

# Tema 6. Transistores

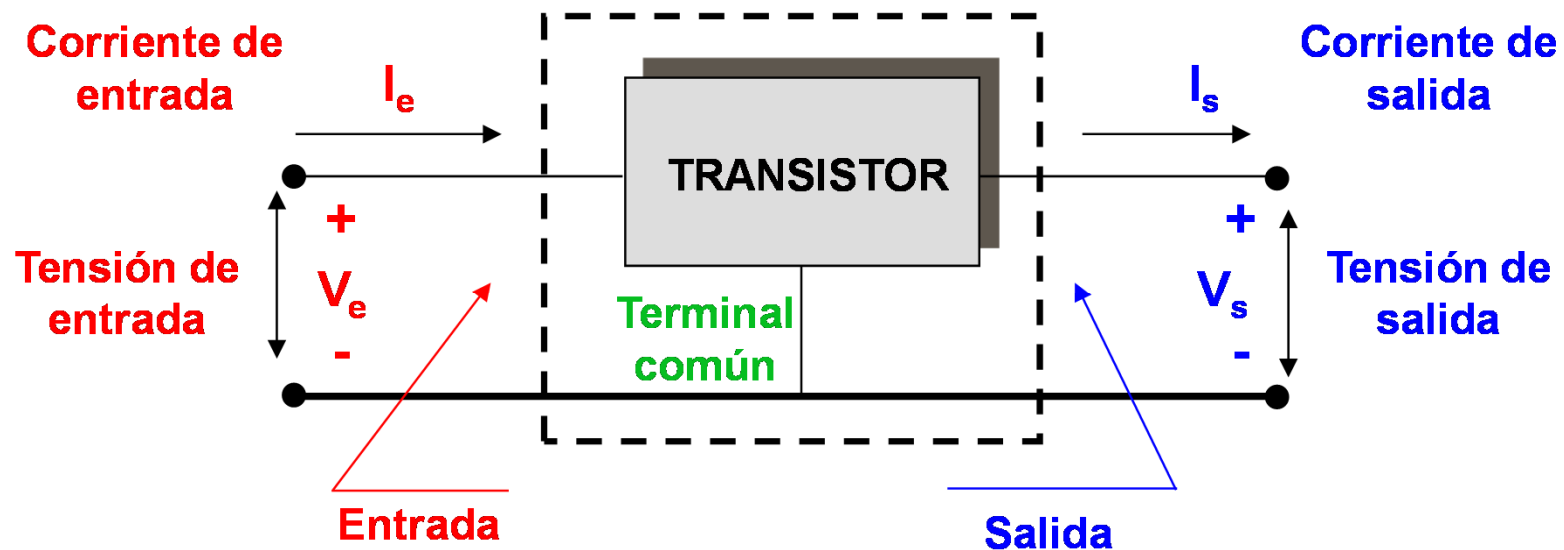
# Índice

Transistor Bipolar de Unión (BJT)

Transistor de Efecto Campo (FET)

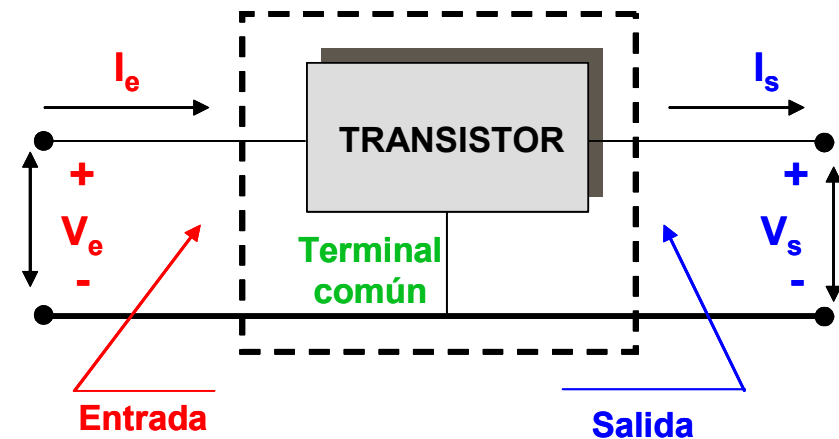
# Transistores

- Es un **dispositivo electrónico de 3 terminales**, por lo que entre ellos hay 6 variables eléctricas de interés: **tres corrientes y tres tensiones**. Pero conociendo dos corrientes se puede calcular la tercera (ley de los nudos), y conociendo dos tensiones se calcula la tercera (ley de las mallas).
- Se toma un terminal común, por lo que se forma un **cuadripolo**: una “caja” caracterizada por una **corriente de entrada**, una **tensión de entrada**, una **corriente de salida** y una **tensión de salida**.



# Curvas características del transistor

- ✓ Existe una curva característica para el circuito de entrada (**característica de entrada, corriente de entrada frente a tensión de entrada  $I_e-V_e$** ) y otra para el circuito de salida (**característica de salida, corriente de salida frente a tensión de salida  $V_s-I_s$** ) para cada una de las configuraciones del transistor.
- Sin embargo, dado que existen cuatro variables, dos de entrada  $V_e, I_e$ , y dos de salida,  $V_s, I_s$  para cada configuración, y que lo que ocurre en la entrada puede afectar a la salida y viceversa, las curvas características del transistor suelen incluir una nueva dependencia:
  - **ENTRADA:**  $I_e = f_1'(V_e, V_s)$ , es decir, corriente de entrada  $I_e$  como función de la tensión de entrada  $V_e$ , para varias tensiones de salida  $V_s$
  - **SALIDA:**  $I_s = f_2(V_s, I_e)$ , corriente de salida  $I_s$  como función de la tensión de salida  $V_s$ , para varias corrientes de entrada  $I_e$ .

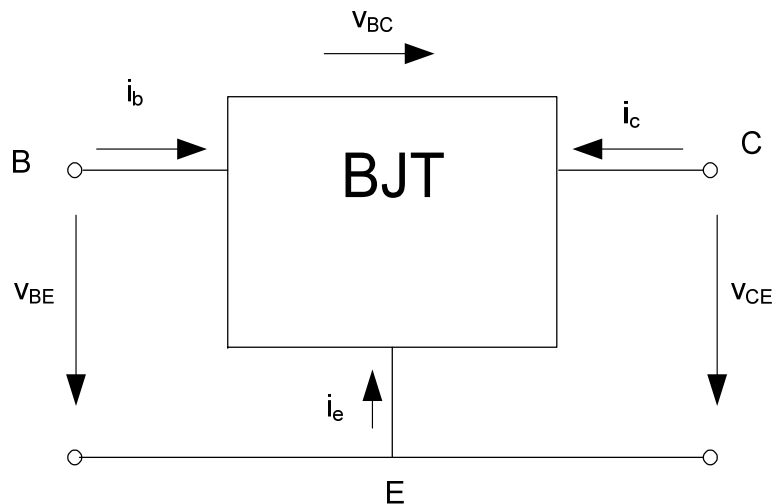


# Transistores. Familias principales

## Descripción básica de su funcionamiento:

**BJT (Transistor Bipolar de Unión):**  
 Fuente de corriente (salida)  
 controlada por corriente (entrada).  
*Ganancia de corriente ( $\beta$  ó  $h_{FE}/h_{fe}$ ).*

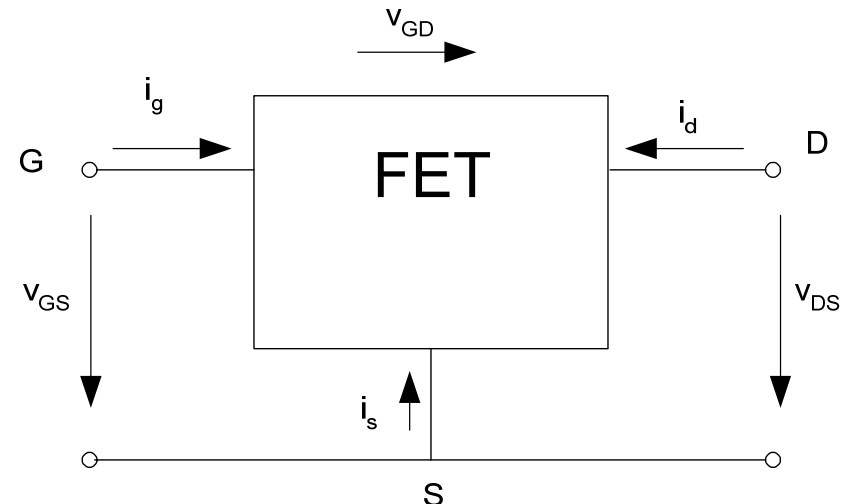
**Terminales:** Base, Emisor y  
 Colector.



J. Bardeen, W.H. Brattain, y W. Shockley, 1948

**FET (Transistor de Efecto Campo):**  
 Fuente de corriente (salida)  
 controlada por tensión (entrada).  
*Transconductancia ( $g_m$ ).*

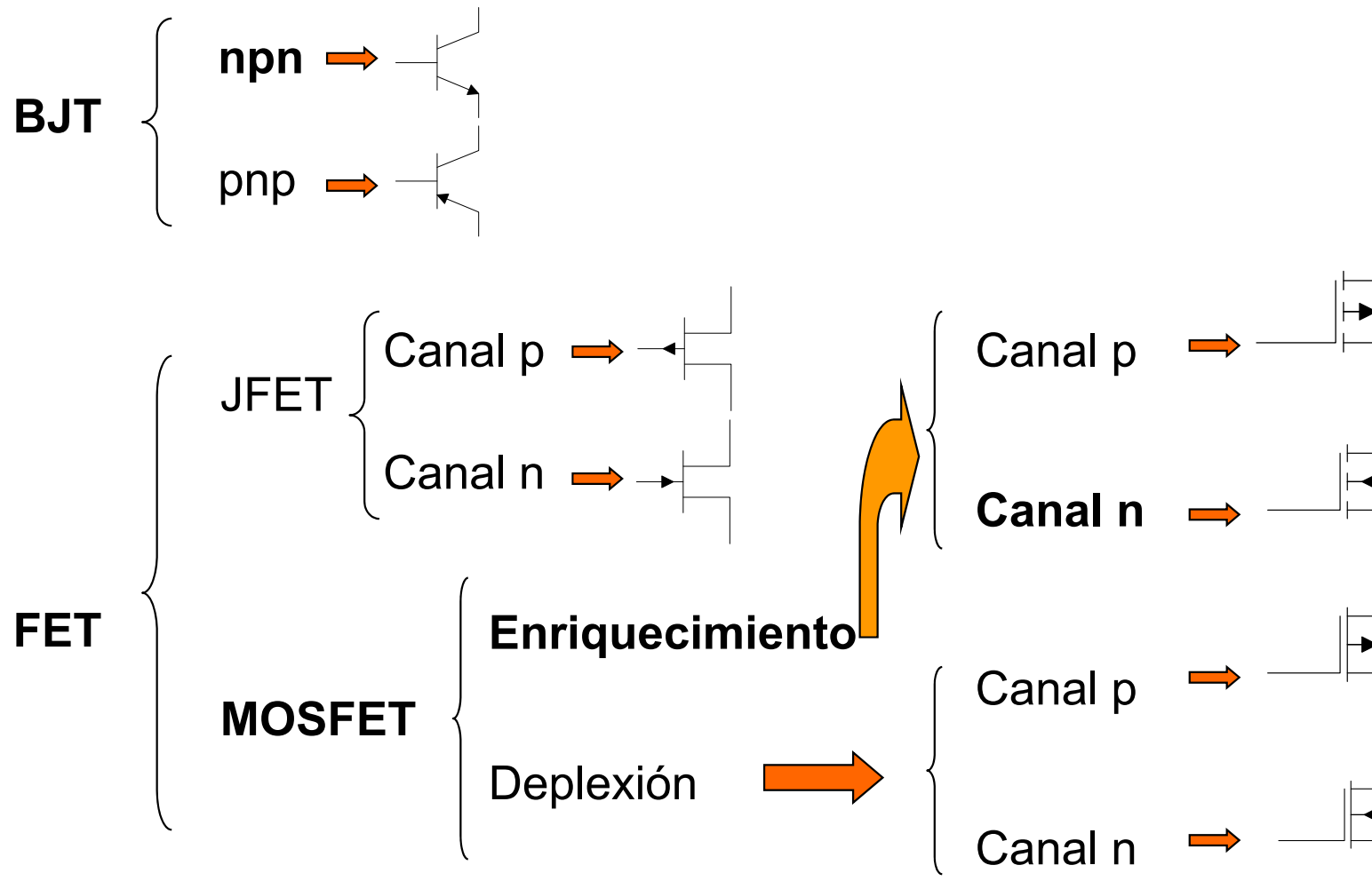
**Terminales:** Puerta, Drenador y  
 Fuente.



