Departamento de Electrónica
Universidad de Alcalá

Tecnología Electrónica

Capítulo 1: **Transistores.**

Estructura y curvas características.

Versión: 2017/01/26

Transistores. Índice general del tema

1. Transistores bipolares (BJT)

- Breve referencia histórica.
- Estructura interna. Simbología y nomenclatura.
- Curvas características. Zonas y modos de trabajo: modelos en gran señal.
- Efectos de segundo orden.

2. Transistores de efecto de campo (FET)

- Breve referencia histórica.
- Estructura interna. Simbología y nomenclatura.
- MOS de acumulación: curvas, zonas y modelos en gran señal.
- MOS de deplexión: curvas, zonas y modelos en gran señal.
- Efectos de segundo orden.

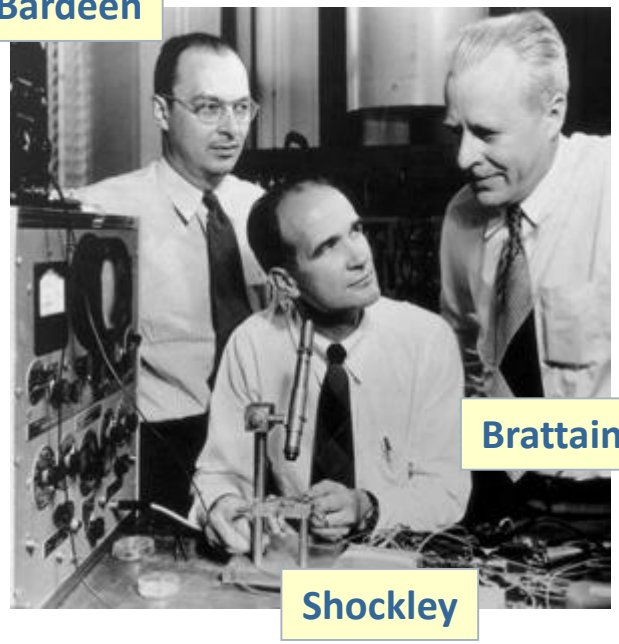
3. Aplicaciones básicas. Comparativa.

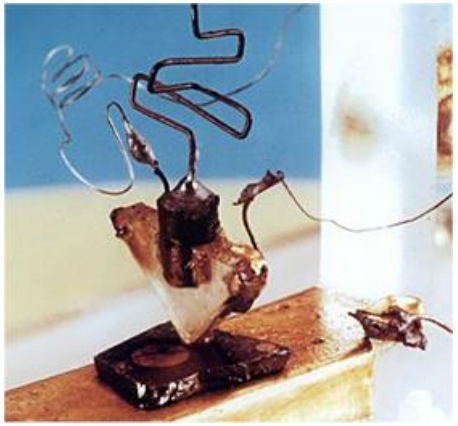
1. Transistores Bipolares. Índice parcial.

- Transistores Bipolares (BJT)
  - **Aspectos generales**
  - Análisis cualitativo
  - Análisis cuantitativo
  - Comportamiento en continua
    - *Configuración*
    - *Características I-V*
      - Característica de entrada
      - Característica de salida
    - *Modelos lineales*
  - Efectos de segundo orden
    - *Modulación de la base*
    - *Efecto de la temperatura*
    - *Tensión de ruptura*

1. Transistores Bipolares. Introducción.

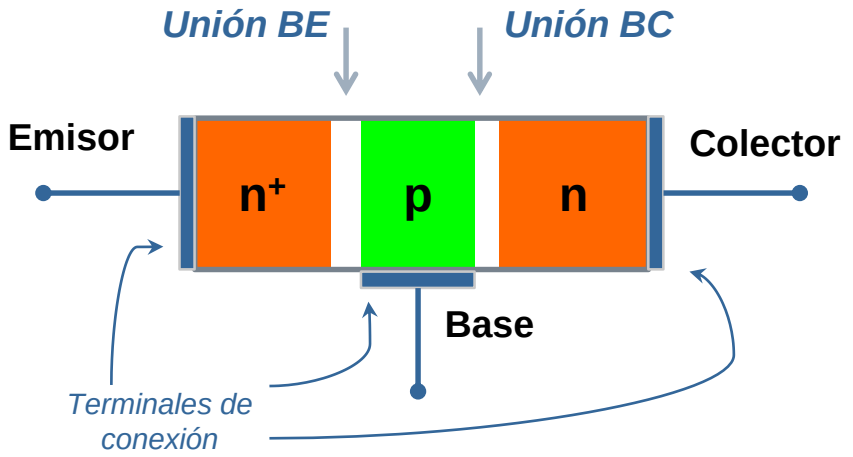
- Breve introducción histórica:
  - Inventado en 1947 por *John Bardeen*, *William Shockley* y *Walter Brattain* en los Laboratorios de Bell Telephone.
    - *Se les dio por ello el Nobel de Física en 1956.*
  - Su nombre (y símbolo) alude a su estructura y propiedades.
  - **BJT**, Bipolar Junction Transistor (Transistor Bipolar de Unión):
    - *Bipolar: el flujo de corriente se debe a portadores de ambos tipos (**e-** y **h+**).*
    - *TRANSISTOR: TRANSfer resISTOR*
    - *Dos uniones PN muy cercanas entre sí.*
  - Su descubrimiento facilitó el desarrollo de la electrónica moderna: circuitos más pequeños, más rápidos y más eficientes.

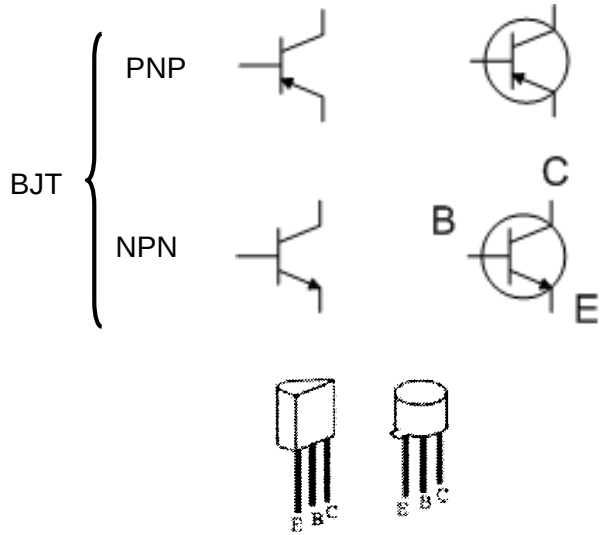




1.1. BJT. Aspectos generales.

- Estructura interna:
  - *Dispositivos de **3 terminales** basado en material semiconductor que se usa en aplicaciones de amplificación y conmutación.*
  - *Formado por **dos uniones*** **pn** ⇨ se tienen dos posibilidades de construcción: **npn** o **pnp**:*

