la forma de onda de salida para cualquier forma arbitraria de la tensión de entrada.



TEMA 4: DIODOS

- ♣ Ejemplo 4: Consideremos el siguiente circuito, y el modelo de la tensión umbral para los diodos, siendo V_e una fuente de tensión que puede adoptar cualquier valor real.

En principio, con dos diodos, se pueden dar cuatro situaciones:

- 1) Ningún diodo conduce
- 2) Conduce D1 y no conduce D2
- 3) Conduce D2 y no conduce D1
- 4) Conducen los dos diodos

$$1) \quad V_s = I \cdot R_L = \frac{V_e}{R + R_L} \cdot R_L = \frac{R_L}{R + R_L} V_e$$

Condiciones:

$$V_{D1} < V_\gamma \Rightarrow I \cdot R < V_\gamma \Rightarrow V_e < \frac{R + R_L}{R} V_\gamma \quad y$$

$$V_{D2} < V_\gamma \Rightarrow -I \cdot R_L < V_\gamma \Rightarrow V_e > -\frac{R + R_L}{R_L} V_\gamma$$

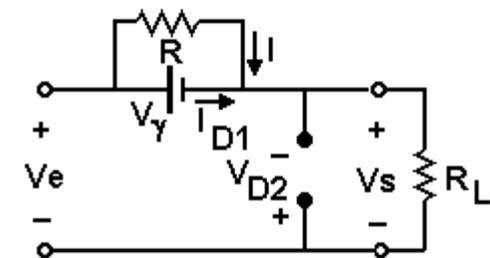
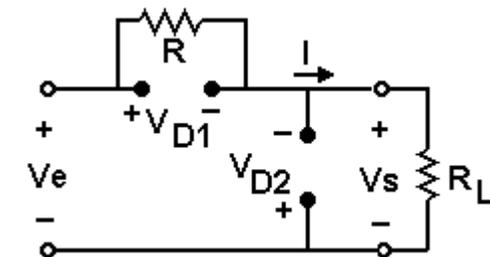
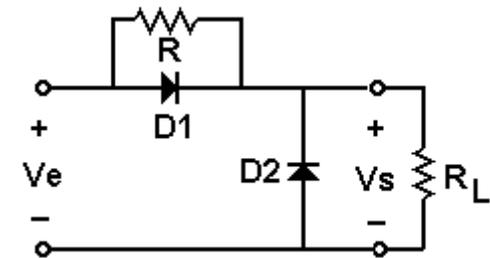
$$2) \quad V_s = V_e - V_\gamma$$

Condiciones:

$$V_{D2} < V_\gamma \Rightarrow -V_s < V_\gamma \Rightarrow V_e > 0 \quad y$$

$$I_{D1} > 0 \Rightarrow [(I_{D1} + I) - I] > 0 \Rightarrow \frac{V_s}{R_L} - \frac{V_\gamma}{R} > 0 \Rightarrow V_e > \frac{R + R_L}{R} V_\gamma$$

(la segunda condición es más restrictiva que la primera)



TEMA 4: DIODOS

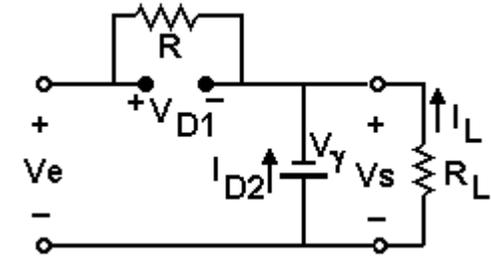
3) $V_s = -V_\gamma$

Condiciones:

$$V_{D1} < V_\gamma \Rightarrow (V_\gamma + V_e) < V_\gamma \Rightarrow V_e < 0 \quad y$$

$$I_{D2} > 0 \Rightarrow [(I_L + I_{D2}) - I_L] > 0 \Rightarrow \frac{-V_e - V_\gamma}{R} - \frac{V_\gamma}{R_L} > 0 \Rightarrow V_e < -\frac{R + R_L}{R_L} V_\gamma$$

(de nuevo, la segunda condición es más restrictiva que la primera)

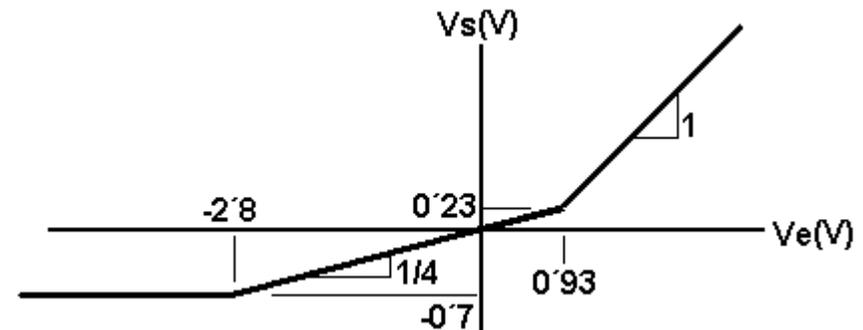


4) Entre los tres rangos anteriores cubren todos los valores de V_e desde $-\infty$ a $+\infty$, no dejando opción a que se dé la cuarta situación; pero, además ¿podemos darnos cuenta de que si los dos diodos estuvieran en conducción simultáneamente, en el nodo V_s+ entrarían cuatro corrientes positivas? (¡¡¡en contra de la 1ª Ley de Kirchhoff !!!)

Para el circuito anterior, suponiendo

$V_\gamma = 0.7V$ y $R = 3R_L$, obtenemos:

$$\begin{aligned} V_e < -2.8V &\rightarrow V_s = -0.7V \\ -2.8V < V_e < 0.93V &\rightarrow V_s = 1/4V_e \\ 0.93V < V_e &\rightarrow V_s = V_e - 0.7V \end{aligned}$$



TEMA 4: DIODOS

♣ Ejemplo 5: Consideremos el siguiente circuito, y el modelo de la tensión umbral para el diodo, siendo $v_e(t) = V_p \sin(\omega t)$.

Se pueden dar dos situaciones:

- 1) D conduce
- 2) D no conduce

$$1) \quad V_s(t) = v_e(t) - V_\gamma$$

Condición:

$$I_D > 0 \Rightarrow \frac{v_e(t) - V_\gamma}{R_L} > 0 \Rightarrow v_e(t) > V_\gamma$$

$$2) \quad V_s(t) = 0$$

Condición:

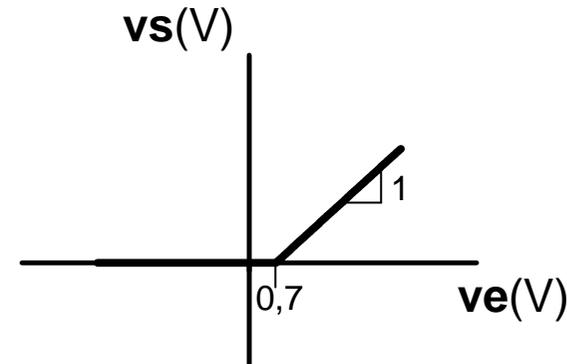
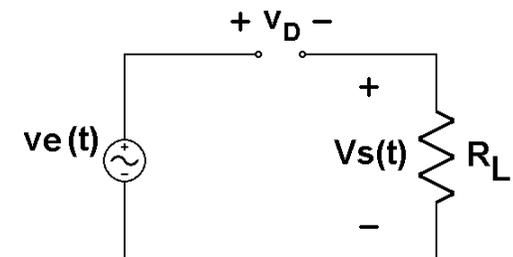
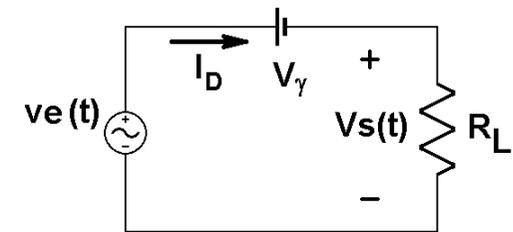
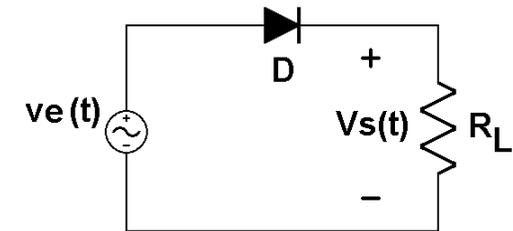
$$V_D < V_\gamma \Rightarrow v_e(t) < V_\gamma \quad (\text{como era de esperar})$$