W. Shockley, 1952

# Transistores. Tipos

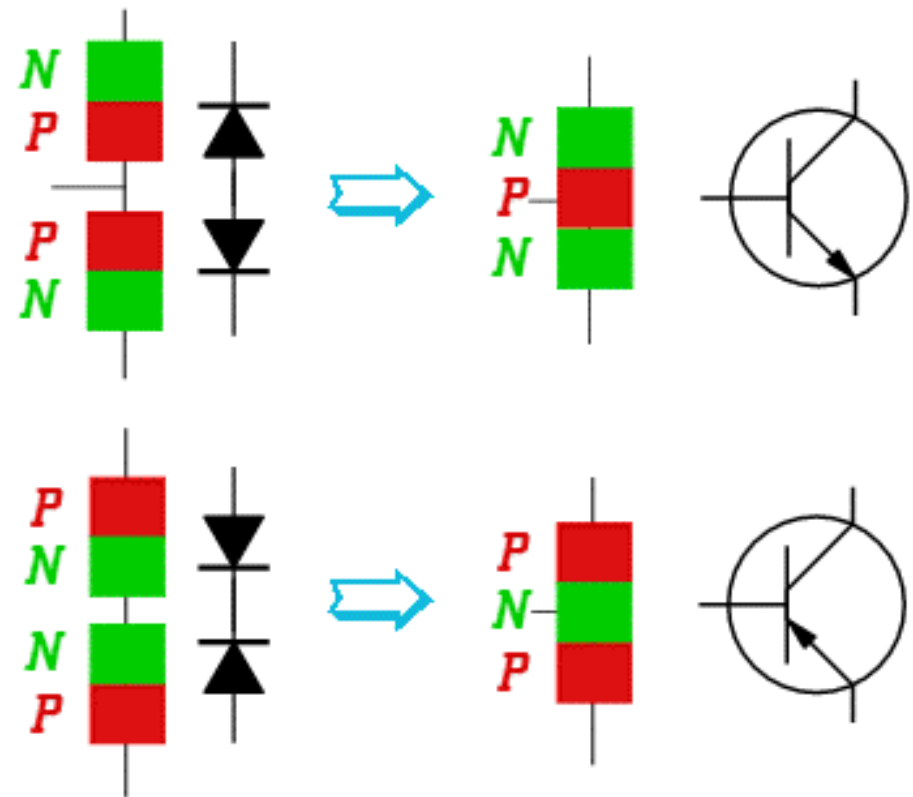
Tipos de transistores en las dos familias principales (BJT y FET)



## Transistor Bipolar de Unión. Tipos.

- Dispositivo electrónico fabricado usando **semiconductores**.
- Se denomina de unión porque está formado por **dos uniones p-n interrelacionadas entre sí** (por eso un transistor NO es lo mismo que dos diodos)
- Se añade el adjetivo **bipolar** ya que en su funcionamiento **intervienen dos tipos de portadores**: electrones y huecos, de cargas opuestas.
- A veces se le denomina **BJT**, de sus iniciales en inglés (**Bipolar Junction Transistor**)

### Tipo de transistor y símbolo circuital

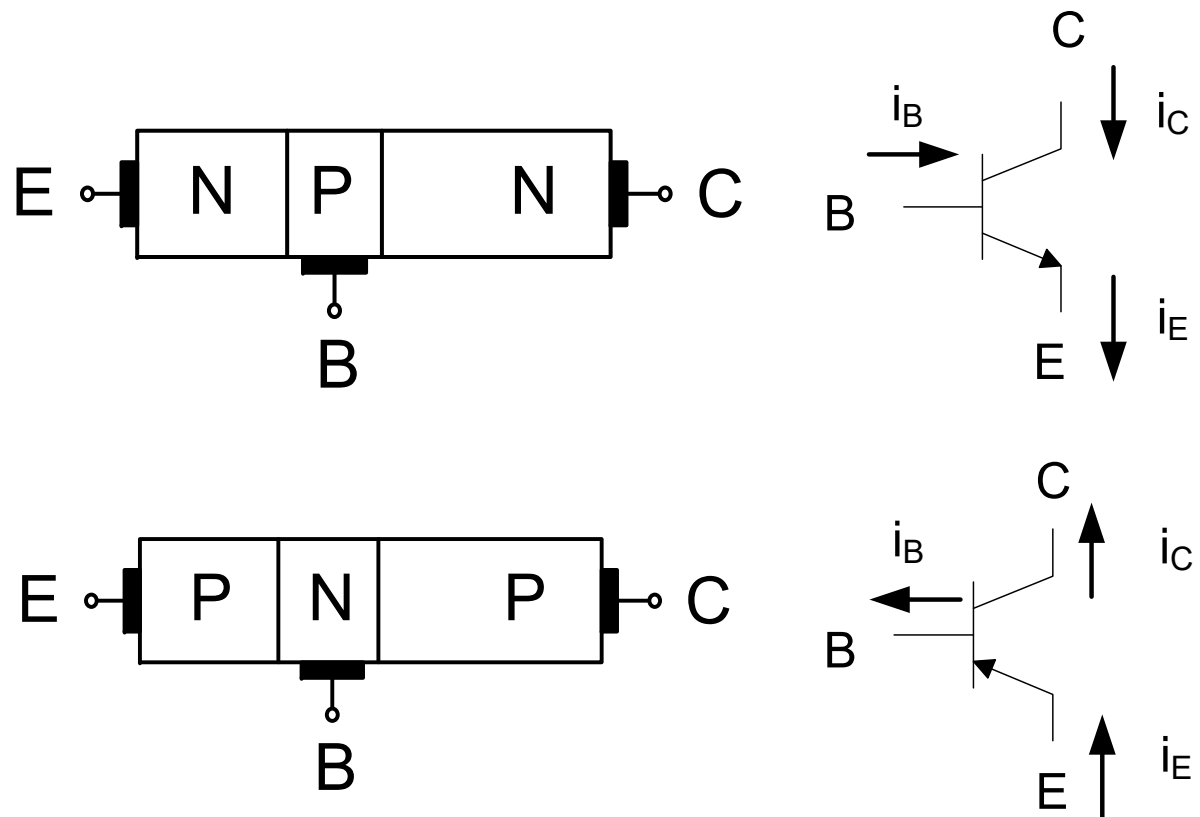


# Transistor Bipolar de Unión. BJT.

Estructura y símbolo circuital del transistor. Tipos: NPN y PNP

**Terminales:** Se denominan **Base**, **Emisor** y **Colector**. El emisor y el colector no son intercambiables (componente **asimétrico**).

- El **emisor y el colector**, aunque tienen el mismo TIPO de dopaje (los dos P o los dos N), en la práctica el **emisor está mucho más dopado que el colector**: por ello a veces se usa la notación **N<sup>+</sup>PN** o **P<sup>+</sup>NP**.
- La **base**, en general, es una zona **poco dopada y muy estrecha**, lo que **permite la interrelación** de ambas uniones p-n





# Transistor Bipolar de Unión. BJT.

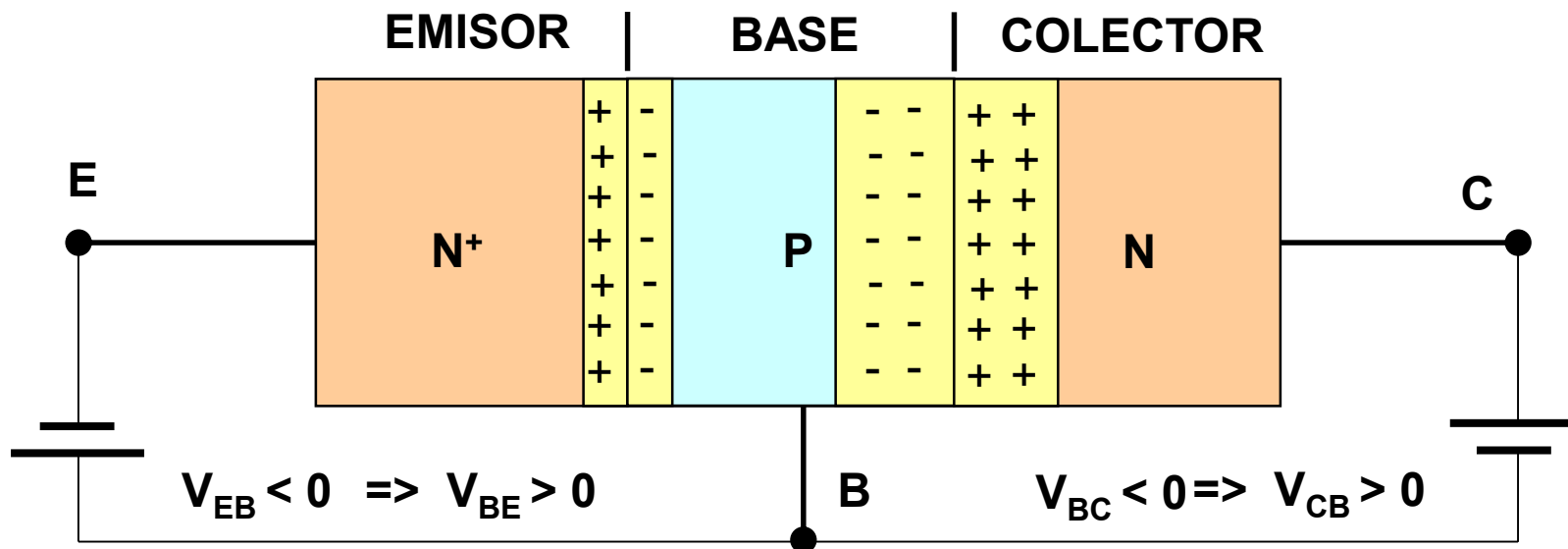
- Una unión p-n tiene dos modos de operación: **polarización directa** (conducción) o **polarización inversa** (corte).
- Ahora, en el transistor bipolar y debido a que existen dos uniones, **los modos o regiones de operación son cuatro** y reciben una nomenclatura característica:

Unión E-B	Unión C-B	Modo o región
<i>Directa</i>	<i>Inversa</i>	<i>Activa o activa directa</i>
<i>Directa</i>	<i>Directa</i>	<i>Saturación</i>
<i>Inversa</i>	<i>Inversa</i>	<i>Corte</i>
<i>Inversa</i>	<i>Directa</i>	<i>Inversa o activa inversa</i>

- ✓ En aplicaciones de **amplificación** (**electrónica analógica**) se utiliza el transistor en **activa directa**. En **electrónica digital** el transistor conmuta entre **corte y saturación**. La región inversa apenas se utiliza.

## El transistor bipolar NPN en activa directa

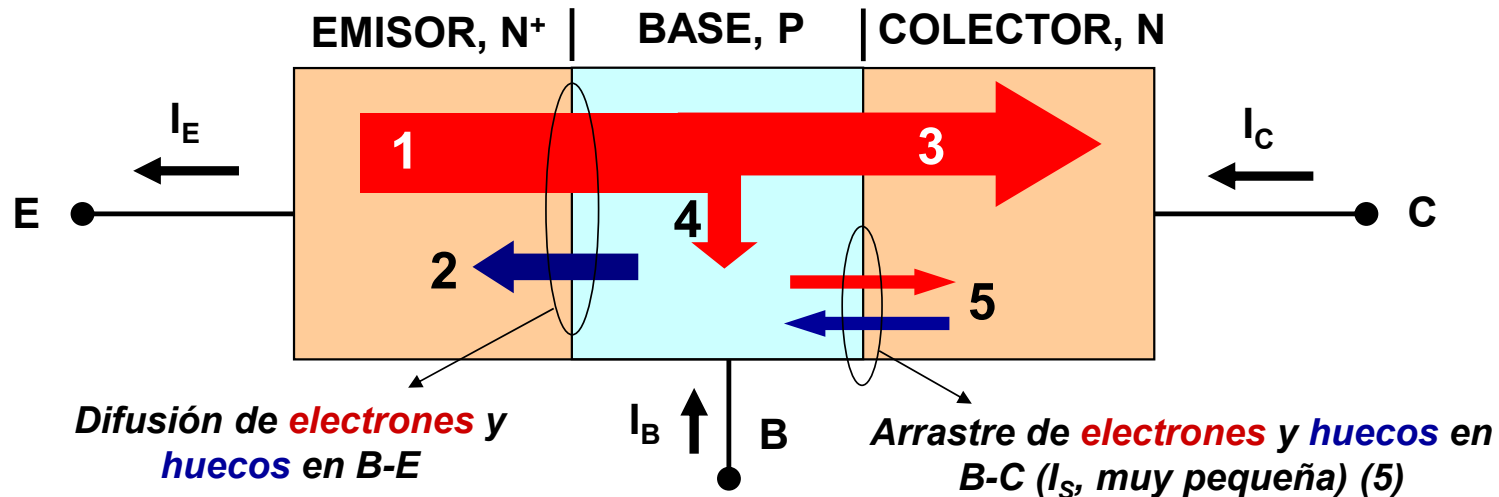
- Para **operar el NPN en modo de activa directa** (B-E en directa y B-C en **inversa**), se necesita más tensión en la base (tipo P) que en el emisor (tipo N), y más tensión en el colector (tipo N) que en la base (tipo P).