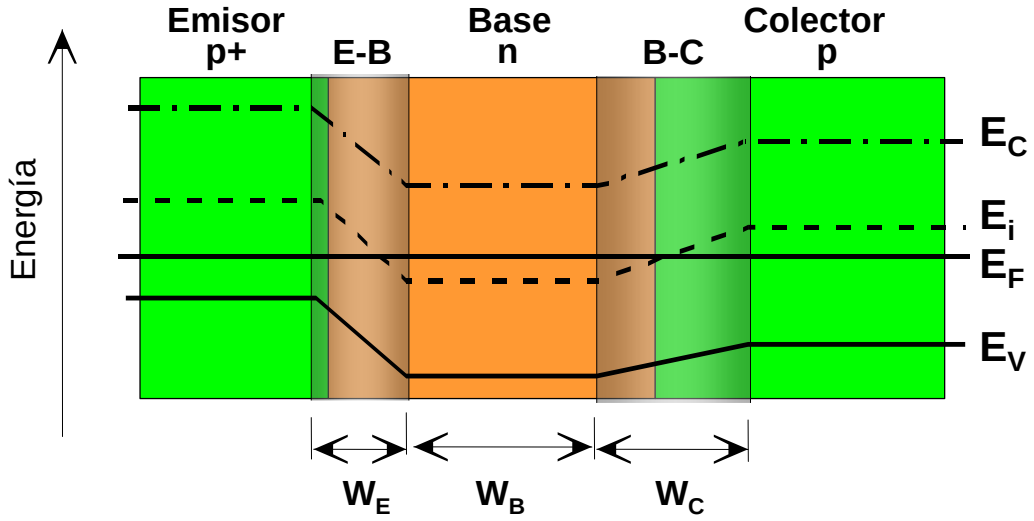




(*) Si bien son dos uniones pn, su funcionamiento nada tiene que ver con dos diodos en serie: la clave es la estrechez de la base.

1.1. BJT. Aspectos generales.

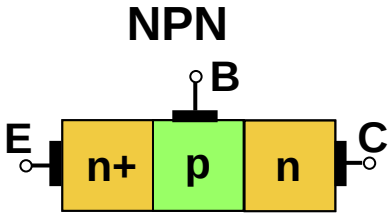
- Origen de sus propiedades como dispositivo controlado.
  - Diferentes zonas uniformemente dopadas.
    - *El emisor mucho más dopado. La base más dopada que el colector.*
  - Relaciones geométricas entre zonas:
    - *Anchura de base (w_B) << longitud difusión de minoritarios en esa zona ($L_{E,B,C}$).*
  - Al ***polarizar*** las uniones BE y BC se originan flujos de portadores (**e-** y **h+**) dependientes de dichos dopajes y geometrías.

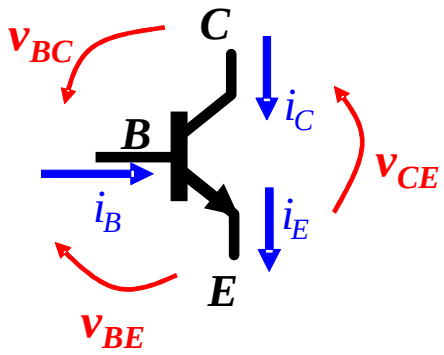


1.1. BJT. Aspectos generales.

- Nomenclatura de tensiones y corrientes.
  - Se pueden identificar tres intensidades y tres tensiones.
  - Tomando como referencia el NPN definimos sentidos y nombres:

- Corrientes:
  - Las de referencia se miden entre base y colector: i_B , i_C
    - ➔ *Las definimos como entrantes*.
  - La de emisor (saliente) la obtenemos de las anteriores: $i_E = i_C + i_B$
- Tensiones:
  - **Entrada** preferente en BE: v_{BE}
  - **Salida** preferente entre CE: v_{CE}
  - La unión BC se obtiene como: $v_{BC} = v_{BE} - v_{CE}$