Para el circuito anterior, suponiendo

$V_\gamma = 0,7V$ y $V_p = 4,0V$, obtenemos:

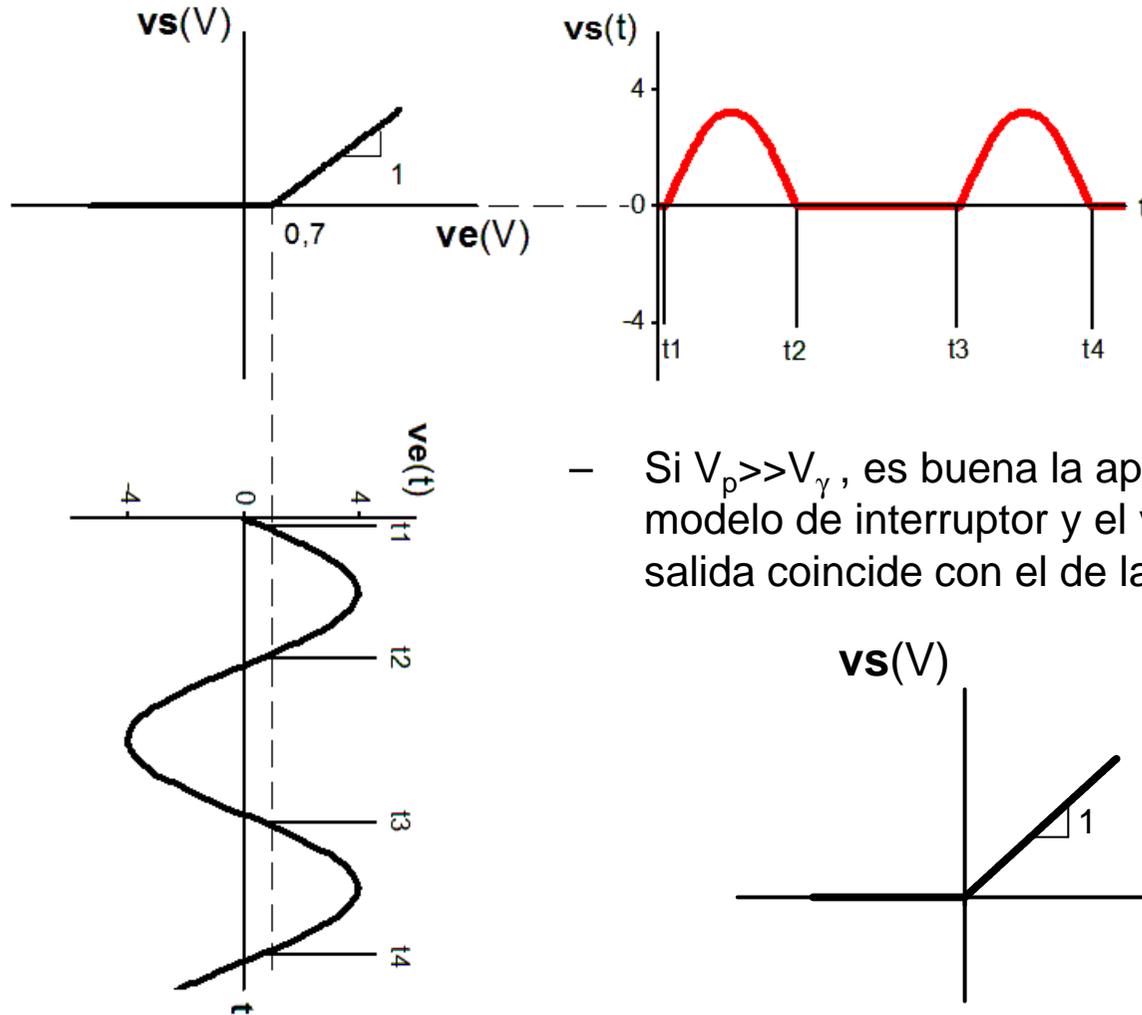
$$v_e(t) < 0,7V \rightarrow V_s(t) = 0$$

$$v_e(t) > 0,7V \rightarrow V_s(t) = v_e(t) - V_\gamma$$



TEMA 4: DIODOS

La forma de onda resultante corresponde a un rectificador de media onda:



- Si $V_p \gg V_\gamma$, es buena la aproximación del modelo de interruptor y el valor de pico de la salida coincide con el de la entrada

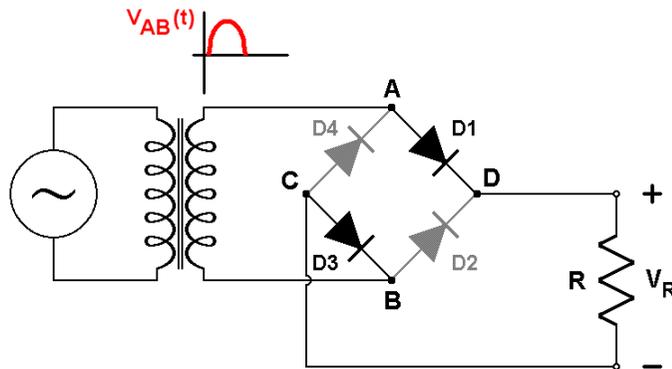
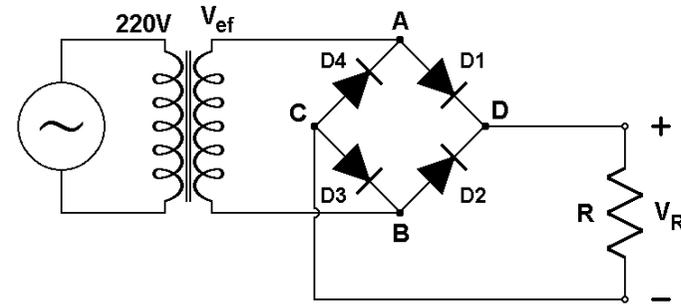
- Al invertir la posición del diodo, permanecen a la salida los semiciclos negativos de $v_s(t)$

TEMA 4: DIODOS

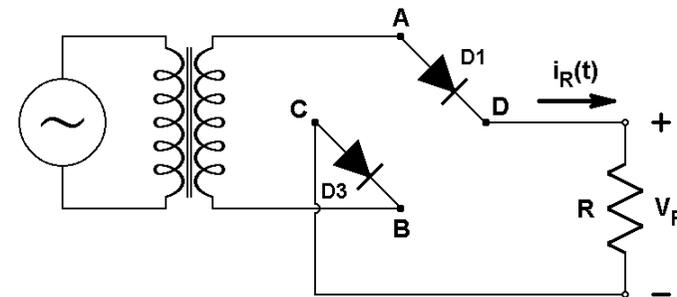
- Rectificador de onda completa por puente de diodos

¿ $v_R(t)$?

- Diodos idénticos
- Modelo de la tensión umbral
- Análisis independiente de cada semiciclo

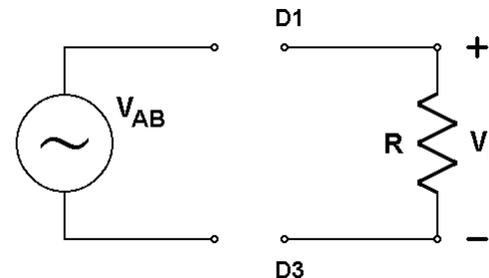
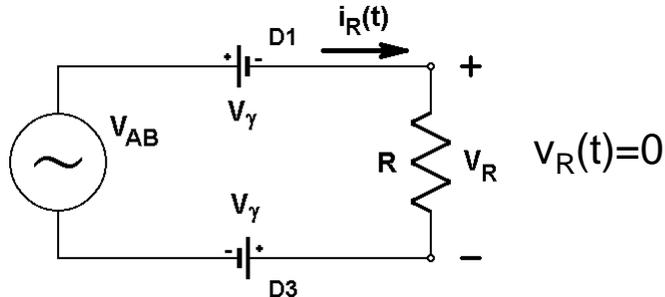


$v_{AB} > 0 \Rightarrow v_A > v_C, v_D > v_B \Rightarrow D1$ y $D3$,
en pol. directa, $D2$ y $D4$, en pol. inversa