- Como la tensión en la base (P) es superior a la tensión en el emisor (N<sup>+</sup>),  $V_{BE} = V_B - V_E > 0$ . Con respecto a la unión B-C,  $V_{BC} < 0$
- Para polarizar el transistor PNP en activa directa **las tensiones serían justamente las opuestas.**

## El transistor bipolar NPN en activa directa

- En el **transistor NPN en activa directa** el emisor (muy dopado, tipo N) inyecta muchos electrones en la base (1). Como la base es muy delgada, la mayor parte de ellos (3) alcanzan el colector.



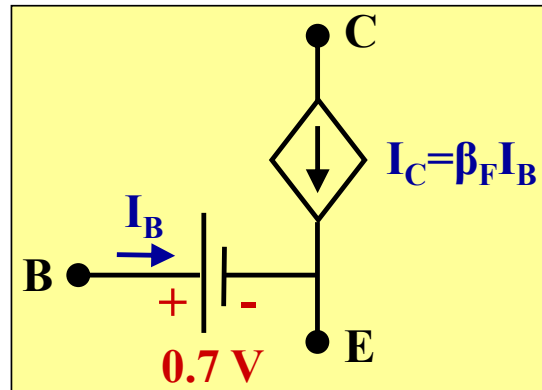
- La cantidad de electrones que pasan del emisor hasta el colector (flujo elevado, es decir, corriente elevada) **se controla mediante la corriente que entra por la base** (corriente pequeña), con  $I_C = \beta \cdot I_B$ . Por eso se dice que el **BJT es un dispositivo amplificador**.
- Recordemos que un flujo de electrones en un sentido es equivalente a una corriente en sentido contrario (carga negativa). Por ello, **las corrientes  $I_E$  e  $I_C$  son contrarias al flujo de electrones** (ver sentido en la figura).

## Modelos del transistor NPN en cada zona de funcionamiento

- Zona Activa:** Unión Base-Emisor polarizada en directa.

$$V_{BE} \approx 0,7$$

$$V_{CB} < 0.7$$



$$i_C = \beta \cdot i_B$$

$$i_E = i_C + i_B$$

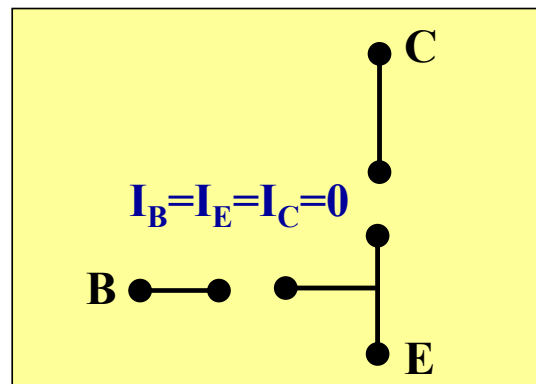


En activa directa el transistor se usa en aplicaciones de Amplificación

- Zona de Corte:** Ambas uniones (Base-Emisor y Base-Collector) polarizadas en inversa. No hay corriente (interruptores abiertos)

$$V_{BE} < 0,7$$

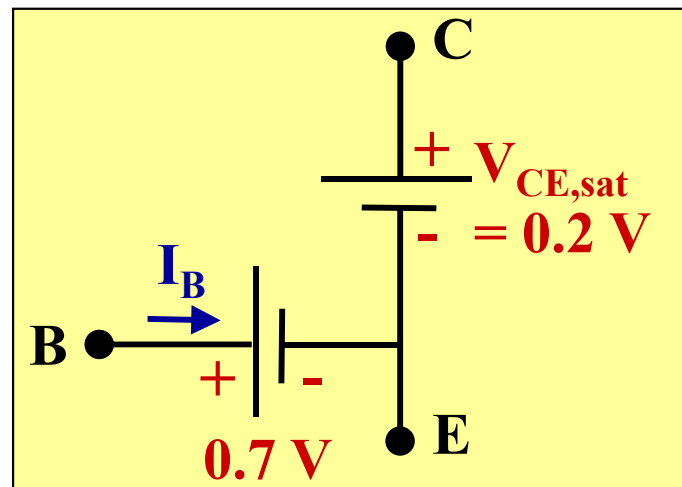
$$V_{CB} < 0.7$$



En corte el transistor se asemeja a un interruptor abierto

## Modelos del transistor NPN en cada zona de funcionamiento

✓ **Zona de Saturación:** Unión Base-Emisor polarizada en directa. Unión Base-Colector ahora también polarizada directamente (aunque a una tensión un poco menor). La corriente de colector  $i_c$  depende del circuito externo.



$$I_C < \beta I_B$$

$$I_E \approx I_C$$

→ En saturación  
 transistor se asemeja a  
 un interruptor cerrado

✓ **Zona de activa inversa:** Unión Base-Emisor polarizada inversamente. Base-Colector polarizada directamente. Es como la zona activa, pero sólo mueve los electrones de fugas, no los mayoritarios. Transistor “muy malo”.

# Transistores bipolares de unión. BJT NPN.

## Tabla Resumen de las zonas de funcionamiento.

Unión BE	Unión BC	Estado	
Directa	Inversa	Activa	$i_E = i_B + i_C; V_{BE} = 0,7V; i_C = \beta \cdot i_B$
Directa	Directa	Saturación	$i_C < \beta \cdot i_B; V_{CE} \approx 0,2V$
Inversa	Inversa	Corte	$i_B = 0; i_C = 0$
Inversa	Directa	Activa inversa	<b>No se utiliza</b>

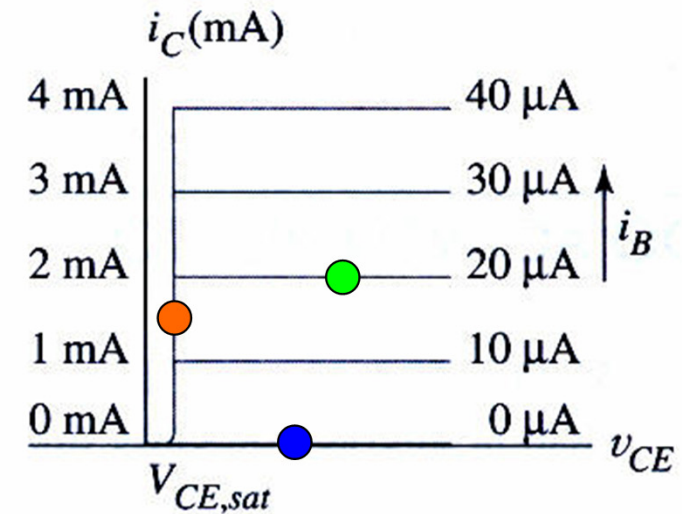
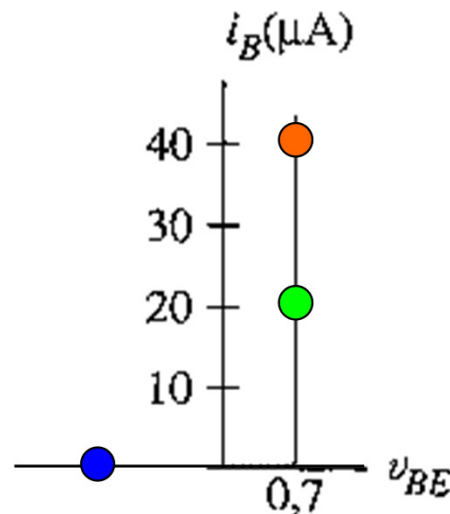
# Punto de trabajo del transistor bipolar

- El **punto de trabajo de un transistor bipolar**, o punto Q está formado por el conjunto de tensiones y corrientes de entrada y de salida que lo sitúan en un punto concreto de las características (y por ello, en un modo de operación determinado).
- Por ejemplo, para un *NPN* necesitamos  $V_{BE}$ ,  $I_B$ ,  $V_{CE}$  e  $I_C$ :