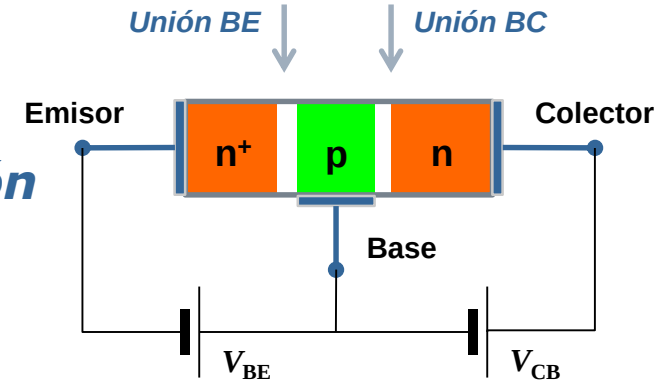
$i_E = i_C + i_B$

$v_{BC} = v_{BE} - v_{CE}$

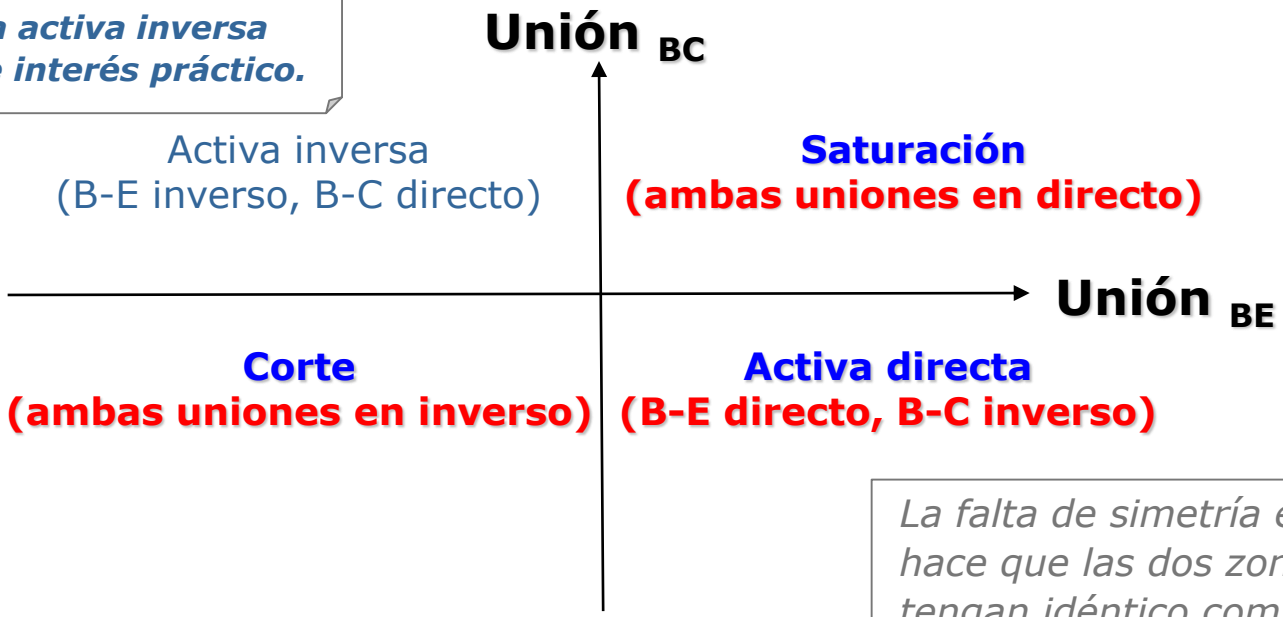
1.1. BJT. Aspectos generales.

Modos de funcionamiento

- El BJT puede trabajar en **4 modos** diferentes dependiendo de la ***polarización*** de las dos uniones:



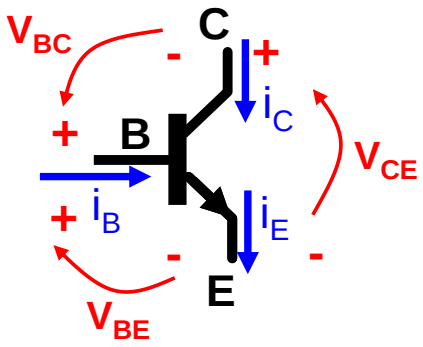
La zona activa inversa carece de interés práctico.



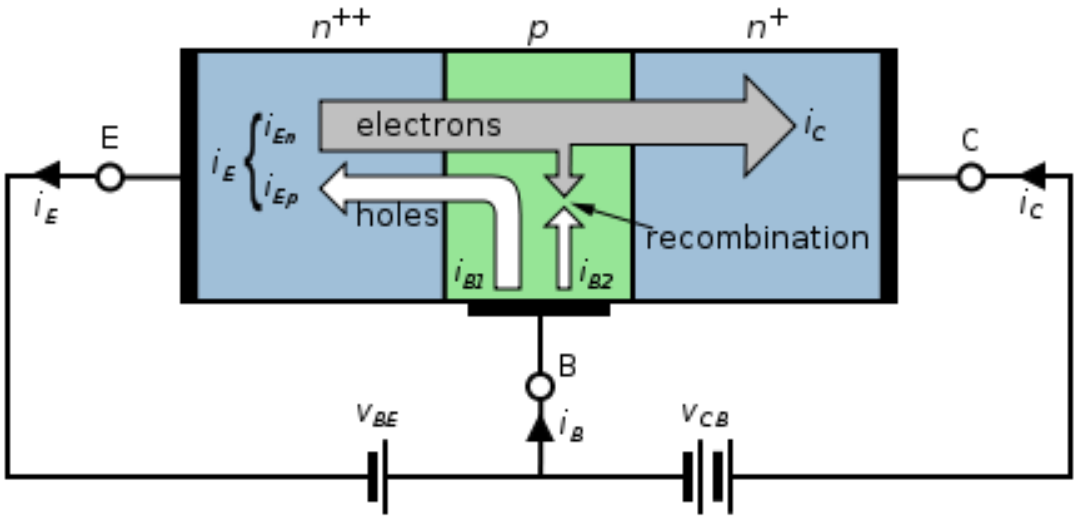
La falta de simetría en el dopaje hace que las dos zonas activas no tengan idéntico comportamiento ⇨ ***mayor ganancia en directa***.

1.2. BJT. Análisis cualitativo.

- Efecto Transistor*: el NPN, en región activa directa.



$$V_{EB}>0,\ V_{CB}<0$$
$$I_E, I_B, I_C>0$$



Principal flujo de corriente: e^- del Emisor (emite) al Colector (recoge)

(*) Con una cierta corriente inyectada por la Base se obtiene una ***corriente mucho mayor*** entre CE a través ***a pesar de que la unión de BC está en inverso***.

1.3. BJT. NPN: curvas (*i*-*v*).

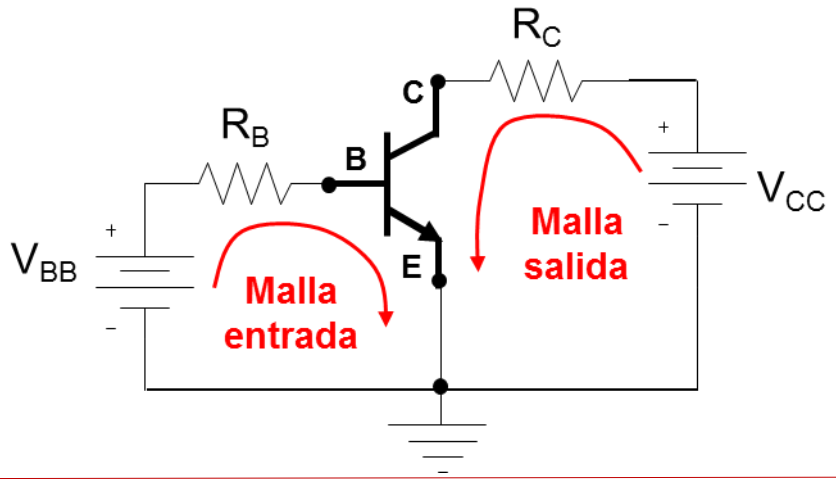
- Curvas características en ***emisor común***:

DEF.

De entrada: relaciona la corriente de base i_B con la tensión v_{BE} con diferentes valores de v_{CE} (parámetro de la salida)

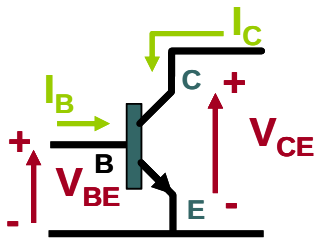
De salida: relaciona la corriente de colector i_C con la tensión v_{CE} para diferentes valores de i_B (parámetro de la entrada)

⇨ La tensión entre los terminales de entrada determina el comportamiento eléctrico de la salida.