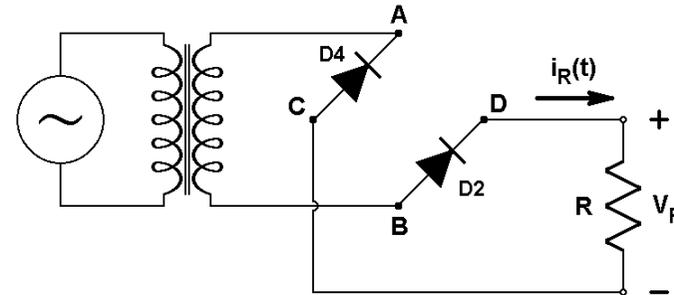
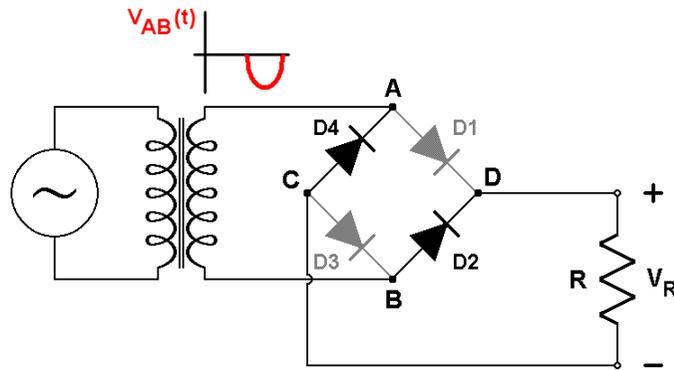


$v_R(t) = v_{AB} - V_{D1} - V_{D3};$
 $v_R(t) > 0 \Rightarrow V_{D1}, V_{D3} = V_\gamma, v_{AB} > 2V_\gamma$

$$v_{AB} > 2V_\gamma \quad v_{AB} < 2V_\gamma$$



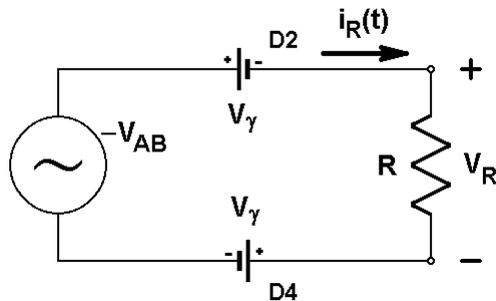
TEMA 4: DIODOS



$V_{AB} < 0 \Rightarrow v_A < v_C, v_D < v_B \Rightarrow$ D1 y D3, en pol. inversa, D2 y D4, en pol. directa

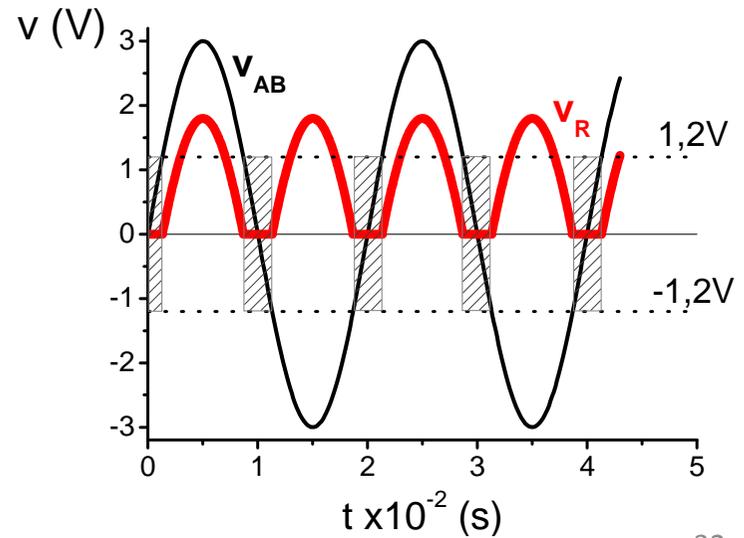
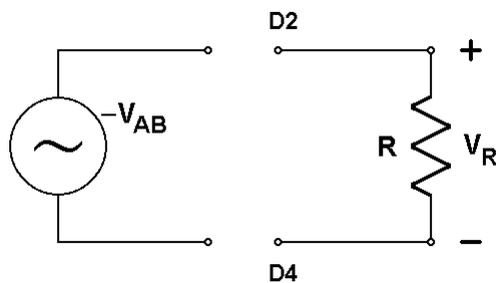
$V_R(t) = -V_{AB} - V_{D2} - V_{D4};$
 $V_R(t) > 0 \Rightarrow V_{D2}, V_{D4} = V_\gamma, V_{AB} < -2V_\gamma$

$V_{AB} < -2V_\gamma$



o: Si $v_{AB}=3V, V_\gamma=0,6V, f=50Hz$

$V_{AB} > -2V_\gamma$



TEMA 4: DIODOS

⊗ En resumen:

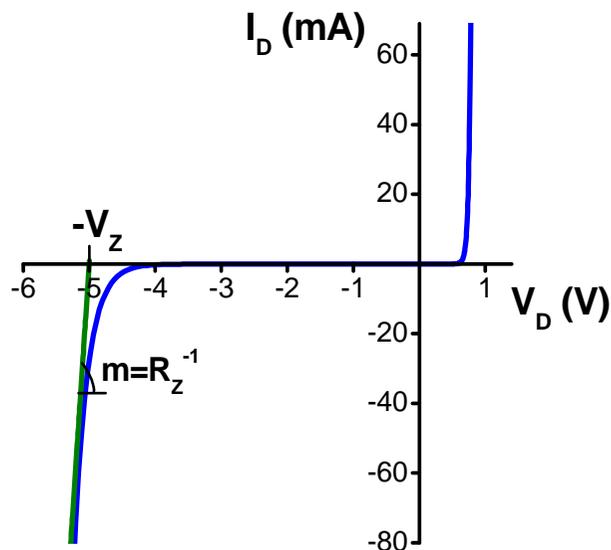
- Un diodo de unión es un dispositivo semiconductor de dos terminales, de comportamiento no lineal, que conduce de forma apreciable en un único sentido cuando se alcanza entre sus terminales un cierto valor umbral de tensión
- Se pueden obtener los valores (I_D, V_D) -punto de trabajo- gráficamente, a partir del corte entre la característica del diodo y la recta de carga
- Debido al comportamiento exponencial de la característica I-V, se trabaja habitualmente con tres modelos lineales aproximados por tramos: de interruptor, de la tensión umbral y de la resistencia dinámica
- Los circuitos con diodos en que todas las fuentes son constantes se denominan circuitos de polarización. Para conocer los valores (I_D, V_D) en estos circuitos se plantean hipótesis sobre el estado de los diodos y se confirman
- En los circuitos que presentan fuentes de valor variable, el punto de operación del diodo o diodos puede pasar de conducción a corte. En tal caso:
 - i) determinaremos la curva característica de transferencia
 - ii) si la fuente varía temporalmente, determinaremos la forma de onda de salida a partir de la característica de transferencia

TEMA 4: DIODOS

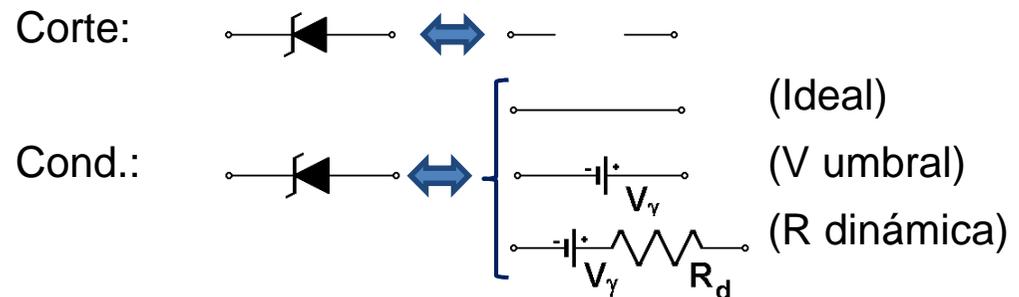
- **Otros diodos: Zéner, LED y fotodiodo**

Además de los diodos de unión p-n, existen otros tipos de diodos muy habituales en numerosas aplicaciones prácticas.