● **Punto Q en activa directa**

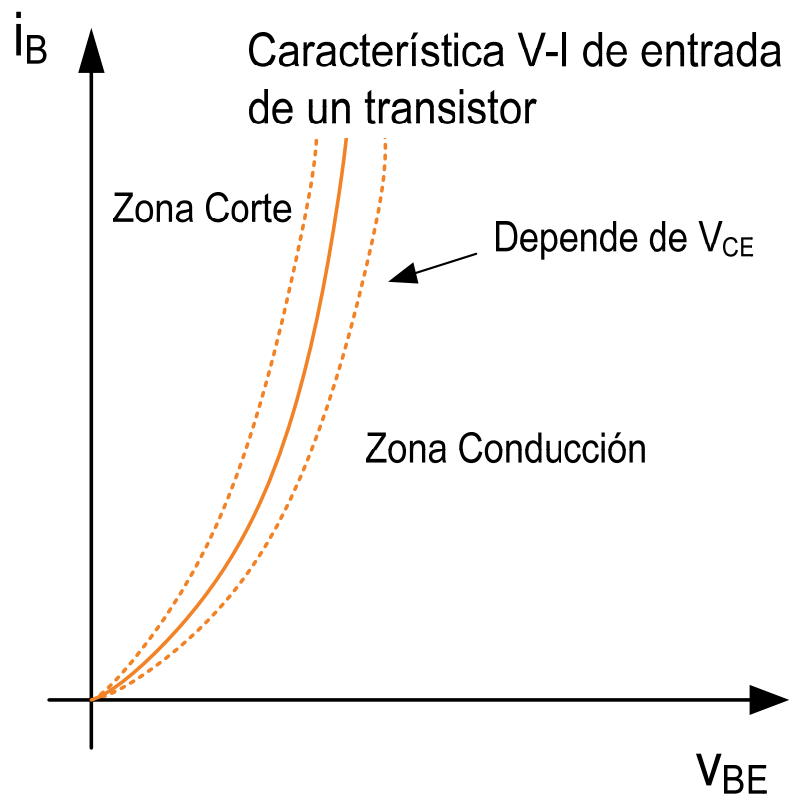
● **Punto Q en saturación**

● **Punto Q en corte**

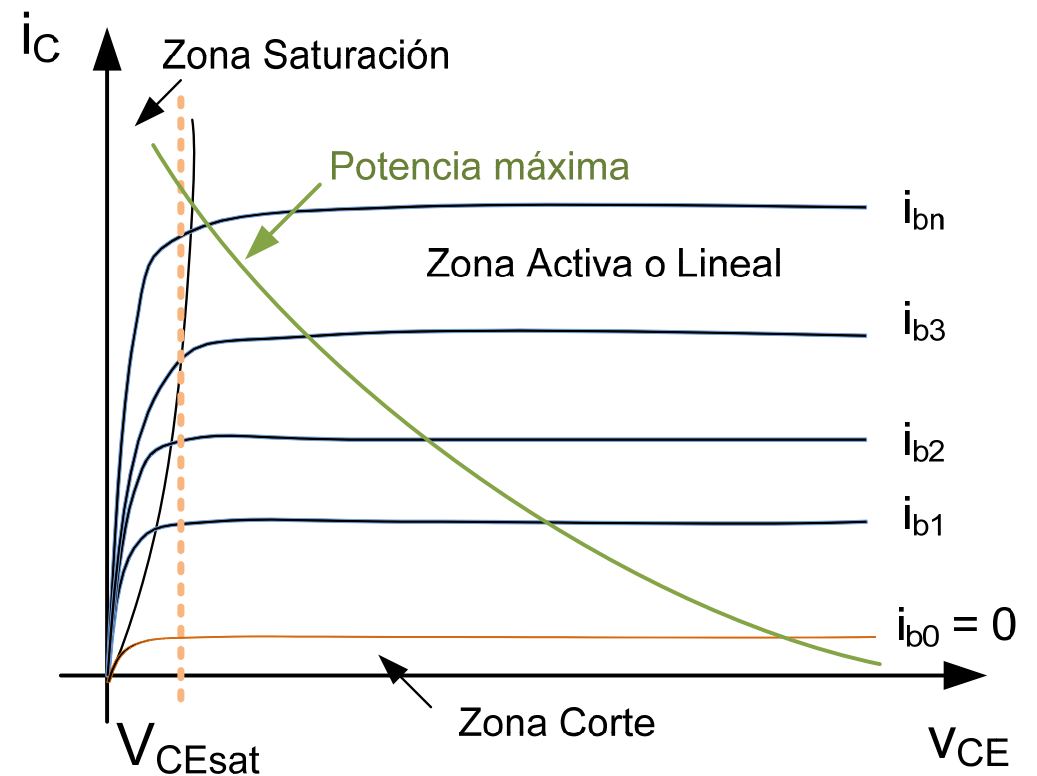


# Curvas características del transistor BJT NPN.

## Característica I-V de entrada



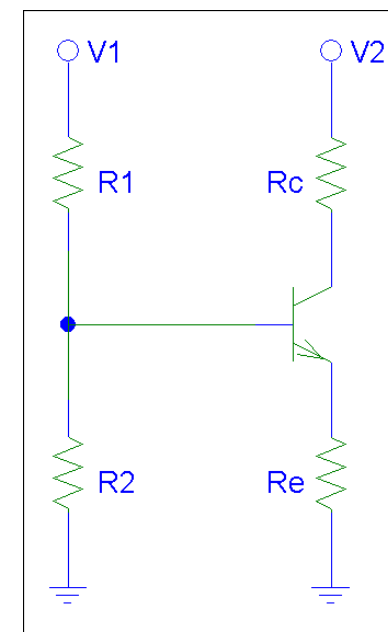
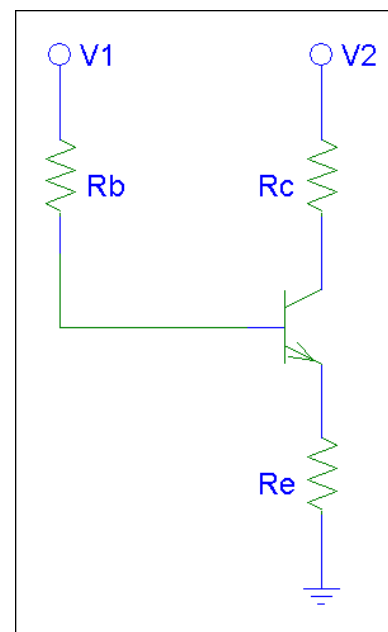
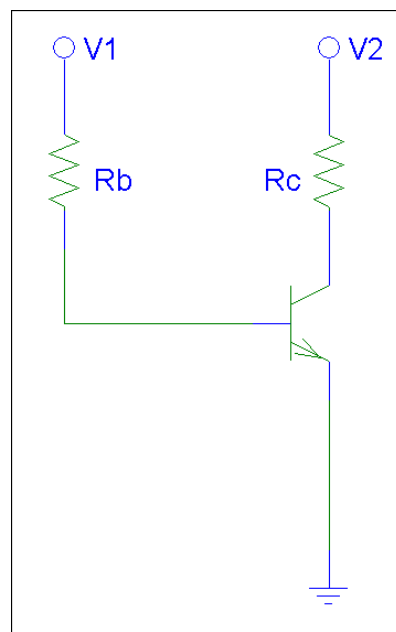
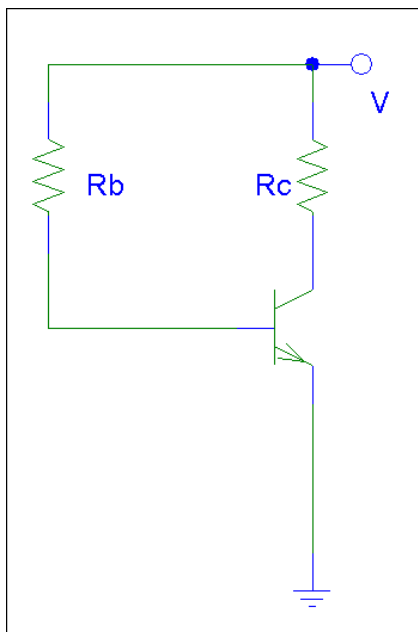
## Característica I-V de salida





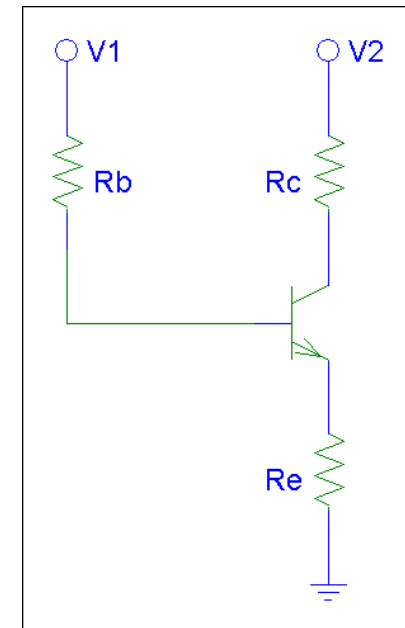
# Polarización del transistores bipolar

- Polarizar un transistor es lo mismo que seleccionar un punto de trabajo del transistor, en un modo o región de funcionamiento adecuado, y con unos valores de tensiones y corrientes determinados.
- El circuito de polarización del transistor es el conjunto estructurado de resistencias y fuentes de tensión o de corriente necesarias para conseguir la polarización del transistor.
- ✓ Existen muchos circuitos de polarización. Los más habituales son:



# Polarización del transistores bipolar

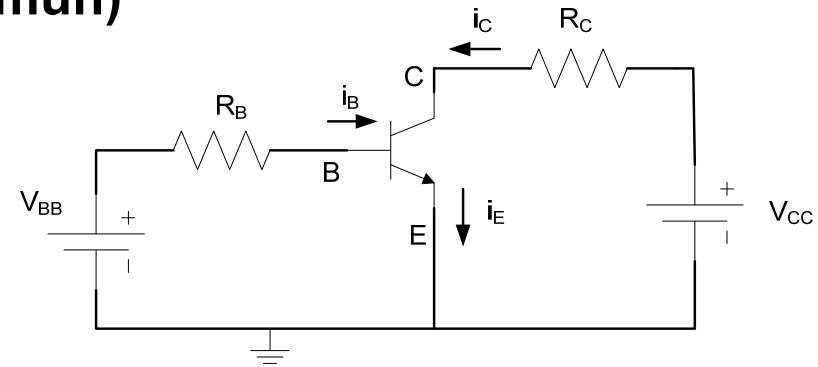
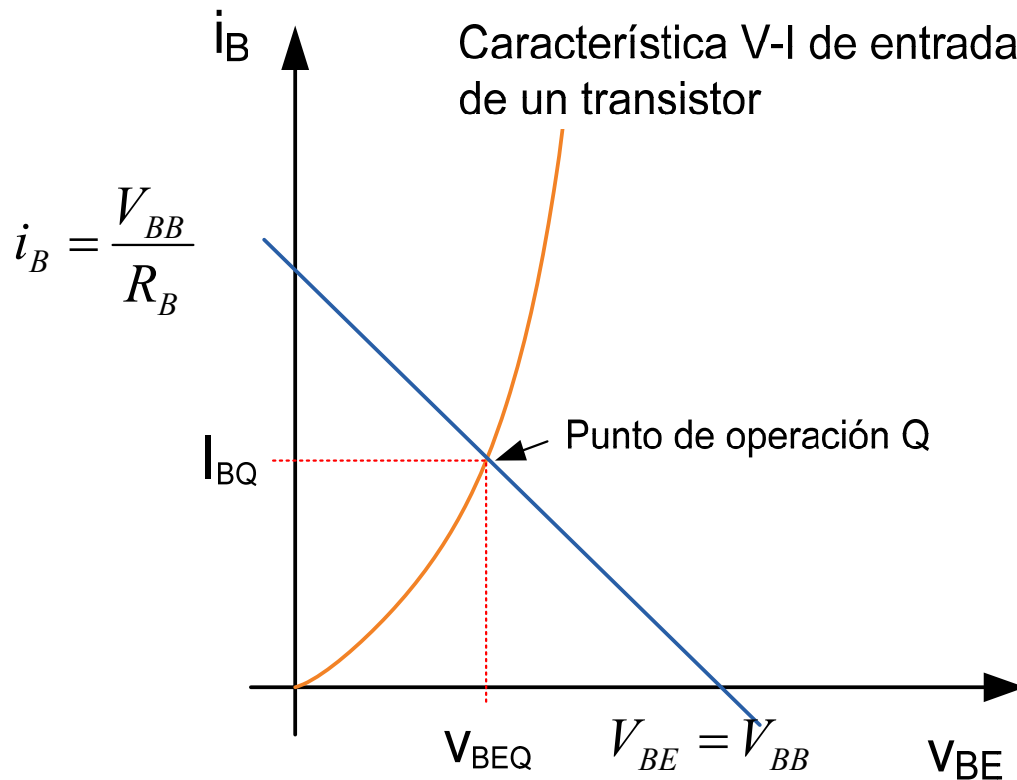
- **Diseñar o calcular el circuito de polarización** consiste en elegir una estructura de polarización y en seleccionar los valores de las resistencias y de las fuentes de tensión o corriente para lograr un punto de trabajo definido, que satisfaga unas condiciones determinadas.
- **Analizar un circuito de polarización** es lo contrario: hallar el punto de trabajo de un circuito ya especificado.
- ✓ En **electrónica digital**, la polarización del transistor casi siempre se elige para permitir que el transistor se encuentre en corte o en saturación. Además, cambiando las tensiones de entrada se debe lograr que el transistor conmute entre dichos modos de operación.
- ✓ En **electrónica analógica**, una de las principales aplicaciones del transistor es la amplificación, es decir, el aumento de la tensión (y/o la corriente) de una señal variable:



- Para amplificar, el punto Q del transistor se debe situar en **activa directa**.

# Transistores bipolares de unión. BJT NPN.

## Polarización. Análisis en CC. (Emisor Común)



$$V_{BB} = i_B \cdot R_B + V_{BE}$$

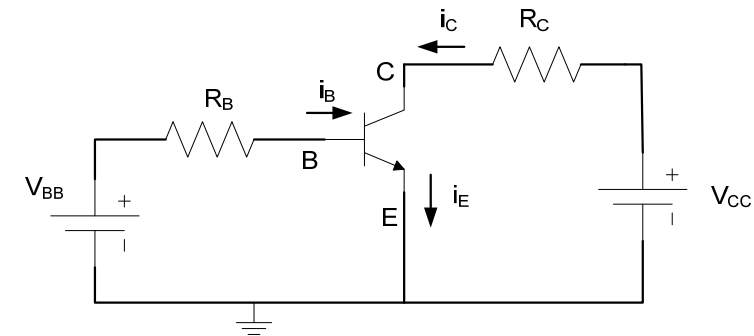
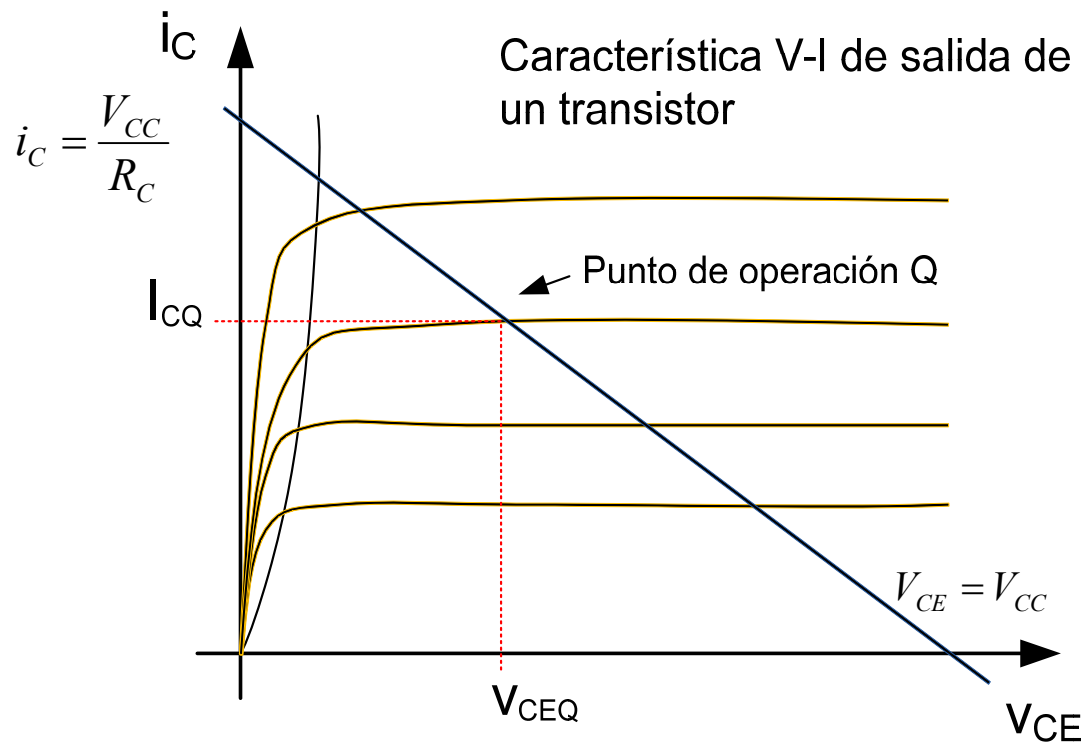
$$V_{BE} = 0 \Rightarrow i_B = \frac{V_{BB}}{R_B}$$

$$i_B = 0 \Rightarrow V_{BE} = V_{BB}$$

- **Pto. de operación.** Intersección de la recta de carga con la curva característica de entrada.