1.3. BJT. NPN: curvas (*i-v*). Entrada.

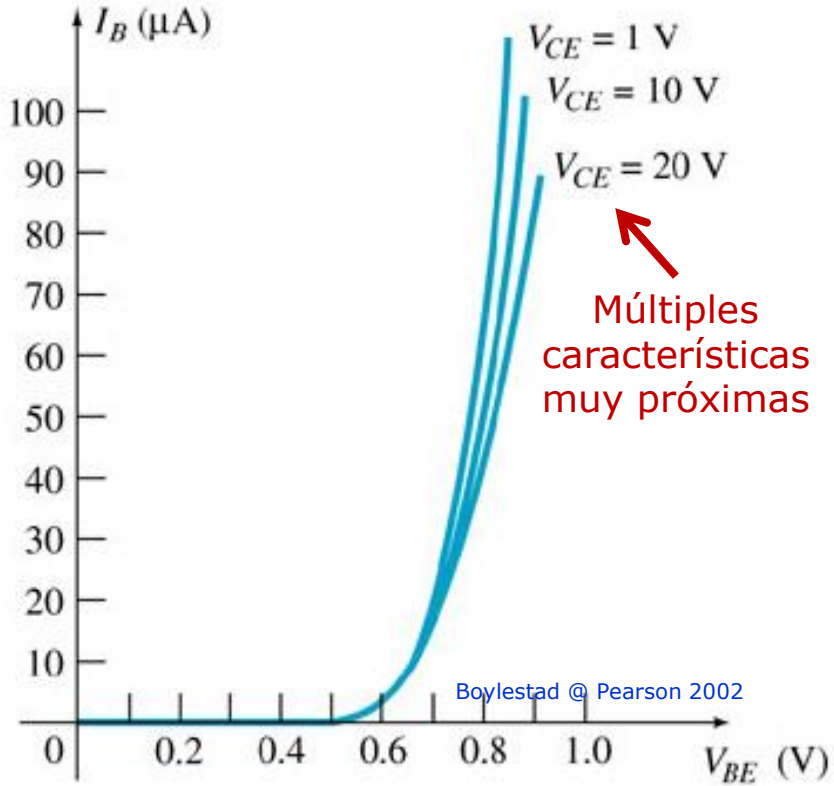
- Curvas características reales: característica de entrada



Zona activa directa:

$$I_B = \frac{I_S}{\beta}\left(e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1\right)$$

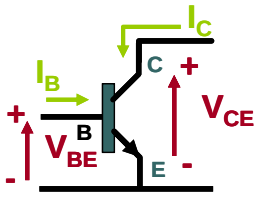
- I_S: corriente de escala
- $V_T = KT/q$: potencial térmico
- $\beta_F = \beta = I_C/I_B$: ganancia en corriente en Ac. directa
- $\beta_F >> \beta_R$ = ganancia en corriente en Ac. inversa



La relación entre I_B y V_{BE} es exponencial ⇨ pequeñas variaciones de tensión pueden provocar grandes variaciones de corrientes.

1.3. BJT. NPN: curvas (*i-v*). Salida.

Curvas características reales: característica de salida

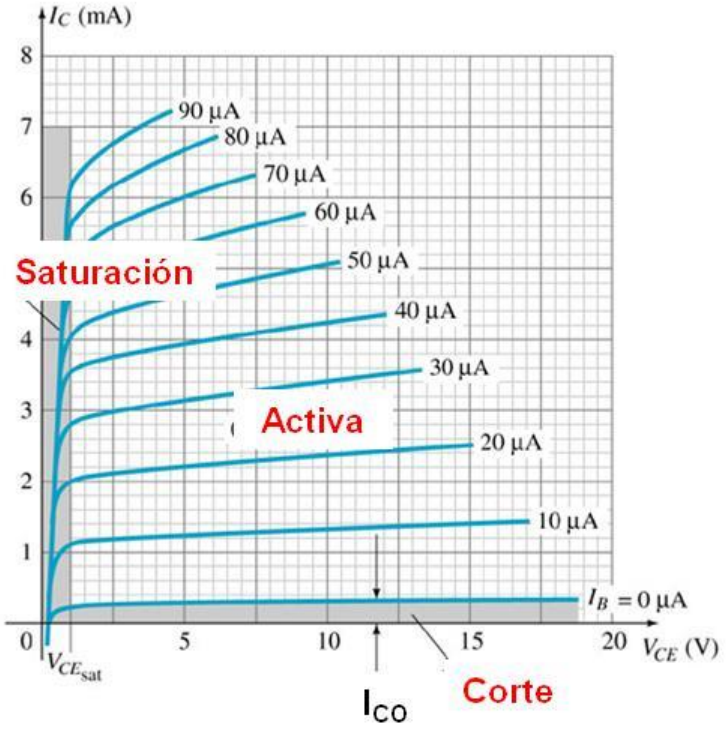


Zona activa directa:

$$I_C = I_S \cdot \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1 \right) \approx \beta \cdot I_B + (\beta + 1) \cdot I_{CO}$$

I_{CO}: corriente en cortocircuito; valor muy bajo.

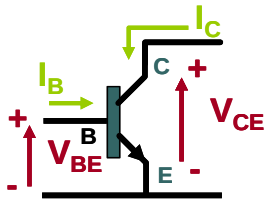
$\beta = I_C / I_B$: ganancia en corriente



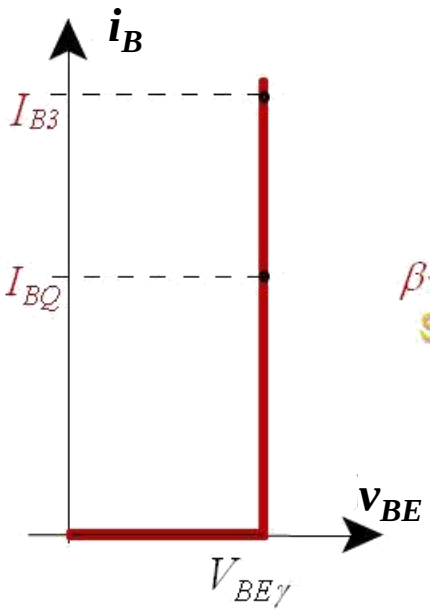
- **Corte**: no fluye corriente por ninguno de los terminales (despreciando I_{CO}). Región utilizada en aplicaciones digitales al comportarse como un interruptor abierto.
- **Activa**: actúa como un amplificador de intensidad: $I_C = \beta \cdot I_B$ (β_{npn}~100, 10-1000)
- **Saturación**: La ganancia en intensidad decae substancialmente y la tensión entre C y E permanece constante, $I_C < \beta \cdot I_B$. Región muy utilizada en aplicaciones digitales, donde se comporta como interruptor cerrado.