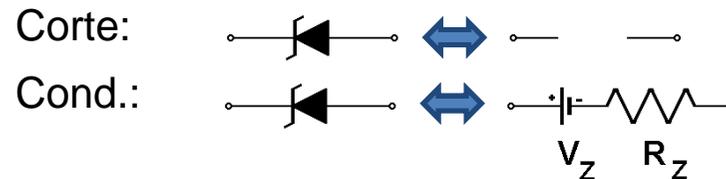
- Diodo zéner: en polarización directa se comporta como un diodo de unión, mientras que en polarización inversa presenta también una región de conducción llamada región de ruptura, en la que la tensión varía poco



- Modelos lineales en polarización directa:



- Modelos lineales en polarización inversa:



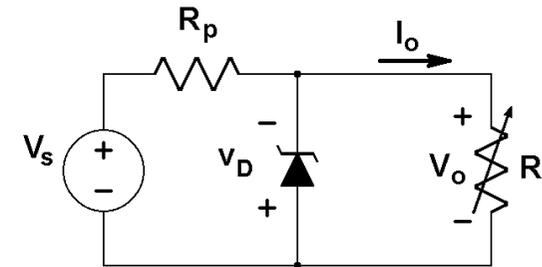
V_Z , R_Z : tensión y resistencia de zéner

El análisis de los circuitos con zéner es análogo al de los diodos de unión, teniendo en cuenta que en el zéner hay tres regiones de funcionamiento

TEMA 4: DIODOS

El zéner como dispositivo regulador de tensión

En el circuito de la figura, la resistencia R varía entre 0 e ∞ , lo que produce cambios en el funcionamiento del zéner, aún siendo constantes conocidas los restantes valores nominales. Obtendremos la tensión en R en función de la corriente por ella. Supondremos $V_s > V_Z$, siendo R_Z y V_Z también conocidos.



Polarización inversa \Rightarrow zéner en corte o en conducción inversa. ¡Al no ser el circuito de malla única, la condición $V_s > V_Z$ no garantiza la conducción del diodo!

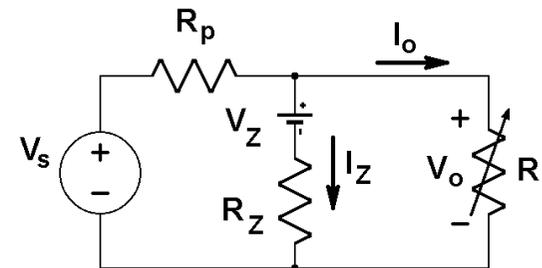
– Situaciones extremas:

$R=0 \Rightarrow V_D=0$, zéner en corte, $I_o=I_{o\text{máx}}=V_s/R_p$

$R \rightarrow \infty$: malla única y $V_s > V_Z \Rightarrow$ conducción inversa, $I_o=0$

– Situación límite: $I_Z=0$, $V_D=-V_Z \Rightarrow$

$$\frac{V_s - V_Z}{R_p} = \frac{V_Z}{R}; R = R_p \frac{V_Z}{V_s - V_Z} \equiv R_{\text{lím}}$$



– $R < R_{\text{lím}}$ (corte)

$R > R_{\text{lím}}$ (conducción inversa)

$$V_o(I_o) = V_s - R_p I_o$$

$$\frac{V_s - V_o}{R_p} = \frac{V_o - V_Z}{R_Z} + I_o; V_o(I_o) = \frac{R_p}{R_Z + R_p} V_Z + \frac{R_Z}{R_Z + R_p} V_s - \frac{R_Z R_p}{R_Z + R_p} I_o$$

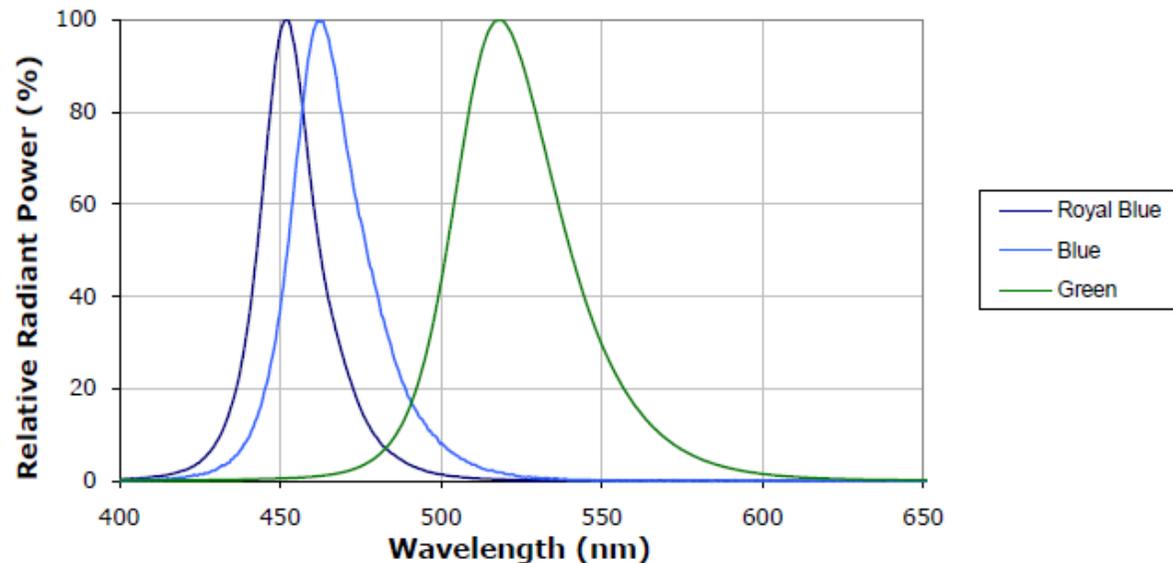
Observación: Si el zéner conduce en inversa y $R_Z \ll R_p$, entonces $V_o(I_o) \approx V_Z - R_Z I_o \approx V_Z$
 \Leftrightarrow el zéner **regula** la tensión manteniéndola aproximadamente constante con R .

TEMA 4: DIODOS

- **Otros diodos: Zéner, LED y fotodiodo**

- **LED** (*Light-emitting diode*): es un diodo de unión p-n que emite luz cuando se polariza en la región de conducción. Esta propiedad se da sólo en los dispositivos fabricados con algunos materiales semiconductores.

Aunque la luz emitida no es monocromática, la intensidad emitida presenta un máximo a una longitud de onda que depende del material con que se fabrique. Esto se observa en la gráfica típica de distribución espectral siguiente:



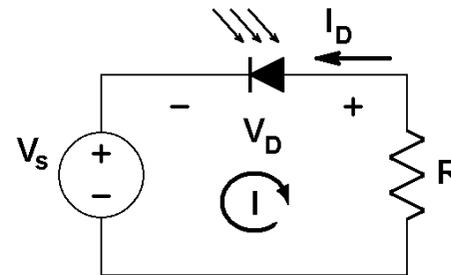
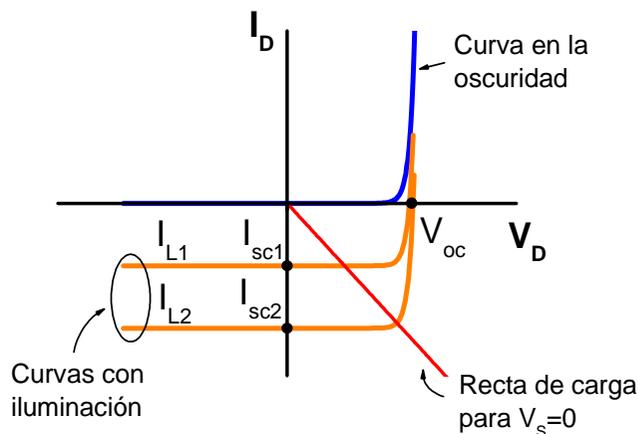
En un LED se define la *eficiencia de emisión*: $\eta \equiv \frac{P_{lum}}{P_{el}}$, P_{lum} = potencia emitida, $P_{el} = I_D V_D$

TEMA 4: DIODOS

- **Otros diodos: Zéner, LED y fotodiodo**

- **Fotodiodo:** es un diodo de unión p-n construido de forma que la luz puede llegar al semiconductor. La irradiación de éste produce una corriente inversa a la habitual en el diodo, que se suma a la corriente que es suministrada por el circuito.

La corriente inversa es más evidente bajo polarización inversa, y es proporcional al número de fotones incidentes (a la intensidad luminosa).