# Transistores bipolares de unión. BJT NPN.

## Polarización. Análisis en CC. (Emisor Común)



$$V_{CC} = i_C \cdot R_C + V_{CE}$$

$$V_{CE} = 0 \Rightarrow i_C = \frac{V_{CC}}{R_C}$$

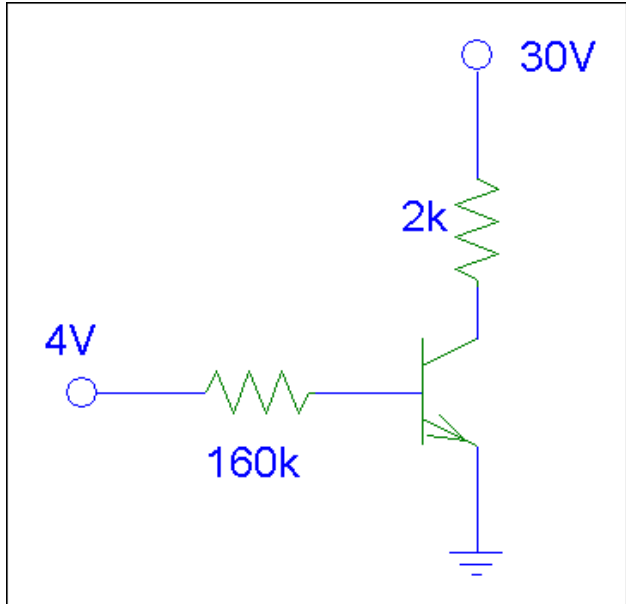
$$i_C = 0 \Rightarrow V_{CE} = V_{CC}$$

- **Pto. de operación.** Intersección de la recta de carga con la curva del valor de  $i_B$  dado por la característica de entrada.

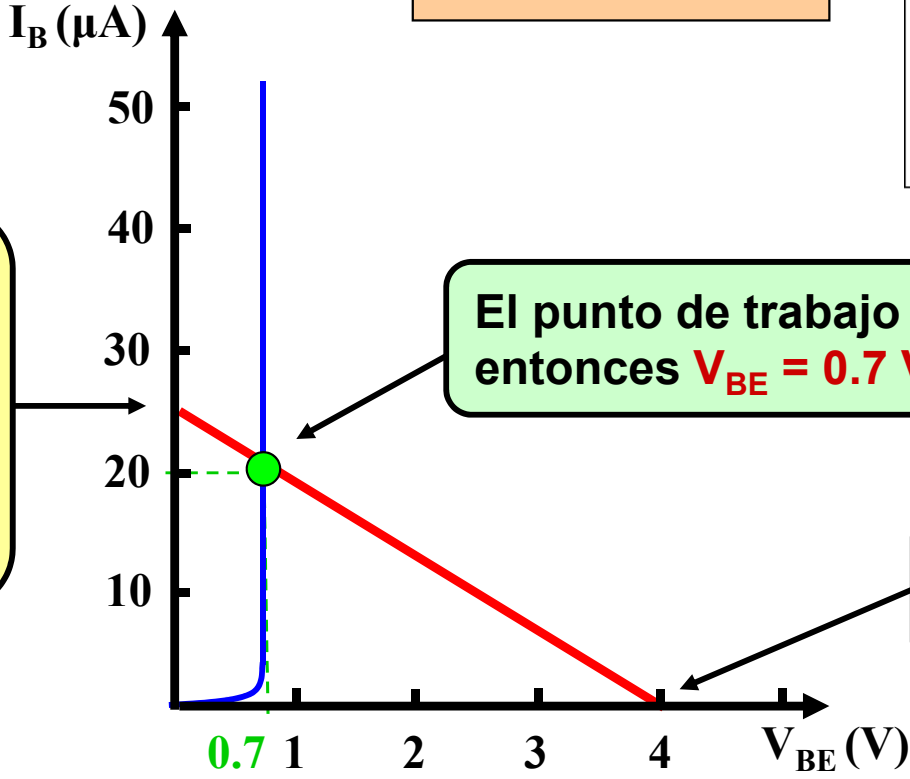
**Ejemplo 1: Calcular gráficamente el punto de trabajo del transistor de la figura, su modo o región de funcionamiento y su  $\beta_F$**

➤ **Recta de carga de entrada:**

$$I_B = \frac{4 \text{ V} - V_{BE}}{160 \text{ k}\Omega}$$



El corte con el eje de corriente es  $V_{BB}/R_B = 4 \text{ V} / 160 \text{ k}\Omega = 25 \mu\text{A}$

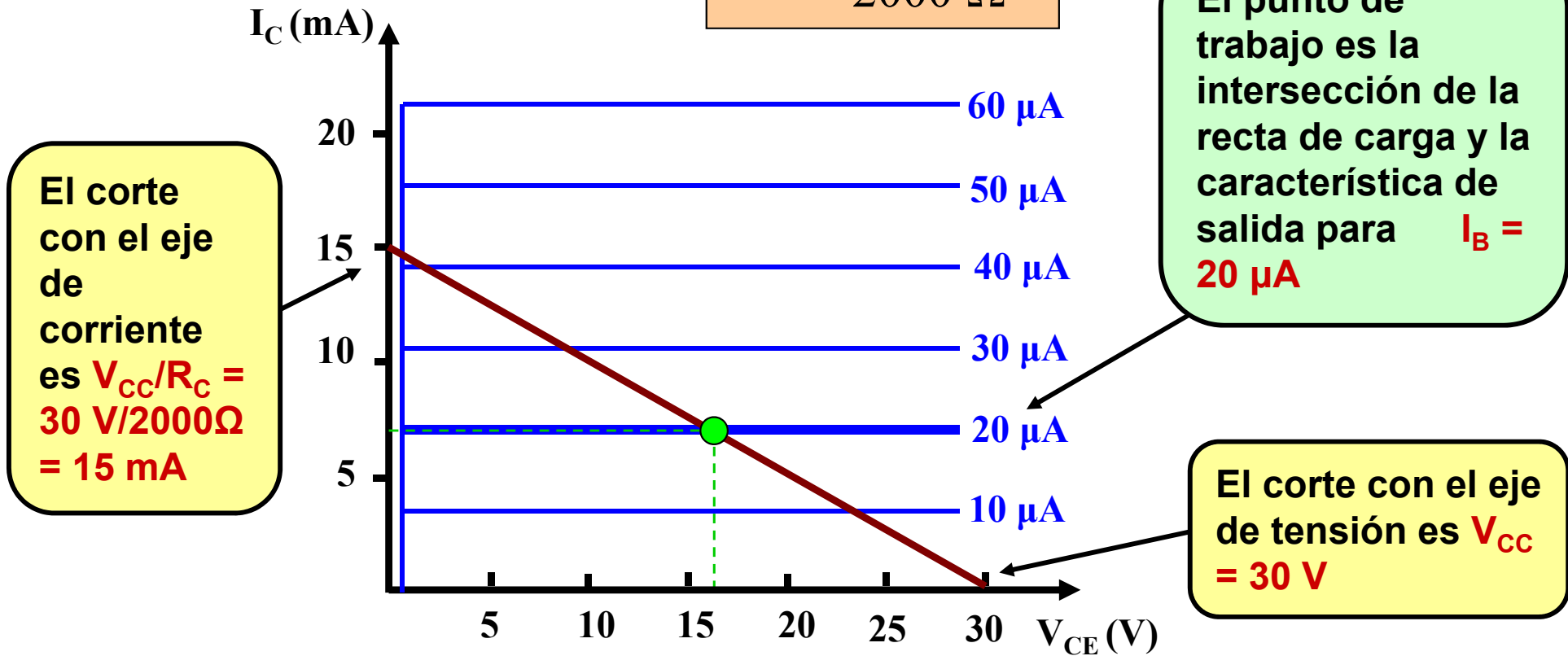


El punto de trabajo en la entrada es entonces  $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$  e  $I_B = 20 \mu\text{A}$

El corte con el eje de tensión es  $V_{BB} = 4 \text{ V}$

➤ La recta de carga de salida es:

$$I_C = \frac{30 \text{ V} - V_{CE}}{2000 \Omega}$$



El corte con el eje de corriente es  $V_{CC}/R_C = 30 \text{ V}/2000\Omega = 15 \text{ mA}$

El punto de trabajo es la intersección de la recta de carga y la característica de salida para  $I_B = 20 \mu\text{A}$

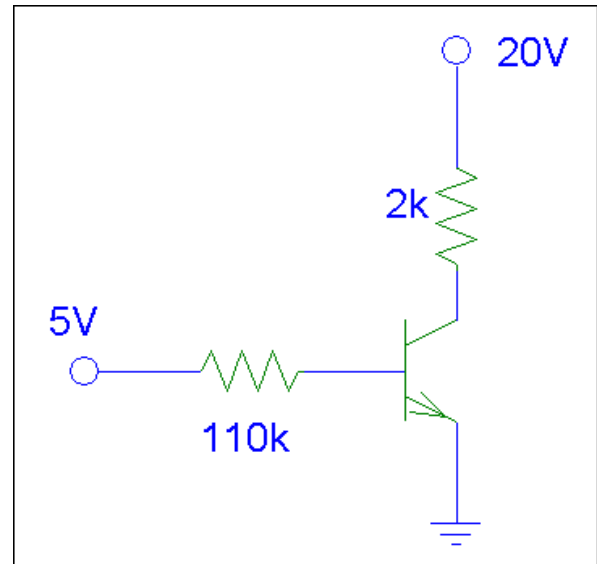
El corte con el eje de tensión es  $V_{CC} = 30 \text{ V}$

- ✓ El transistor está en el **modo de activa directa**. El punto Q en la salida sería de  $V_{CE} = 16.5 \text{ V}$  e  $I_C = 7 \text{ mA}$ , aproximadamente.
- ✓ Como  $\beta_F = I_C / I_B = 7 \text{ mA} / 20 \mu\text{A} = 350$ .