1.3. BJT. NPN: modelos lineales, *gran señal*.

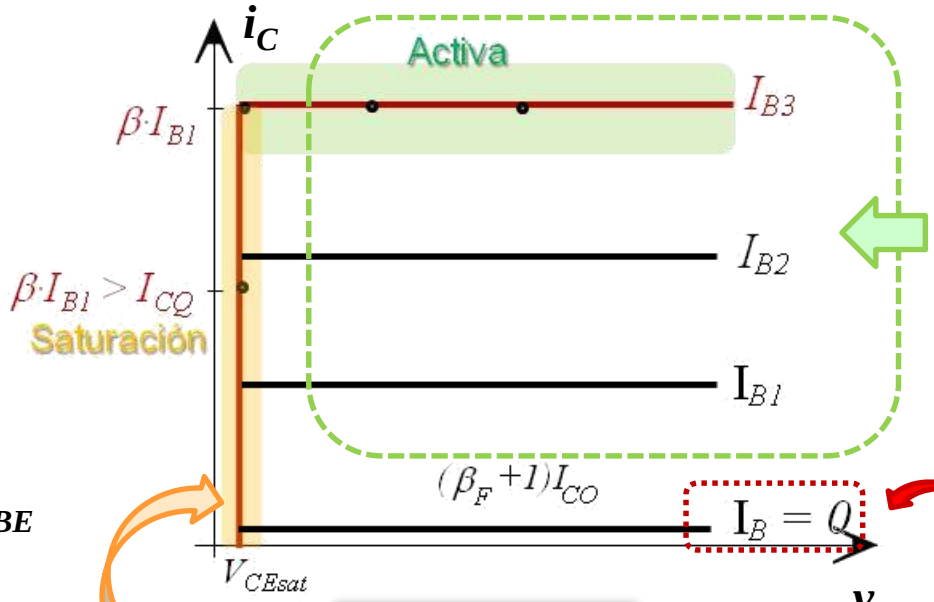
- Modelos lineales de las características:
  - Para gran señal y frecuencias bajas



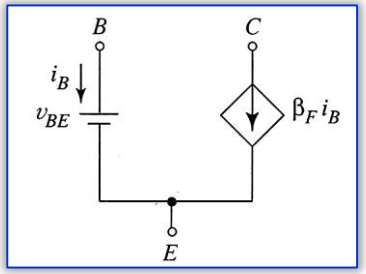
Curva de entrada



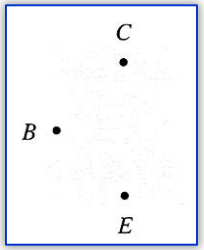
Curva de salida



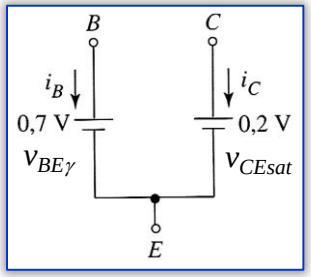
Activa



Corte

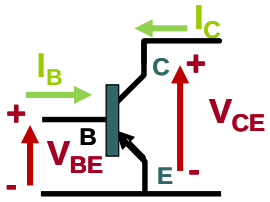


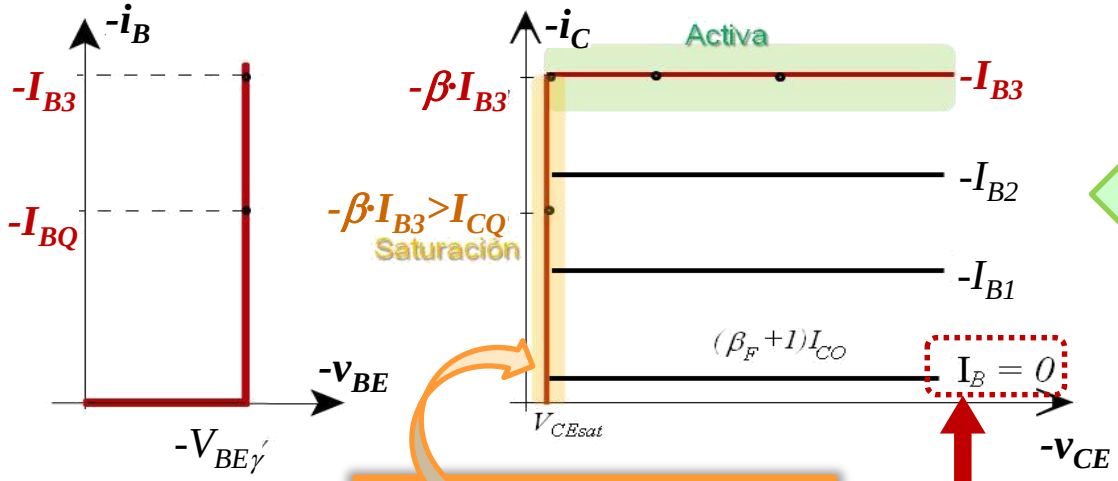
Saturación

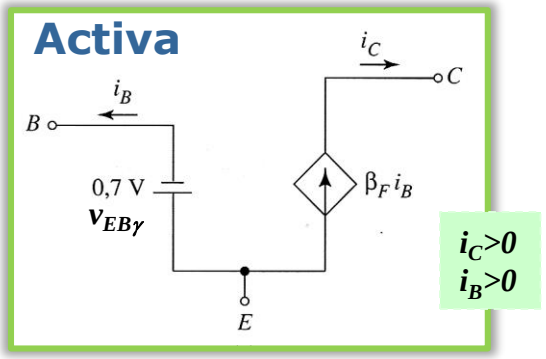


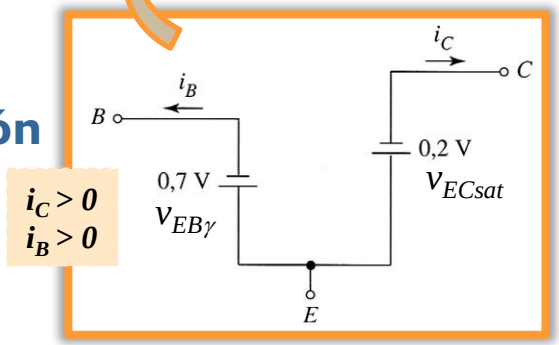
1.4. BJT. PNP: modelos lineales, *gran señal*