Recta de carga:

$$I_D = -\frac{V_S}{R} - \frac{V_D}{R}$$

Cuando el dispositivo trabaja en el cuarto cuadrante de la característica, recibe el nombre de célula fotovoltaica, y proporciona al circuito una potencia igual al producto $I_D \times V_D$. En una célula se definen:

Corriente de cortocircuito ($V_D=0$): I_{sc} *Tensión de circuito abierto* ($I_D=0$): V_{oc}

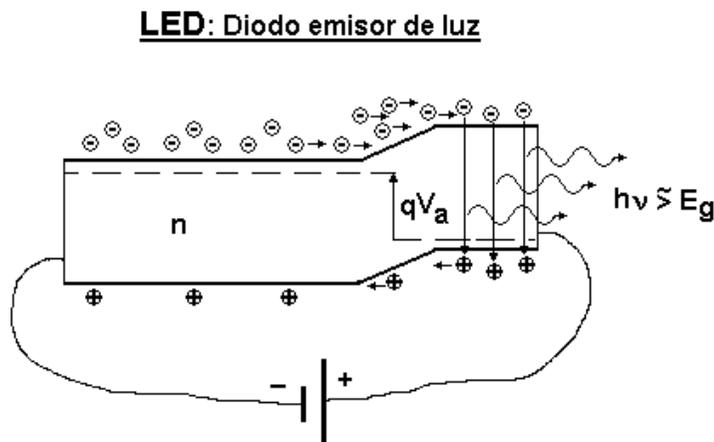
Eficiencia o rendimiento: $\eta \equiv \frac{P_{\max}}{P_{lum}}$, P_{lum} = Potencia luminosa incidente

P_{\max} = Potencia máxima que proporciona

TEMA 4: DIODOS

- **Otros diodos: Zéner, LED y fotodiodo**

– Su funcionamiento se basa en la variación de energía de los portadores con intercambio de energía luminosa bajo ciertas condiciones:



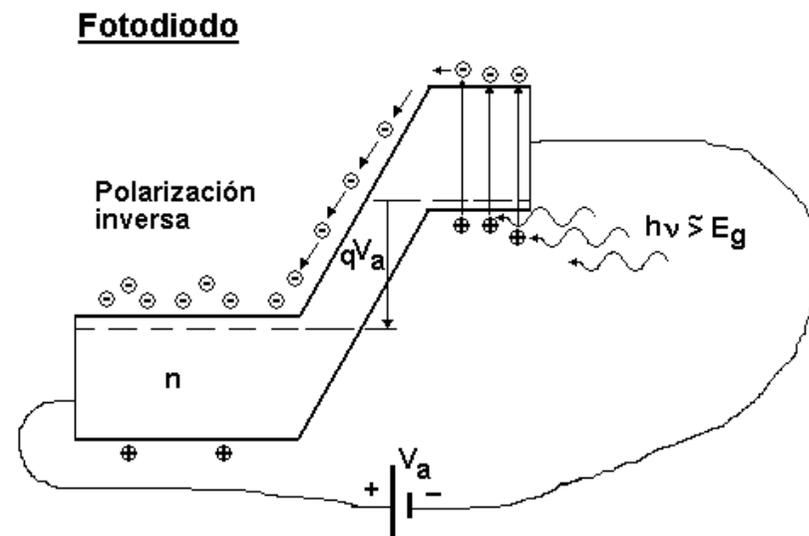
Los electrones inyectados desde el lado n se recombinan con los huecos de la región p

Materiales con elevada eficiencia de recombinación radiativa

La elección del material semiconductor (E_g) determina la longitud de onda de emisión

Unión p-n con la región p muy estrecha y superficial

Los fotones se generan muy cerca de la superficie y escapan fácilmente



Unión p-n con la región p muy estrecha y superficial

Fotones con energía mayor que E_g son absorbidos por electrones de la BV del lado p, pasando a la BC y dejando un hueco

Los electrones abandonan fácilmente esa estrecha región p y son acelerados por el campo eléctrico hacia el lado n

TEMA 5: Transistores

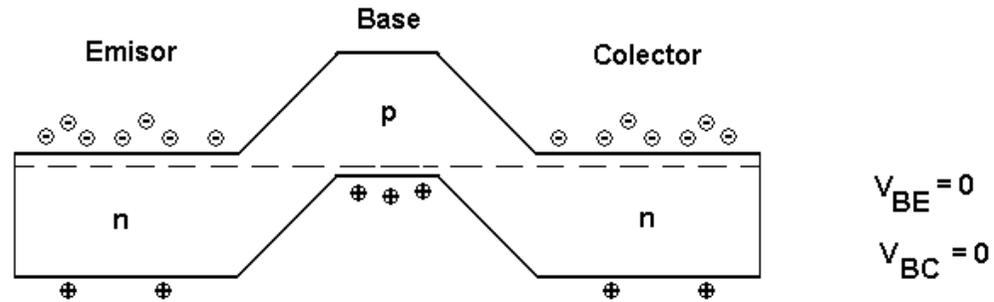
- a) Transistor bipolar de unión (BJT)
- b) Transistor de efecto campo metal-óxido-semiconductor (MOSFET)

TEMA 5: TRANSISTORES

- La estructura n-p-n

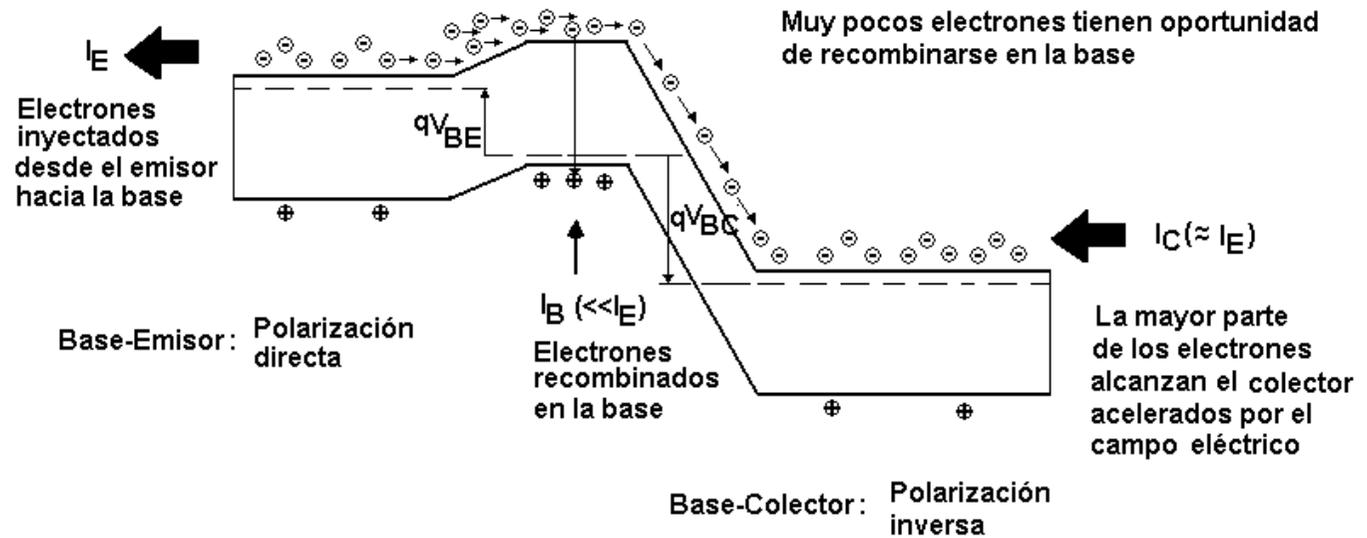
Transistor bipolar n-p-n

Transistor en equilibrio



Ancho de la región de base muy pequeño

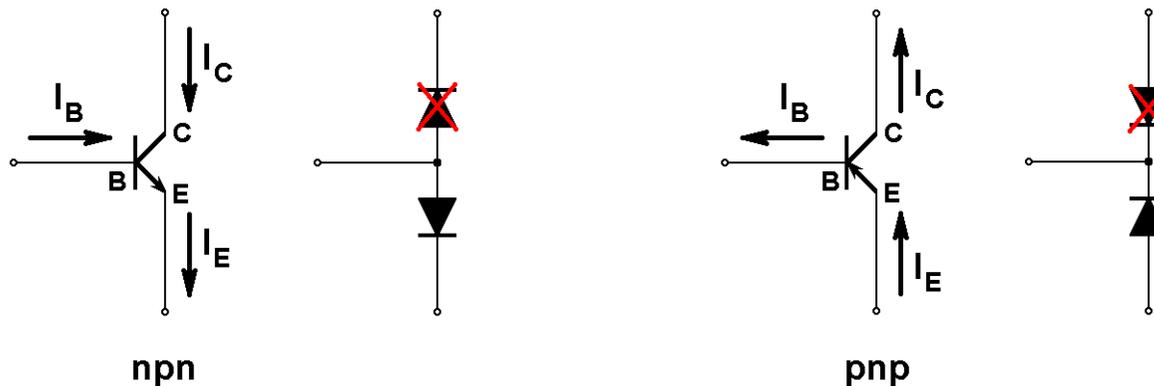
Región activa de funcionamiento



TEMA 5: TRANSISTORES

El **transistor bipolar de unión** es un dispositivo semiconductor de tres terminales, de comportamiento no lineal, que bajo ciertas condiciones se comporta como un amplificador de corriente. Se construye a partir de dos diodos de unión que comparten uno de sus dos terminales (aunque no se comporta de forma equivalente, debido a la extrema estrechez del terminal compartido).