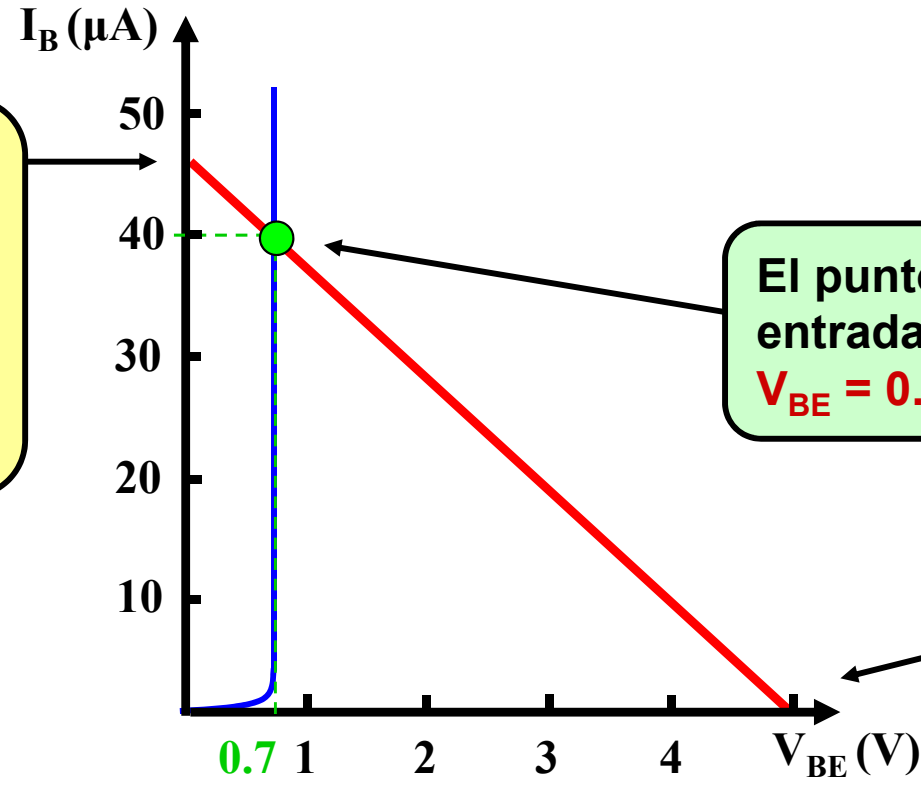
**Ejemplo 2:** Calcular el nuevo punto de trabajo del transistor de la figura y su modo de funcionamiento:

➤ Recta de carga de entrada:

$$I_B = \frac{5 \text{ V} - V_{BE}}{110 \text{ k}\Omega}$$



Con el eje de corriente  
 $V_{BB}/R_B =$   
 $5 \text{ V} / 110\text{k}\Omega$   
 $= 45.5 \mu\text{A}$



El punto de trabajo en la entrada es ahora aprox.  
 $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$  e  $I_B = 40 \mu\text{A}$

El nuevo corte con el eje de tensión es  
 $V_{BB} = 5 \text{ V}$

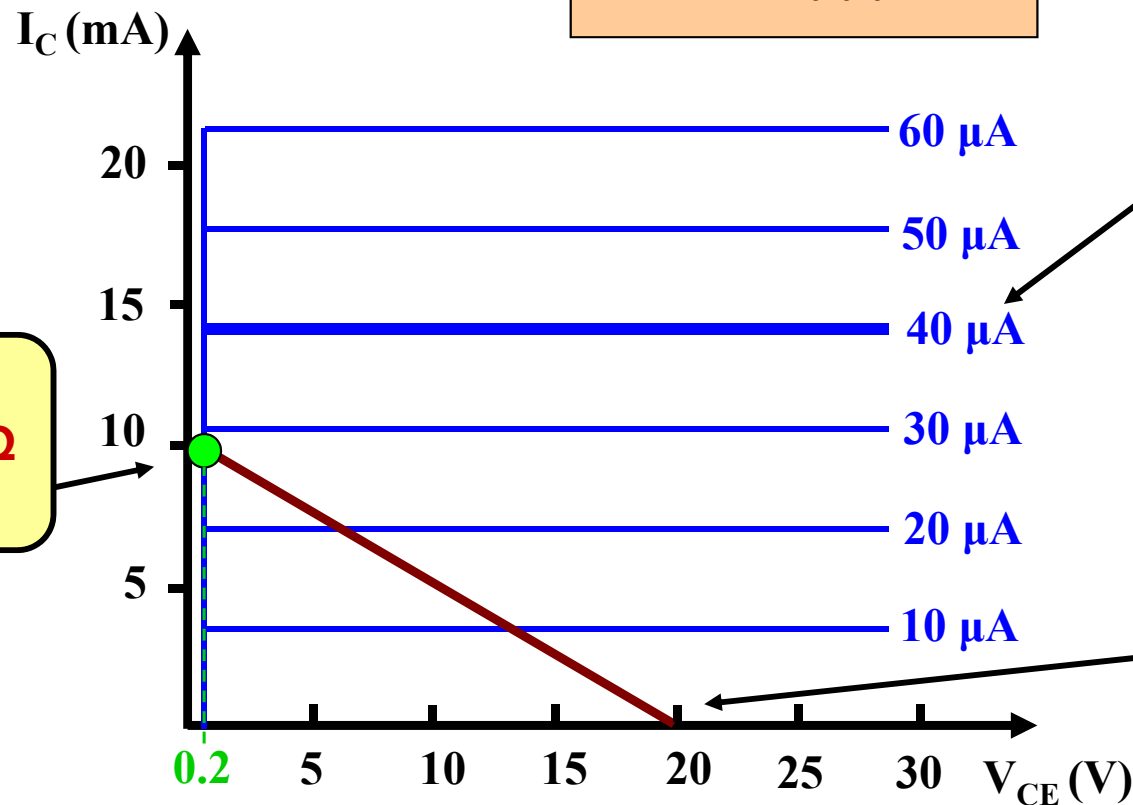
➤ La recta de carga de salida es:

$$I_C = \frac{20 \text{ V} - V_{CE}}{2000 \Omega}$$

Ahora hay que buscar la intersección con la recta de  $I_B = 40 \mu\text{A}$ .

La única posibilidad está en la zona de saturación

$$V_{CC}/R_C = 20 \text{ V}/2000\Omega = 10 \text{ mA}$$



El corte con el eje de tensión es  $V_{CC} = 20 \text{ V}$

✓ El transistor está en el **modo de saturación**. El punto Q en la salida sería de  $V_{CE} = 0.2 \text{ V}$  e  $I_C = 9.8 \text{ mA}$ , aproximadamente.

✓ Ahora se cumple que  $I_{C,sat} < \beta_F \cdot I_B$  ( $9.8 \text{ mA} < 350 \cdot 40 \mu\text{A} = 14 \text{ mA}$ )



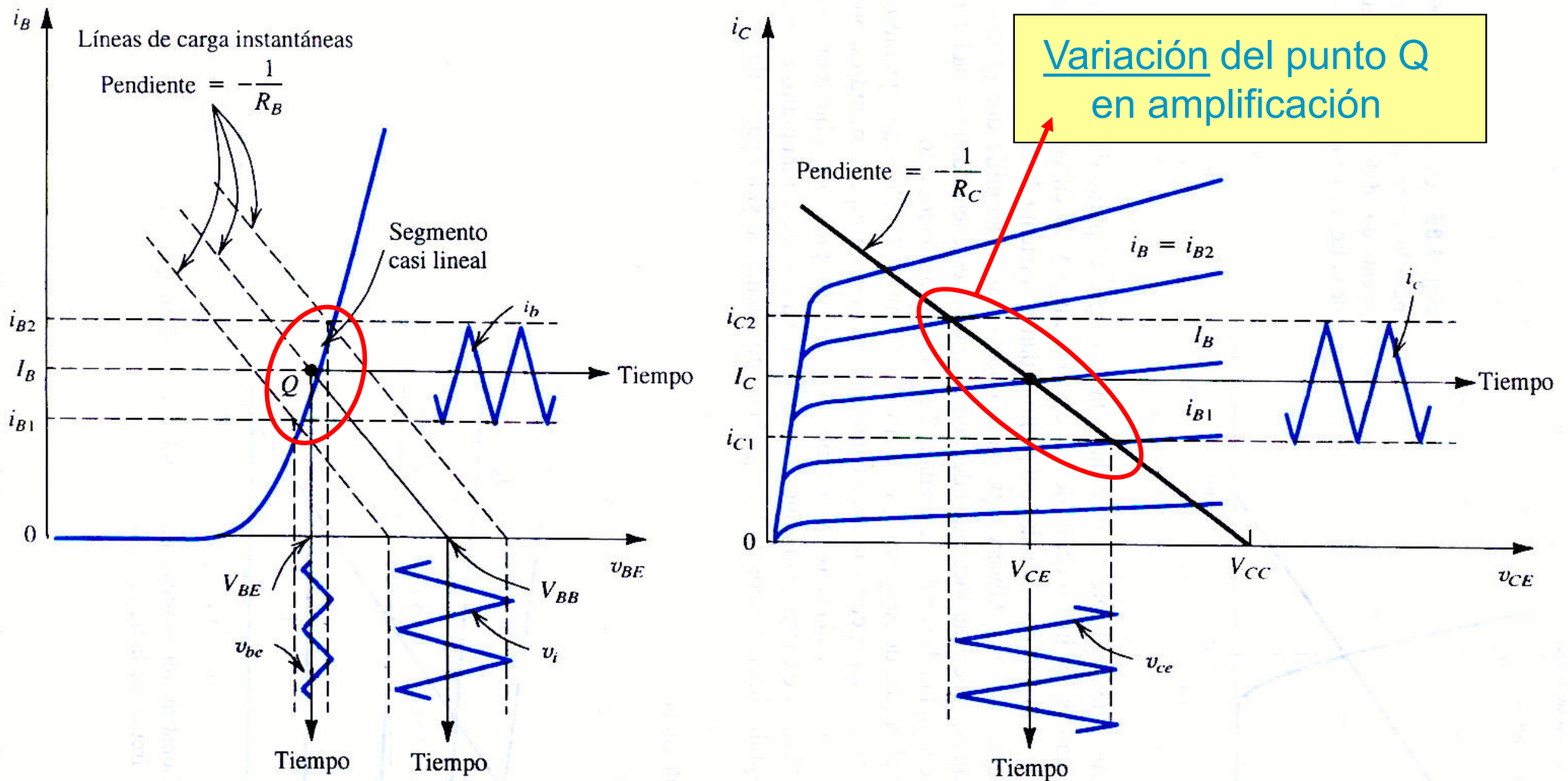
# Transistores bipolares de unión. BJT.

## Características de un transistor BJT real

- Sus características **varían con la temperatura**.
- La  $\beta$  **varía mucho de un transistor a otro** aún dentro de la misma familia.
- La curva característica de salida **no es plana en su Zona Lineal**. Además no es totalmente lineal.
- La tensión máxima que soporta un transistor entre terminales es finita. Por encima de ellas se produce la **ruptura del dispositivo**.
- La máxima corriente viene limitada por la **capacidad de disipación de potencia** del componente.
- La existencia de capacidades y resistencia parásitas hacen que la **velocidad de respuesta (frecuencia) del transistor sea limitada**.

# Aplicaciones: amplificadores (inversor)

- Una de las aplicaciones más comunes de los transistores bipolares en electrónica analógica es la de **amplificador de potencia (de tensión y de corriente)**. Para ello se polariza **en activa directa**. ¿Dónde debe estar situado el punto de trabajo Q de salida?



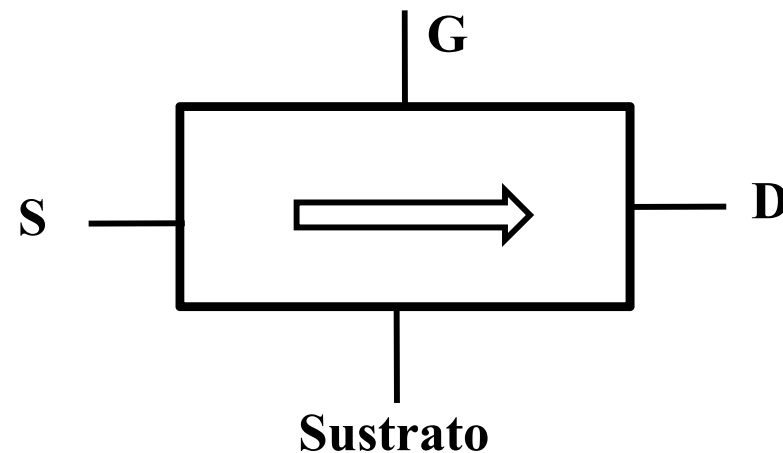
## Transistores de efecto campo (FET)

- A diferencia de los BJT, ahora es **una tensión (es decir, un campo eléctrico)** quien controla el flujo de portadores (corriente) en un canal de conducción.
- Utilizan **sólo un tipo de portador (electrones o huecos)**: por ello se denominan dispositivos unipolares (o monopolares).
- **Resistencia de entrada infinita**. Menor consumo de potencia
- Se emplean en **Electrónica Digital** ya que alcanzan **mayores velocidades de procesamiento que los BJT** (mayor ancho de banda).
- La evolución de los microprocesadores se ha incrementado gracias **mayores densidades de integración en CI** con FETs
- Semejanza entre las ecuaciones y curvas características **de los diferentes tipos de FET (JFET y MOSFET)**

# Transistores de efecto campo. Principio de funcionamiento (FET)

Terminales: Puerta (GATE, G), Drenador (Drain, D) y Fuente (Source, S).

Componente simétrico (entre S y D).