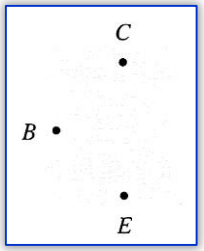
- Modelos lineales de las características:
  - Similares al NPN pero con ***todos*** *los signos contrarios*
    - *Al **invertir** las gráficas (signos **-**) son iguales en forma. Ecuaciones y zonas son iguales, con **sentidos opuestos**.*







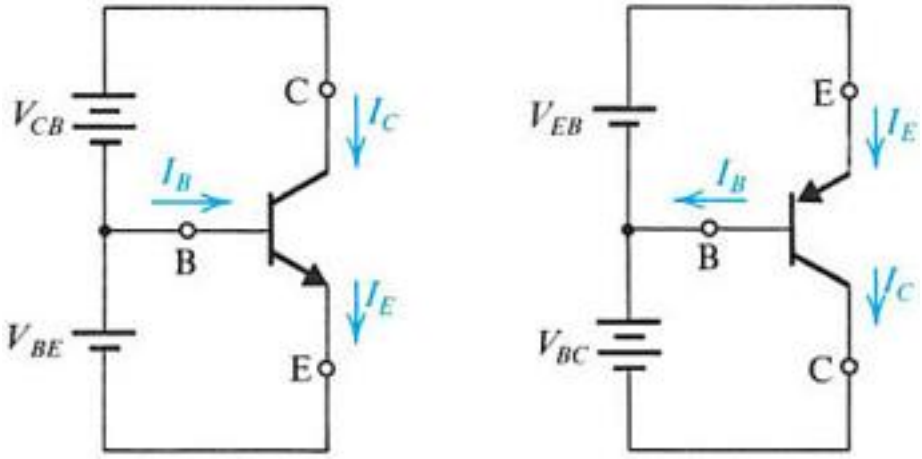




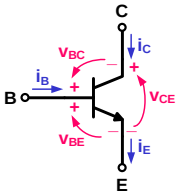
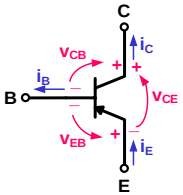
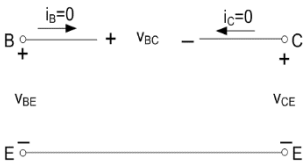
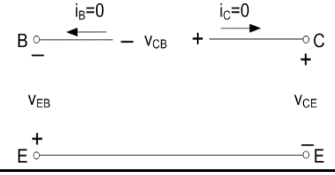
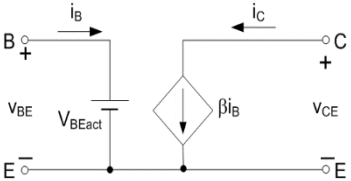
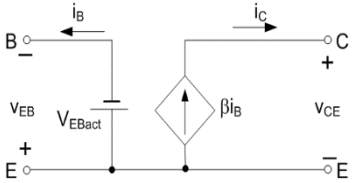
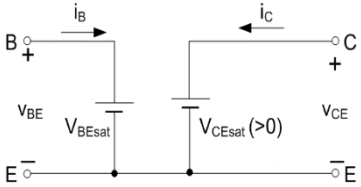
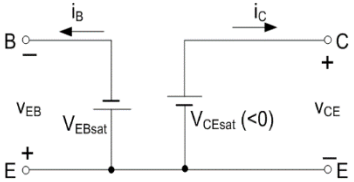
Corte

1.5. BJT. NPN y PNP: analogías y diferencias.

- Se diferencian en la polaridad de portadores
  - En todo lo demás son similares (ecuaciones, curvas, zonas…)
  - Sólo hay que tener muy en cuenta los cambios de signo en tensiones y corrientes en los modelos y definiciones.
  - Ejemplo:
    - *En los ctos. siguientes, ambos transistores están en activa (unión BE en directo, unión BC en inverso). Observe los cambios hechos en los sentidos de tensiones y corrientes para simplificar su estudio:*



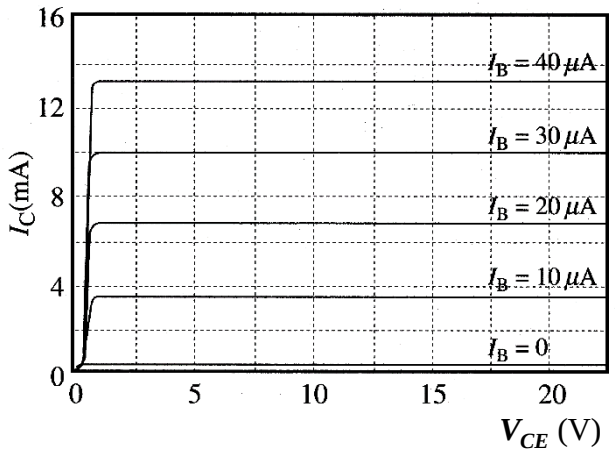
1.6. BJT. Modelos en g. s.: cuadro resumen

	NPN Modelo idealizado 		**PNP Modelo idealizado** 	
	Suposición	A comprobar	Suposición	A comprobar
CORTE		$v_{BE} \le V_{BE\gamma}\ ;\ V_{BC} \le V_{BC\gamma}$		$v_{EB} \le V_{EB\gamma}\ ;\ v_{CB} \le V_{CB\gamma}$
ACTIVA		$i_B > 0$ $v_{CE} \ge V_{CEsat}\quad (V_{CEsat} \ge 0)$		$i_B > 0$ $v_{CE} \le V_{CEsat}\quad (V_{CEsat} \le 0)$
SATURACIÓN		$i_B > 0,\ i_C > 0,$ $i_C = I_{Csat} \le \beta \cdot i_B$		$i_B > 0, i_C > 0,$ $i_C = I_{Csat} \le \beta \cdot i_B$

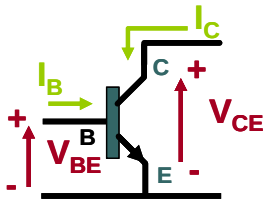
A TENER EN CUENTA: estos modelos son válidos en ausencia de efectos de segundo orden

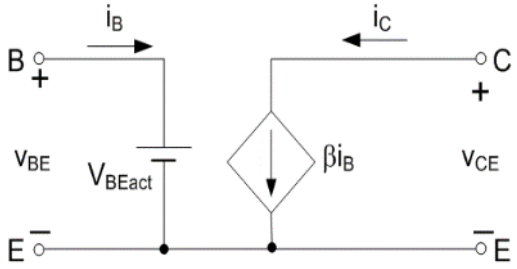
1.7. BJT. Efectos de segundo orden.