- **Símbolos y terminales**



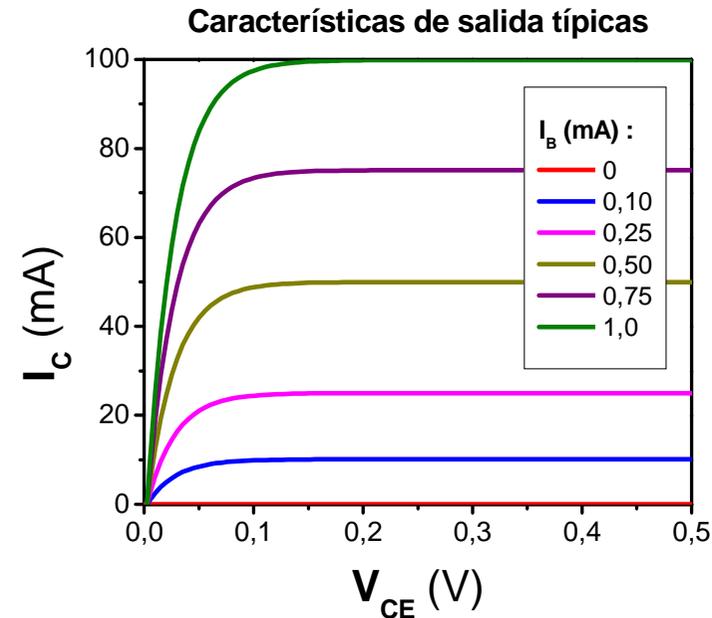
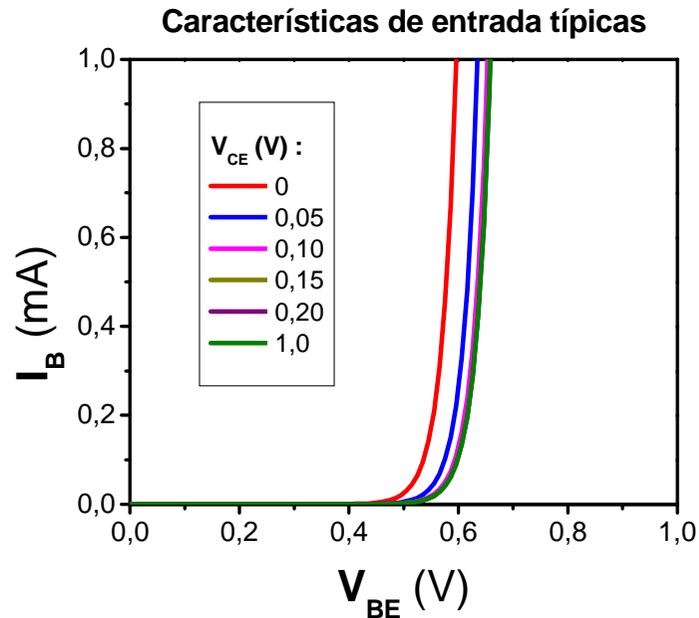
- Sólo la unión base-emisor se comporta de forma similar a la de un diodo, como se verá
- Las corrientes sólo pueden circular en los sentidos indicados
- En ellos se verifican las L.K.. De acuerdo con el convenio para las corrientes:

$$I_B + I_C = I_E$$
$$V_{CB} + V_{BE} = V_{CE}$$

- Se necesitan 4 variables para describir su comportamiento: I_B , I_C , V_{BE} , V_{CE}
- De las 4 variables se eligen 2 dependientes (I_C y V_{BE}) y 2 independientes (I_B y V_{CE})

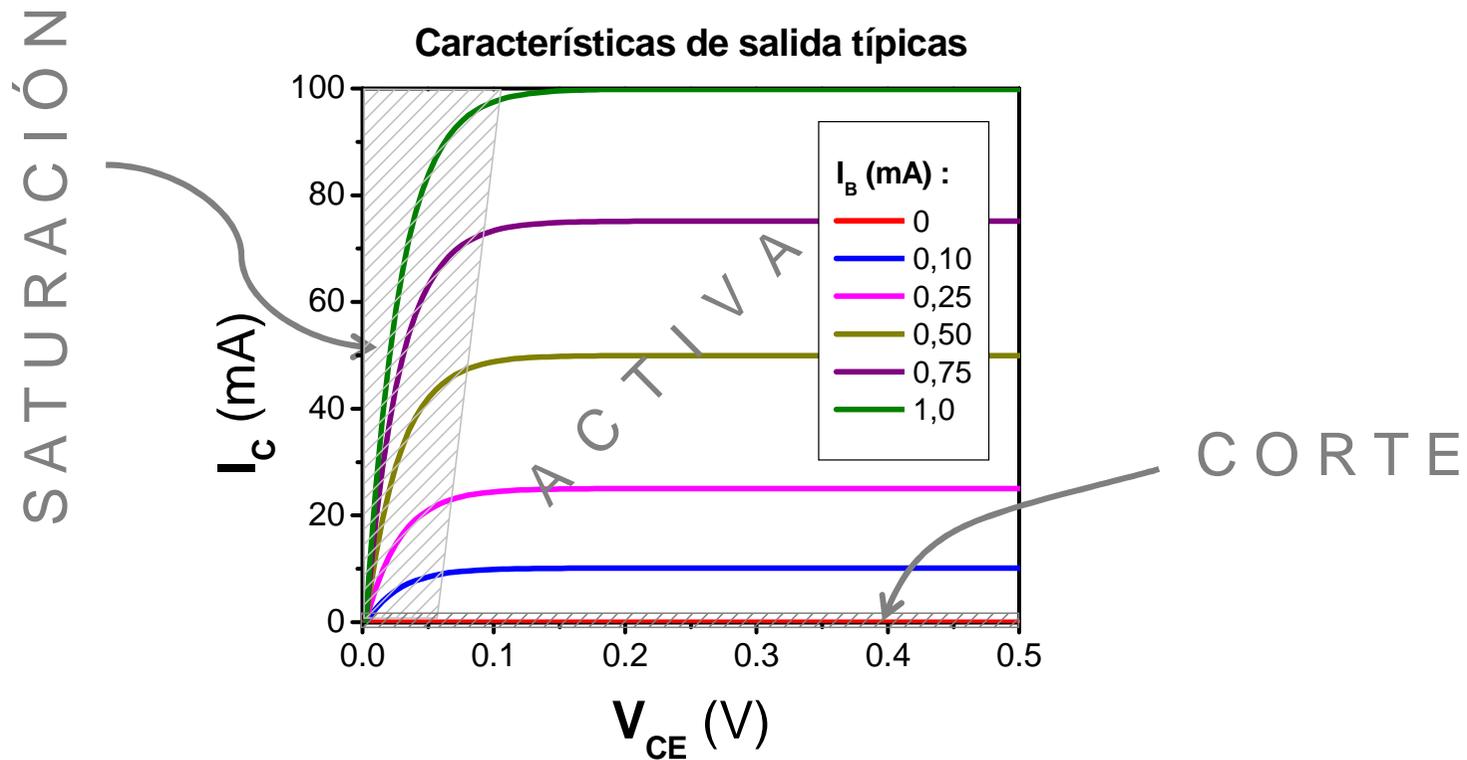
TEMA 5: TRANSISTORES

- **Familias de curvas características y regiones de funcionamiento (npn)**



- Representaciones 2D \Rightarrow una de las variables independientes se toma como parámetro
- Las gráficas reproducen las curvas características reales de un transistor de Silicio tipo npn. Las curvas características de entrada son funciones de tipo exponencial
- Se observa que el comportamiento de la unión BE es similar al de un diodo, y que depende poco del parámetro V_{CE}
- Las corrientes son distintas de cero sii. la unión BE está polarizada en directa, es decir:
 $V_{BE} \sim 0,5-0,6V \Rightarrow I_B > 0 \Rightarrow I_C > 0 (\Rightarrow I_E > 0)$, $V_{BE} < 0,5-0,6V \Rightarrow I_B = 0 \Rightarrow I_C = 0 (\Rightarrow I_E = 0)$
- En las características de salida se distinguen tres regiones de funcionamiento:

TEMA 5: TRANSISTORES



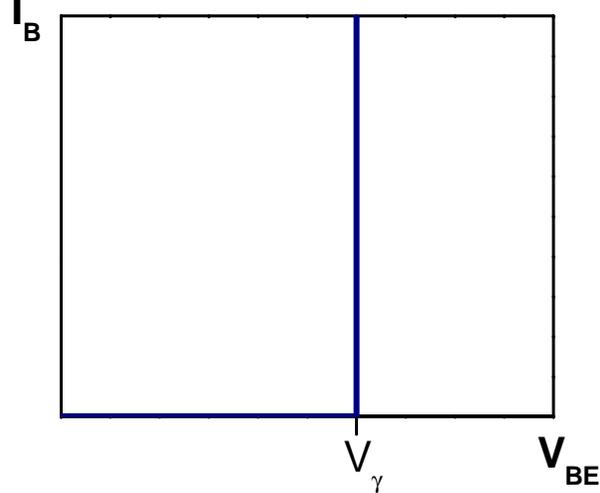
Región	I_B	I_C	I_E	V_{CE}	V_{BE}
Corte	0	0	0	Indet.	<0,5-0,6V
Activa	>0	βI_B	$(1+\beta)I_B$	$\geq 0,15V$	$\sim 0,5-0,6V$
Saturación	>0	$< \beta I_B$	$< (1+\beta)I_B$	$\leq 0,15V$	$\sim 0,5-0,6V$

β ≡ ganancia de corriente del transistor

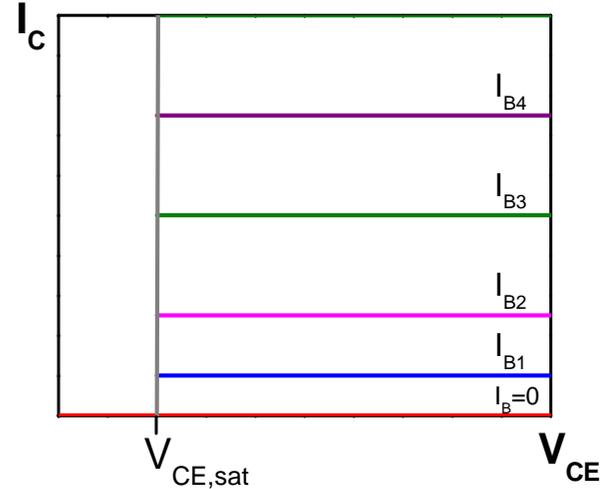
TEMA 5: TRANSISTORES

- Modelo lineal aproximado (npn)**

Características de entrada: aprox. lineal

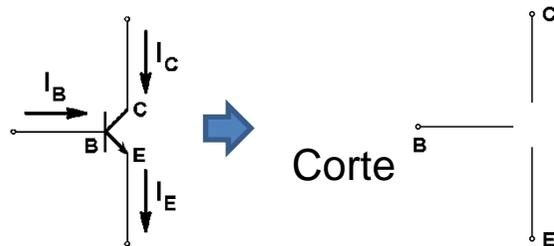


Características de salida: aprox. lineal

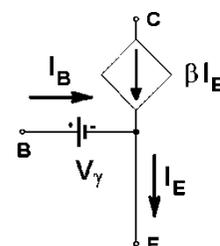


Región	I_B	I_C	I_E	V_{CE}	V_{BE}
Corte	0	0	0	Indet.	$<V_\gamma$
Activa	>0	βI_B	$(1+\beta)I_B$	$\geq V_{CE,sat}$	$=V_\gamma$
Saturación	>0	$<\beta I_B$	$<(1+\beta)I_B$	$=V_{CE,sat}$	$=V_\gamma$

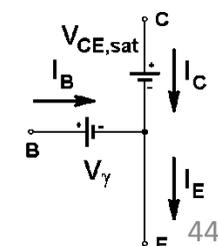
Circuitos equiv.:



Activa



Saturación



TEMA 5: TRANSISTORES

- **Polarización del transistor**

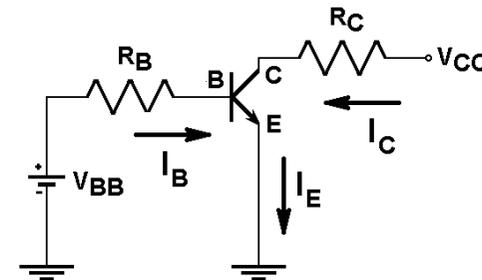
Las corrientes y tensiones en un transistor dependen del circuito en que se encuentre. La figura muestra uno de los circuitos de polarización más simple que podemos utilizar para ello; consideraremos el modelo lineal del transistor, y supondremos conocidos los parámetros característicos del mismo, β , V_γ y $V_{CE,sat}$:

– Si $V_{BB} < V_\gamma \Rightarrow$ corte $\Rightarrow I_B = 0, I_C = 0$;

$$V_{BE} = V_{BB}, V_{CE} = V_{CC}$$

– Si $V_{BB} \geq V_\gamma \Rightarrow$ conducción $\Rightarrow V_{BE} = V_\gamma$;

Ec. malla de base: $V_{BB} - R_B I_B - V_\gamma = 0 \Rightarrow I_B = \frac{V_{BB} - V_\gamma}{R_B}$



Ec. malla de colector: $V_{CC} - R_C I_C - V_{CE} = 0$; $\angle I_C, V_{CE}$?

\Rightarrow es necesario plantear hipótesis sobre el estado del transistor, activa o saturación:

- Si suponemos que está en activa,

$$I_C = \beta I_B = \beta \frac{V_{BB} - V_\gamma}{R_B} \Rightarrow V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C; \quad V_{CE} = V_{CC} - R_C \beta \frac{V_{BB} - V_\gamma}{R_B}$$

Verificación: debe obtenerse $V_{CE} > V_{CE,sat}$, de lo contrario, la hipótesis es falsa

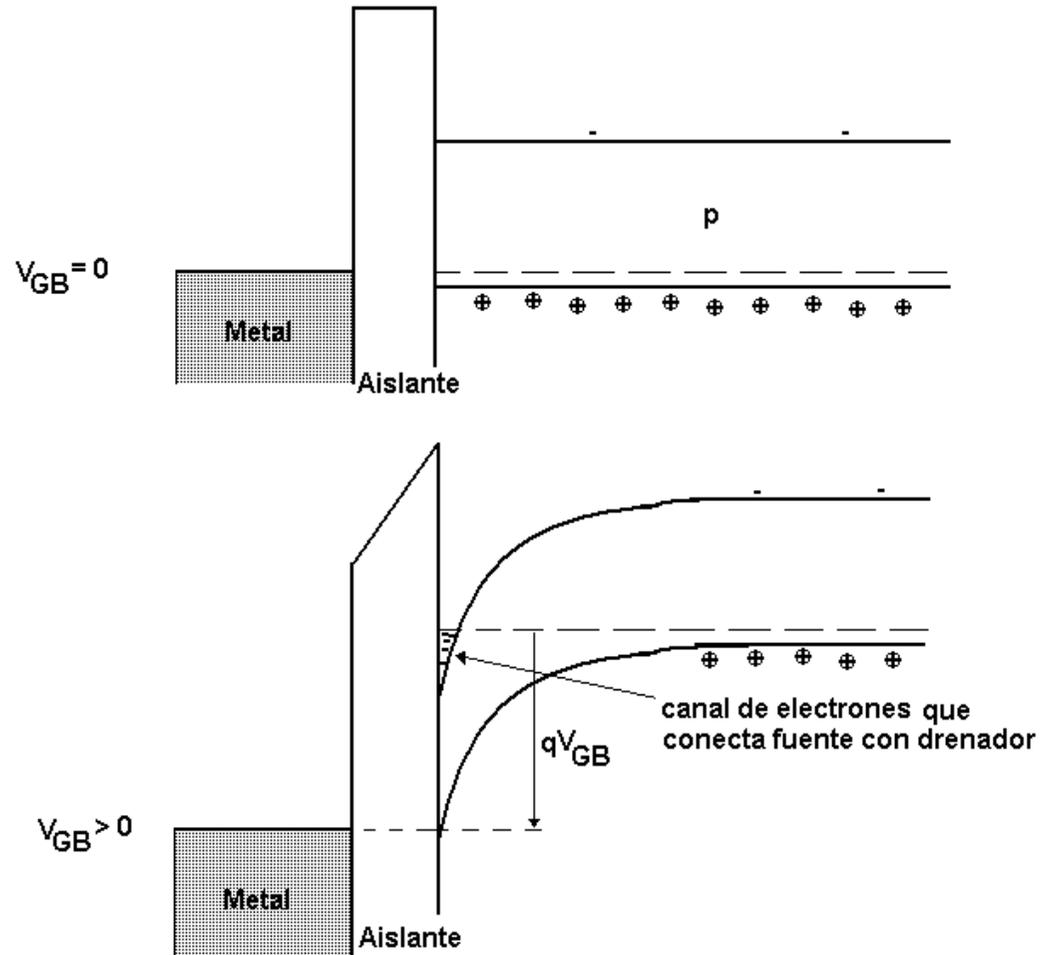
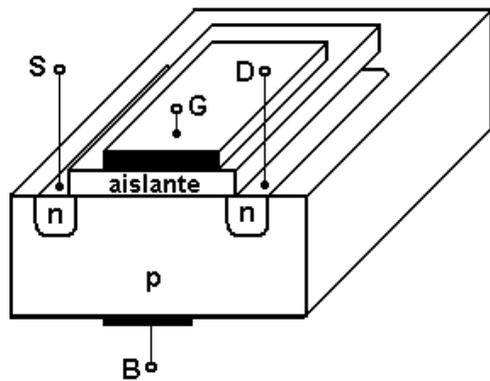
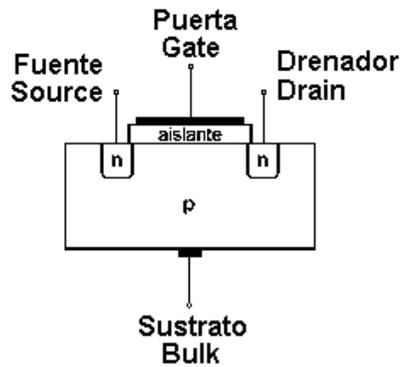
- Si suponemos que está en saturación,