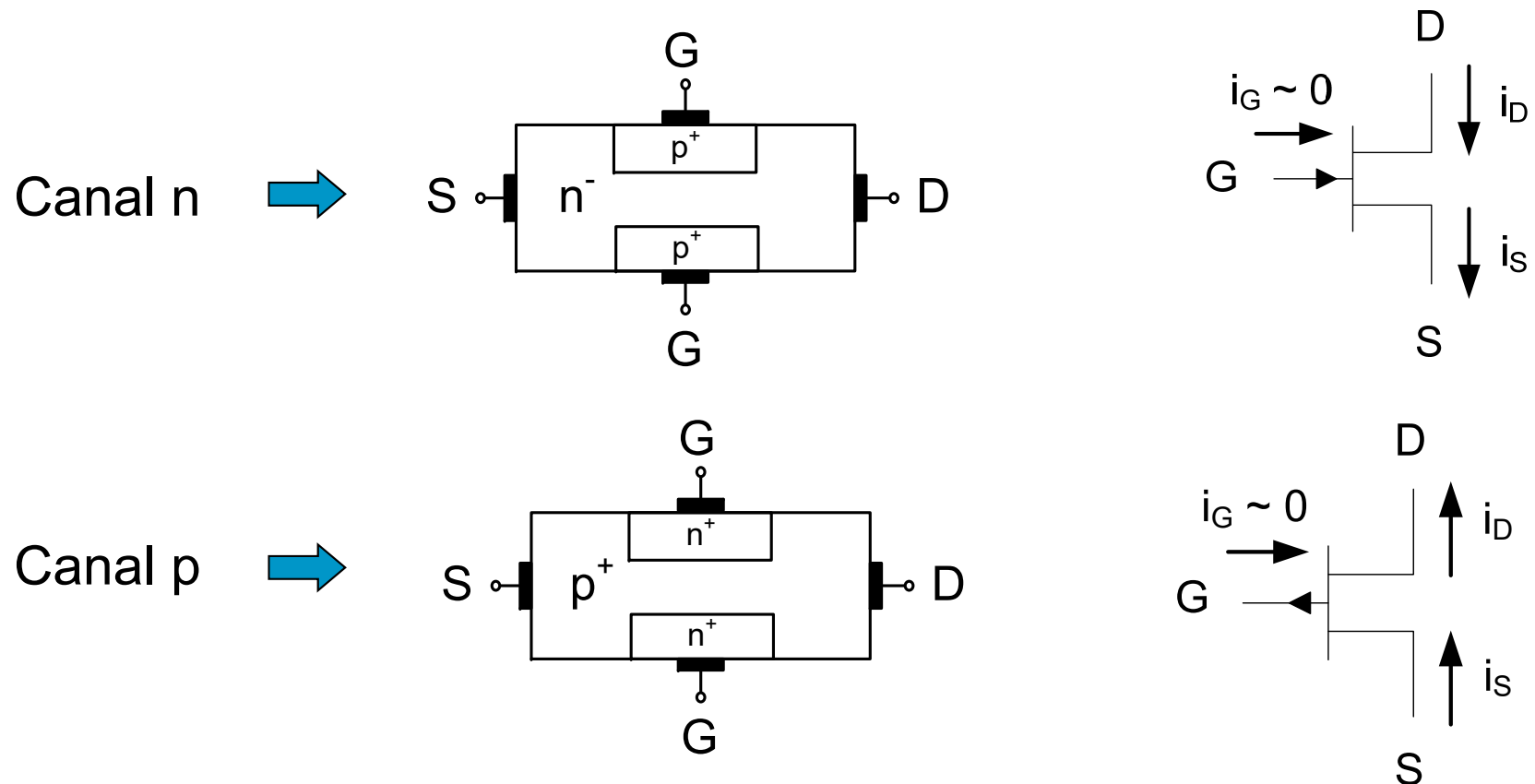
El canal de conducción unipolar (monopolar) regulado por la tensión en G.

El canal puede engrosarse, adelgazarse o incluso desaparecer dependiendo de  $V_{GS}$

# Transistores de efecto campo. JFET.

## Estructura y símbolo del transistor **Junction FET o JFET**

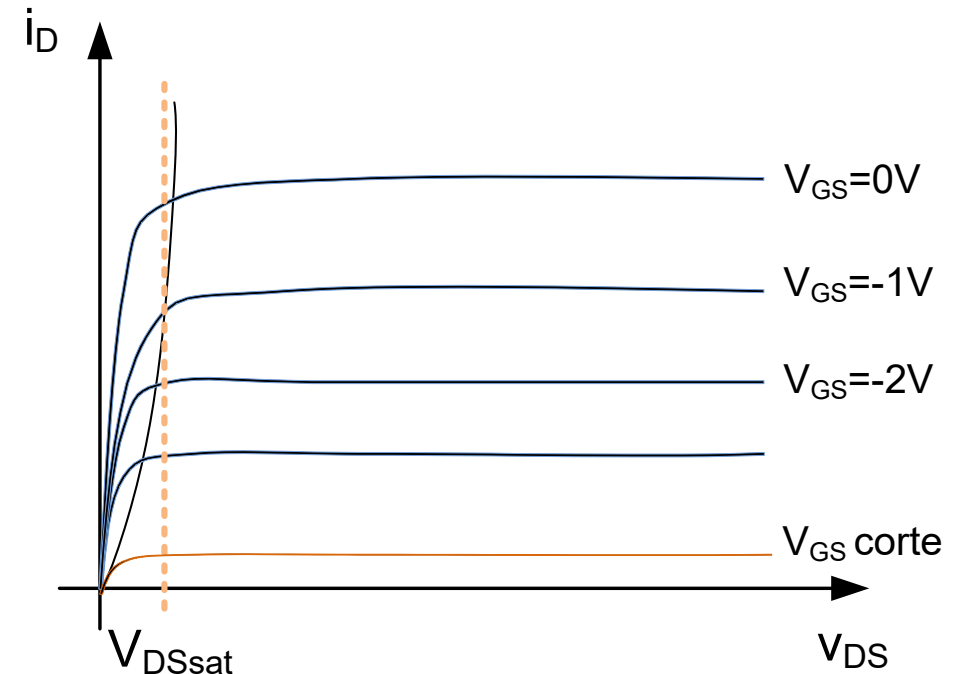
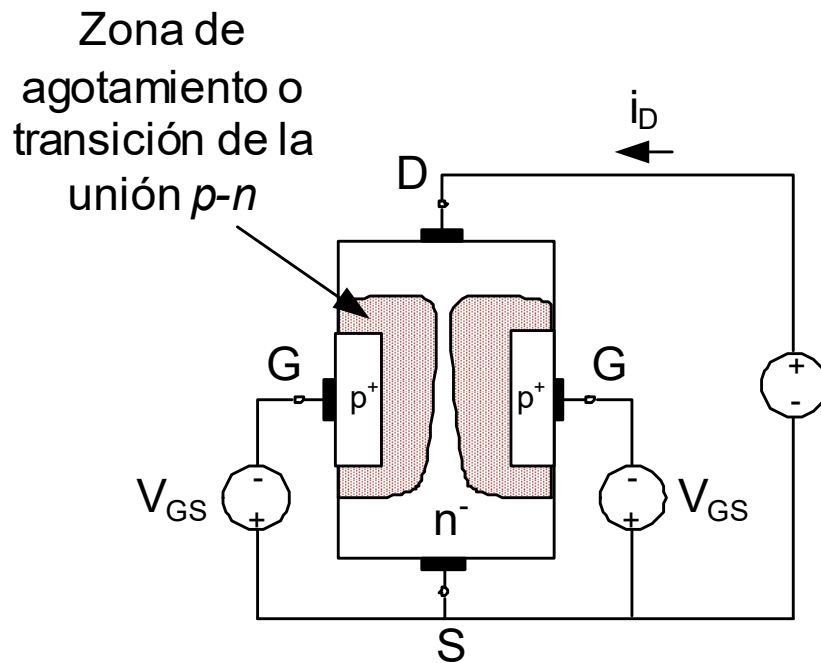
### Canal n y Canal p



# Transistores de efecto campo. JFET.

## Efecto campo. *Canal n*

**Uniones p-n polarizadas en inversa:** aparece una zona de carga espacial que se vacía de portadores, por lo que el canal de conducción se estrecha.  $i_D$  proporcional a  $V_{DS}$  hasta un valor máximo. Comportamiento no lineal.

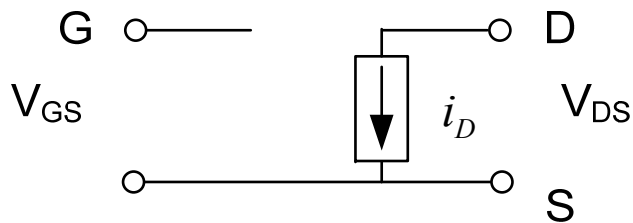


**Canal p:** Igual funcionamiento pero cambiando el signo de  $V_{GS}$

# Transistores de efecto campo. JFET.

## Zonas de funcionamiento

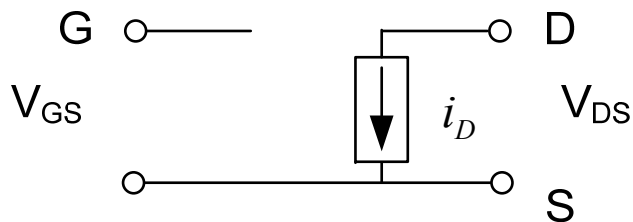
- Zona Lineal (óhmica):** Para una determinada tensión  $V_{GS} > V_{TR}$  la  $i_D$  varía linealmente según se incrementa  $V_{DS}$  hasta una  $V_{sat} \sim V_{GS} - V_{TR}$



Si  $V_{GS} > V_{TR}$  y  $0 < V_{DS} < V_{sat} (\approx V_{GS} - V_{TR})$

$$i_D = k \cdot (2(V_{GS} - V_{TR})V_{DS} - V_{DS}^2); \quad k = \frac{i_{DSS}}{V_{TR}^2}$$

- Zona de Saturación:** Para una determinada tensión  $V_{GS} > V_{TR}$ , si  $V_{DS} > V_{sat}$  la  $i_D$  permanece constante aunque aumente  $V_{DS}$ .



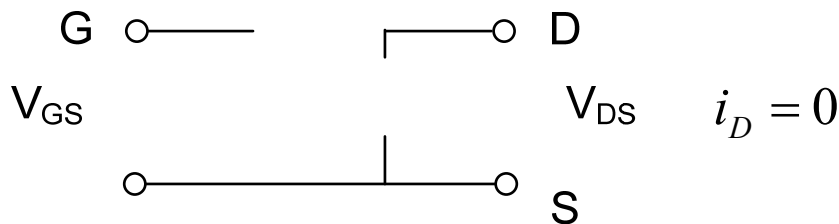
Si  $V_{GS} > V_{TR}$  y  $V_{DS} > V_{sat} (\approx V_{GS} - V_{TR})$

$$i_D = k \cdot (V_{GS} - V_{TR})^2; \quad k = \frac{i_{DSS}}{V_{TR}^2}$$

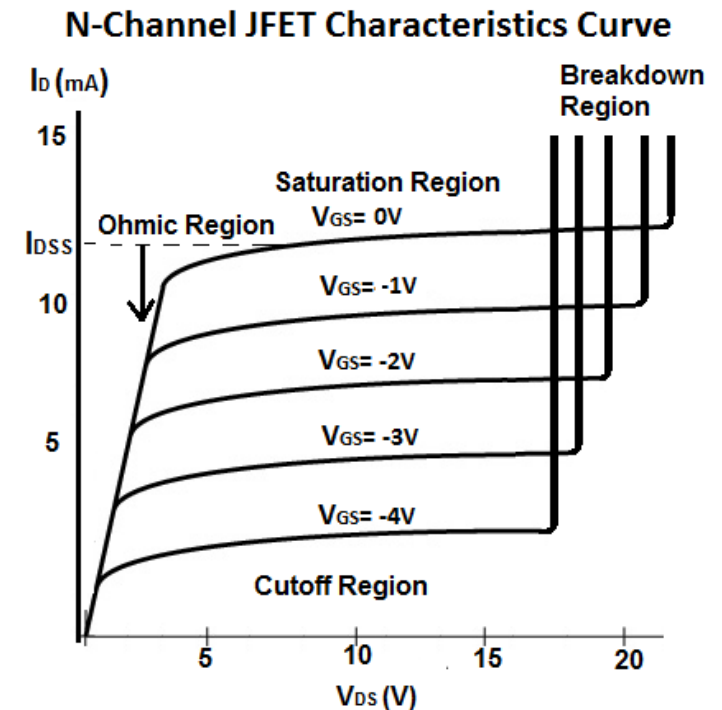
# Transistores de efecto campo. JFET.