$$V_{CE} = V_{CE,sat} \Rightarrow I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE,sat}}{R_C}$$

TEMA 5: TRANSISTORES

- Principio de funcionamiento del transistor de efecto campo: la estructura MOS

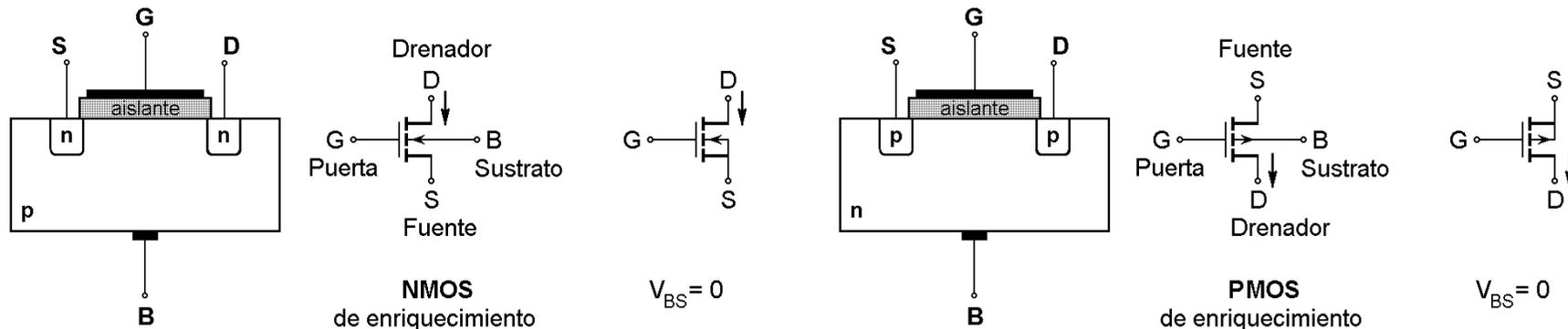
Transistor **MOSFET** (Metal Oxido Semiconductor)



TEMA 5: TRANSISTORES

El transistor de efecto campo de la familia MOSFET (*metal-oxide-semiconductor field effect transistor*) es un dispositivo semiconductor de cuatro terminales, de comportamiento no lineal, en el que la conducción entre dos zonas o terminales del dispositivo se realiza a través de un canal, cuya anchura se regula a través de la tensión aplicada entre los otros dos terminales.

- **Símbolos y terminales (dispositivos de enriquecimiento)**

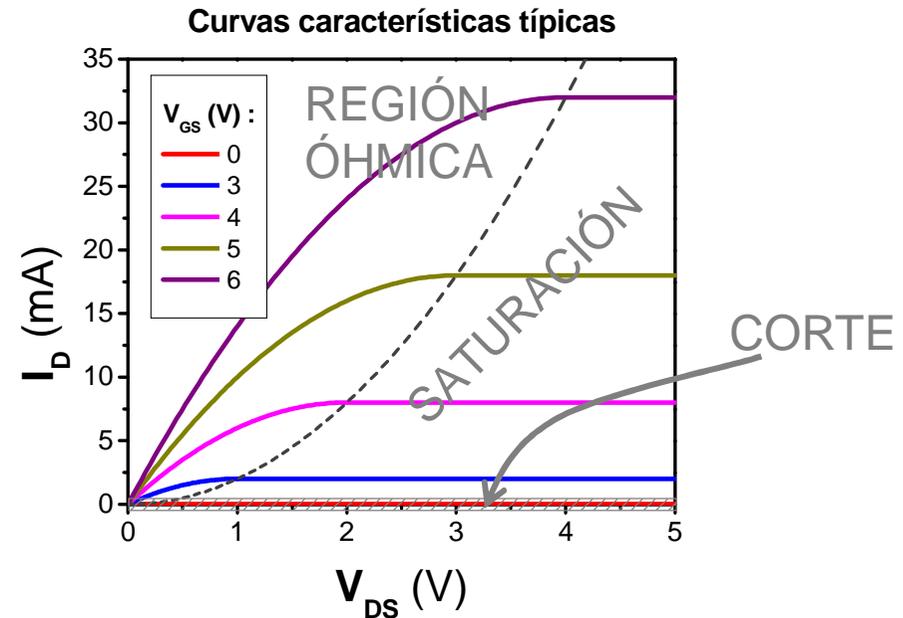
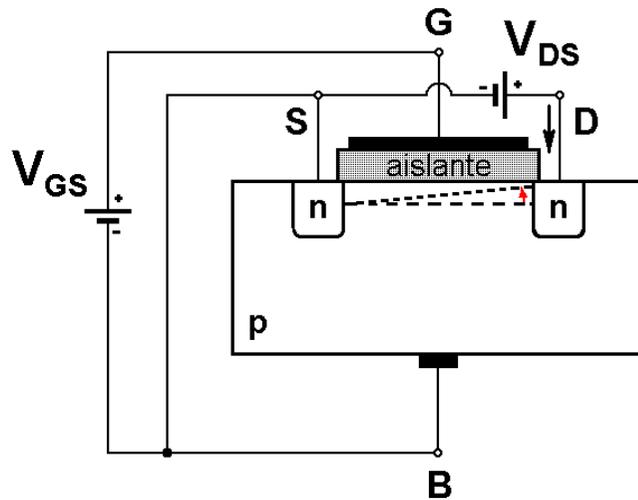


- La corriente sólo puede circular entre fuente (S) y drenador (D), debido al óxido aislante de la puerta (G) \Rightarrow sólo familia de curvas características de salida
- Para que haya corriente es necesario comunicar eléctricamente S y D
- Habitualmente el volumen del dispositivo (B) se conecta a la fuente (S), quedando sólo tres terminales independientes en el dispositivo
- En ellos se verifican las L.K.: $I_D = I_S$

$$V_{DS} - V_{GS} = V_{DG}$$

TEMA 5: TRANSISTORES

- Familia de curvas características de salida y regiones de funcionamiento



– $V_{GS} < V_T \Rightarrow$ corte: $i_D = 0$; $V_{GS} > V_T$ (tensión umbral) \Rightarrow “canal” de carga \Rightarrow conducción

– Regiones de conducción:

- Óhmica ($V_{DS} < V_{GS} - V_T$): comportamiento resistivo controlado por tensión

$$i_D = K[2(v_{GS} - V_T)v_{DS} - v_{DS}^2]$$

- De saturación ($V_{DS} > V_{GS} - V_T$): comportamiento de fuente de corriente dep.

$$i_D = K(v_{GS} - V_T)^2$$

Se debe a la estrangulación del canal en el drenador cuando $V_{DS} = V_{GS} - V_T$

TEMA 5: TRANSISTORES

- **Símbolos y terminales (dispositivos de empobrecimiento o vaciamiento)**
 - Su funcionamiento es análogo al de enriquecimiento, pero se construyen con un canal que comunica drenador y fuente $\Rightarrow i_D > 0$ con $V_{GS} = 0$
 - La aplicación de $V_{GS} \neq 0$ hace aumentar o disminuir la anchura del canal ya presente