## Zonas de funcionamiento

- Zona de Corte (cut-off):** Para una determinada tensión  $V_{GS} < V_{TR}$  en canal está estrangulado y no circula la corriente  $i_D$ .



- Zona de ruptura (breakdown):** Si estando en la zona de saturación se aumenta mucho  $V_{DS}$  se produce la ruptura del componente.
- No hay zona inversa:** El componente es simétrico.

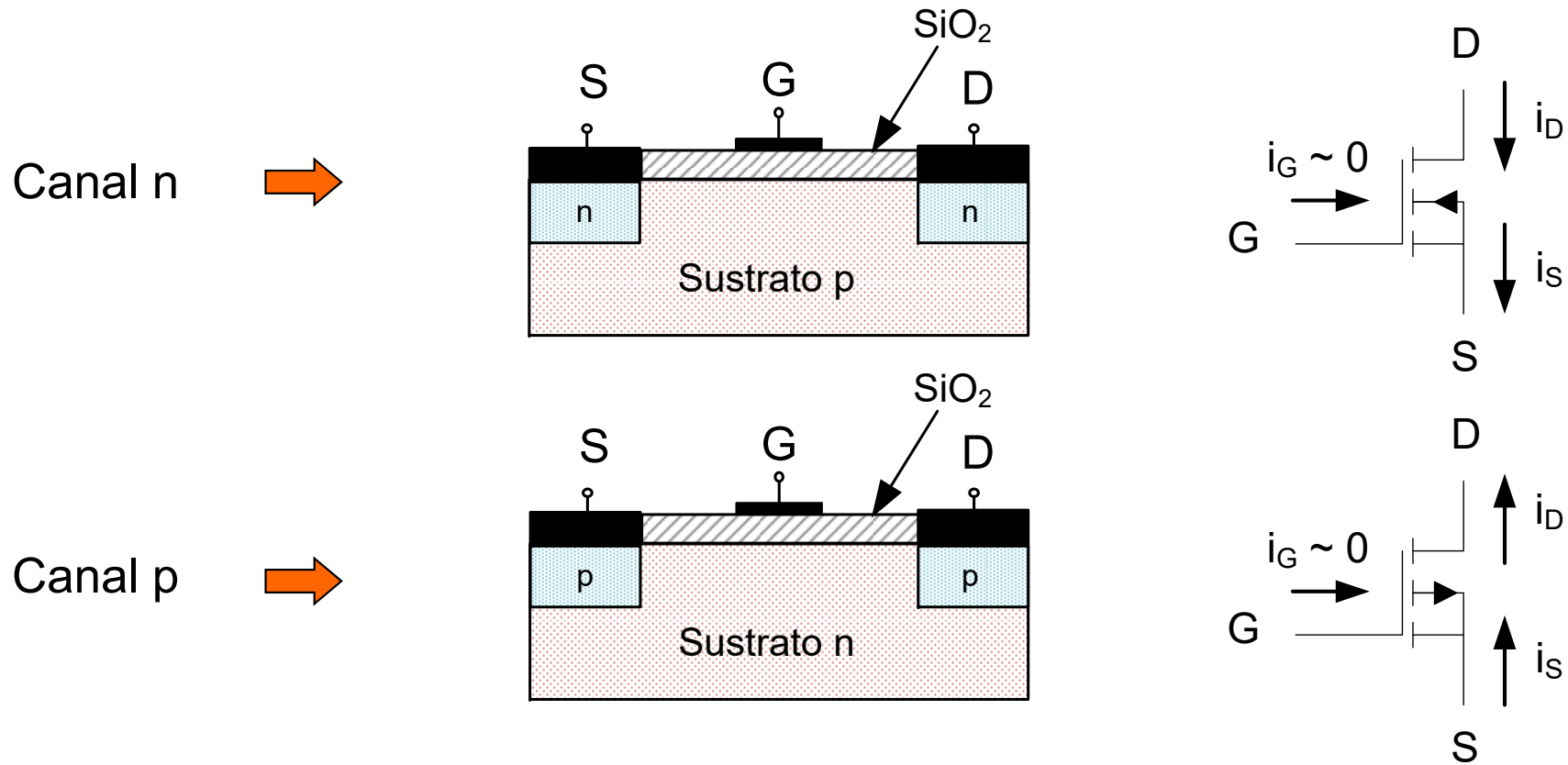




# Transistores de efecto campo. MOSFET.

## Estructura y símbolo del MOSFET de enriquecimiento. *Canal n* y *Canal p*

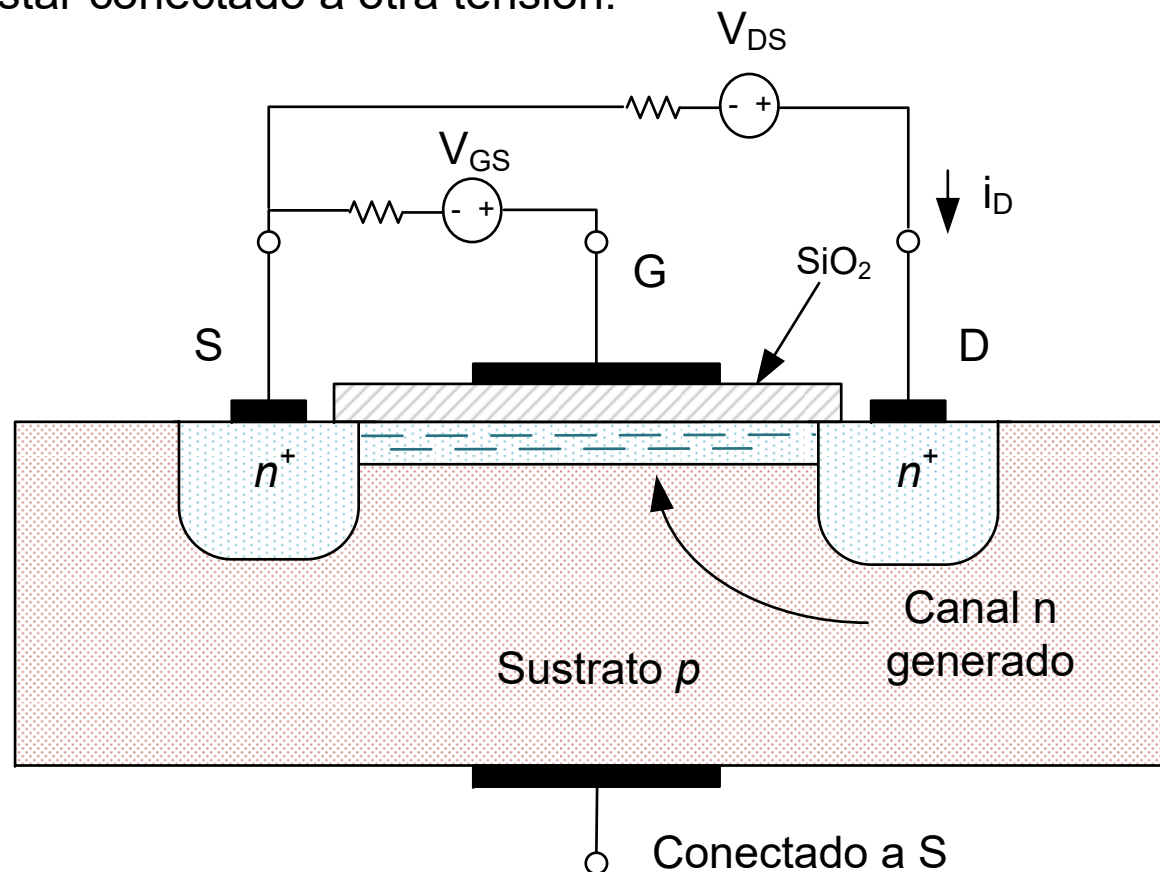
Terminales: los mismos: Puerta, Drenador y Fuente. Componente simétrico.



# Transistores de efecto campo. MOSFET.

## Funcionamiento. MOSFET de enriquecimiento canal n

✓ Tensión  $V_{DS}$  y  $V_{GS}$ : La tensión  $V_{GS}$  atrae electrones del sustrato hacia la capa aislante de  $\text{SiO}_2$ , creando un canal. La corriente  $i_D$  comienza a circular cuando la tensión  $V_{DS}$  supera un umbral  $V_{TR}$ . El sustrato p se conecta a la fuente. En transistores usados en C.I. el sustrato puede estar conectado a otra tensión.

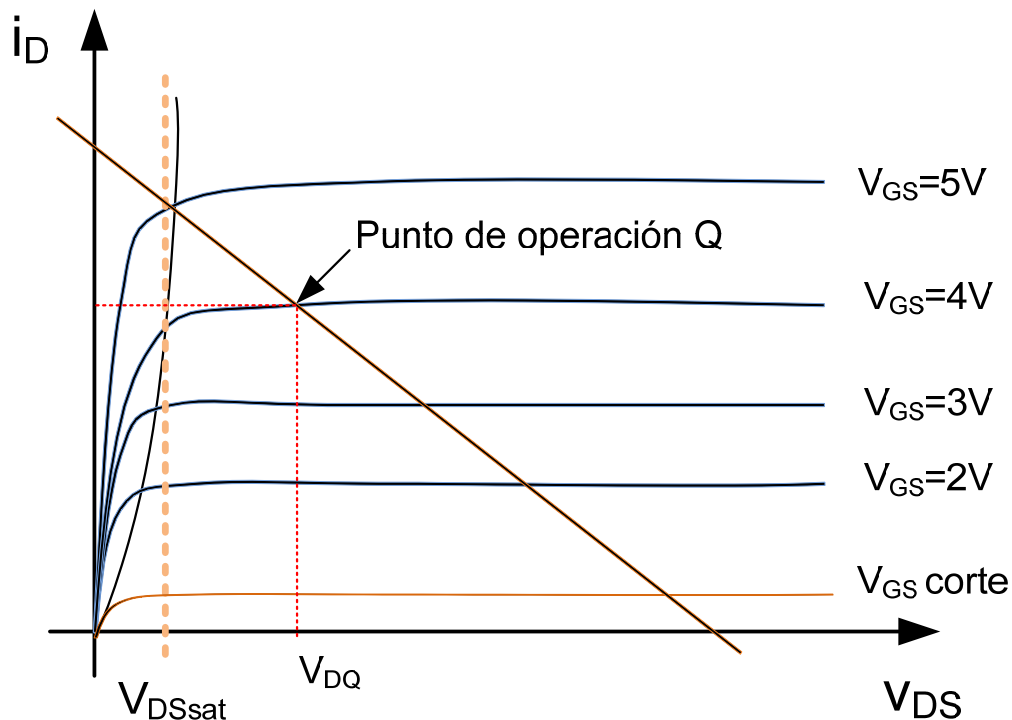


# Transistores de efecto campo. MOSFET.

## Zonas de funcionamiento y ecuaciones (NMOS):

- Las mismas que se han visto para el JFET de canal N: **corte, lineal, saturación y ruptura.**

### Punto de operación



- Circuito de salida

$$V_{DD} = i_D \cdot R_D + V_{DS}$$

$$V_{DS} = 0 \rightarrow i_D = \frac{V_{DD}}{R_D}$$

$$i_D = 0 \rightarrow V_{DS} = V_{DD}$$

- Pto. De Operación.** Intersección de la recta de carga con la curva del valor de  $V_{GS}$  conectado en la entrada.

# Transistores de efecto campo

## Transistores JFET y MOSFET reales. No idealidades:

- Sus características **varían con la temperatura**.
- La **curva característica de salida no es plana** en su Zona de Saturación. No es totalmente lineal.
- La **tensión máxima que soporta un transistor entre terminales es finita**. Por encima de ellas se rompe el componente.
- La **máxima corriente viene limitada por la capacidad de disipación de potencia** del componente.
- La existencia de capacidades y resistencia parásitas hacen que la **velocidad de respuesta del transistor sea limitada**.
- **Sensibles a descargas electroestáticas**.

- **Electronics.** A System Approach. Neil Storey. Pearson-Prentice Hall. 4<sup>a</sup> edición.
- **Microelectrónica: Circuitos y Dispositivos.** Mark N. Horenstein. Ed. Prentice Hall
- **Microelectrónica.** Jacob Millman, Arvin Grabel. McGraw Hill.
- **The Art of Electronics.** Paul Horowitz. Cambridge University Press.