- Efectos de segundo orden: variación de I_C con la V_{CE}

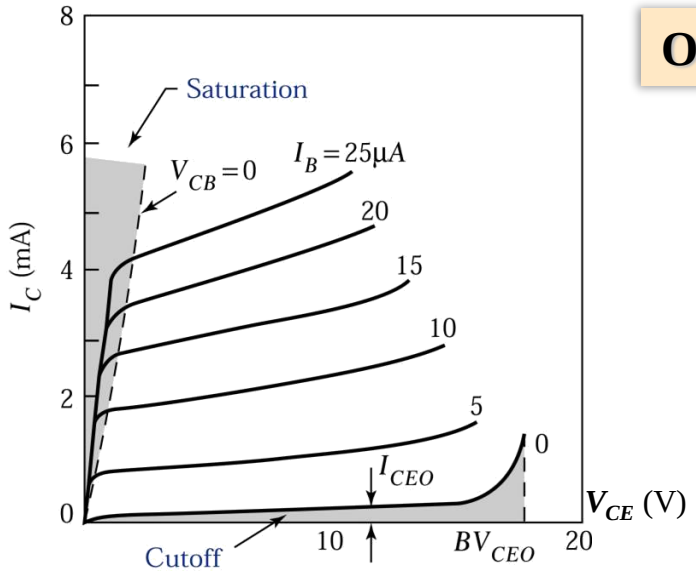


Ideal





Modelo ideal → generador $\beta \cdot i_B$ ideal



Observado

- La corriente I_C se incrementa al subir la tensión V_{CE}
- Este efecto está causado por el cambio del ancho de las Z.T. de las uniones ***BC*** y ***BE***, efecto conocido como:
  → "*modulación de la anchura de la Base*"
- Es fácil de modelar el efecto con un resistor entre ***C*** y ***E***

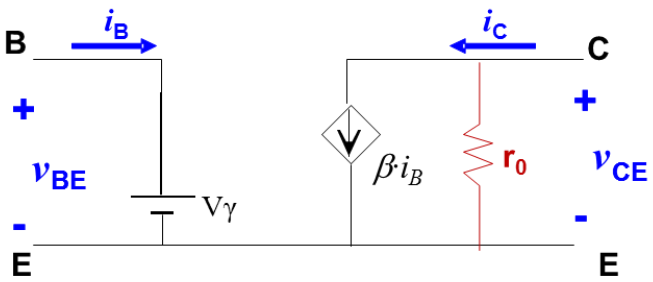
1.7. BJT. Efectos de segundo orden.

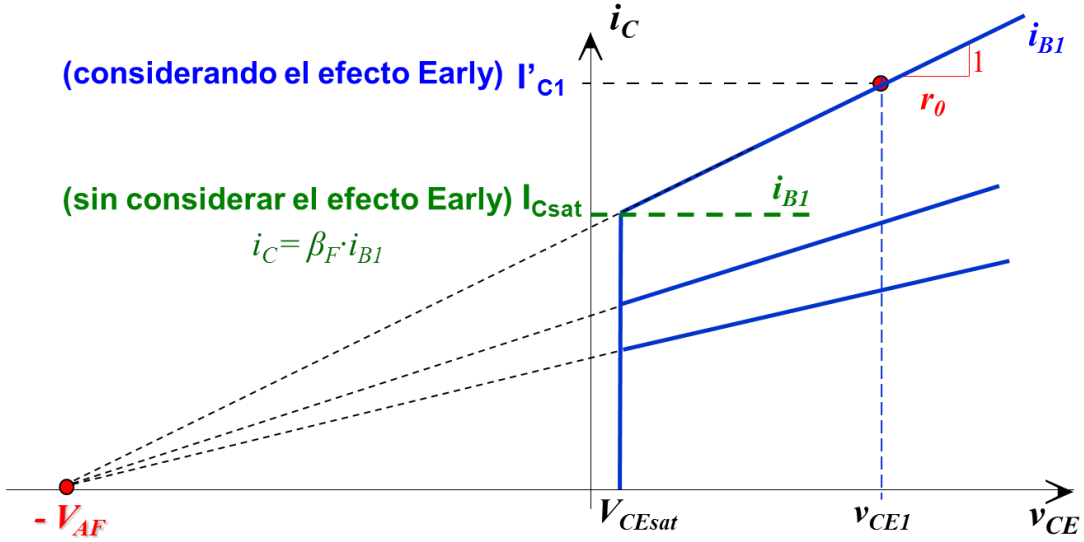
- Modelado de: *modulación de la anchura de base ó* ***efecto Early***
  - La corriente i_C aumenta con v_{CE} → $i_C = f(\ldots, v_{CE})$

En zona activa:

$$i'_C(V_{CE}) = \beta \cdot i_B + \frac{V_{CE}}{r_0}$$

$\frac{V_{CE}}{r_0}$: *Efecto Early*





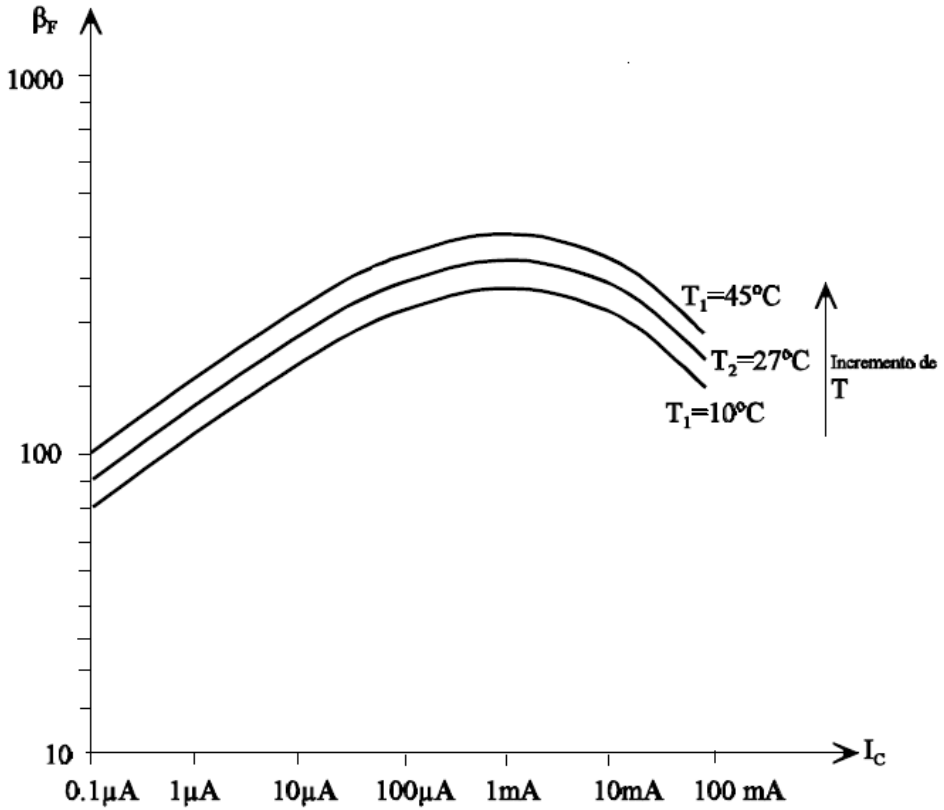
$$r_0 = \frac{\pm V_{AF}}{\underbrace{\beta \cdot i_B}_{I_{Csat}}} = \left.\frac{\pm V_{AF}}{i_C}\right|_{Activa} \approx \frac{\pm V_{AF}}{\beta \cdot i_B} \quad (\text{donde } +_{npn}, -_{pnp})$$

$$r_0 = \left|\frac{V_{AF}}{\beta \cdot i_B}\right|$$

1.7. BJT. Efectos de segundo orden.

- Efecto: *variaciones de **beta** con I_C y la temperatura **T***
  - La beta de un BJT relaciona la corriente de salida (I_C) con la corriente en la entrada (I_B)
  - Suele ser de alto valor, pero…
  - Tal valor tiene variaciones muy notables (ver gráfico)
- Dependencias
  - Con el valor de la propia I_C
  - Con las variaciones de temperatura.

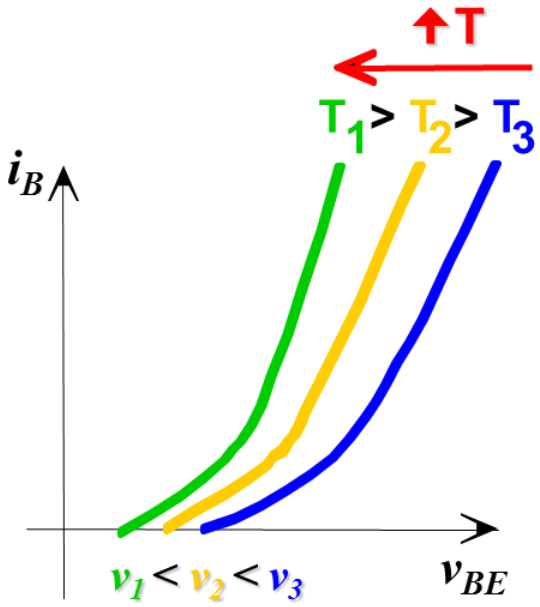
➔ *Estos efectos se atenúan usando técnicas adecuadas (por ejemplo, con **Realimentación**)*



1.7. BJT. Efectos de segundo orden.

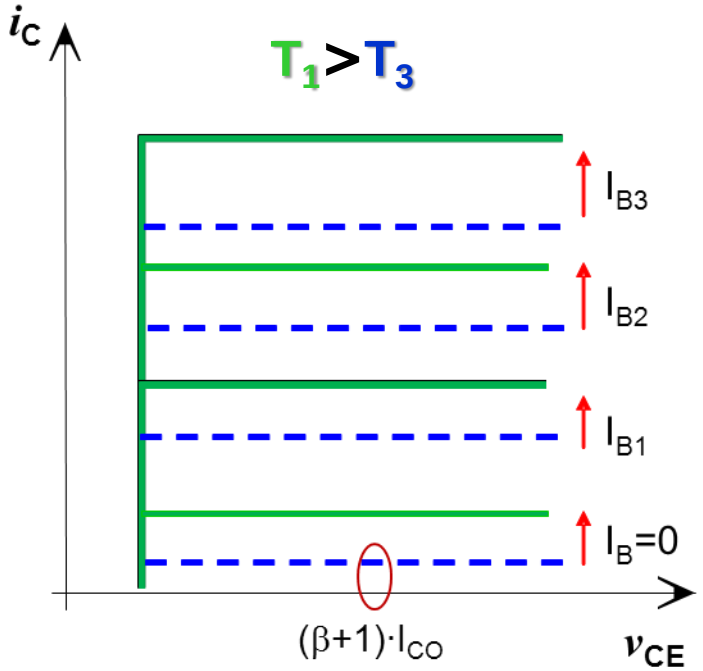
- Efecto: *variaciones con la Temperatura (2)*
  - Se tienen también cambios en las curvas de entrada y salida

Efectos en la entrada



- Disminuye la tensión de conducción.
- Análogo al diodo: **$\Delta V_\gamma(BE) \approx -2mV/^oC$**

Efectos en la salida



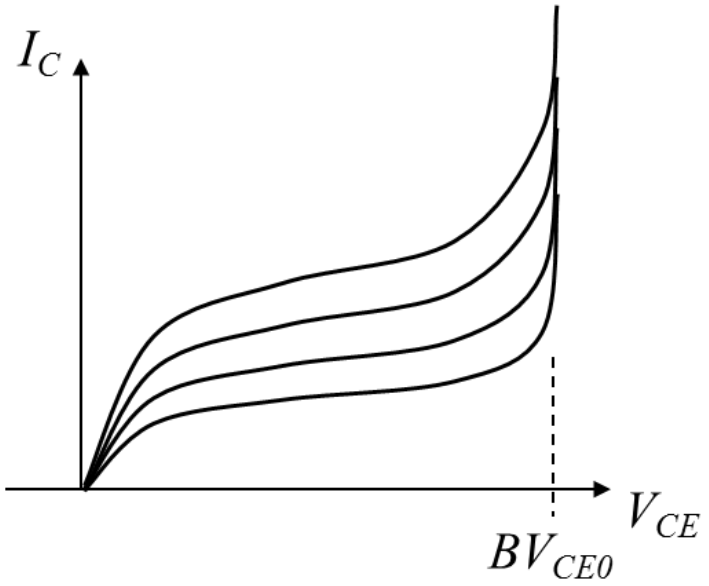
- Para un misma I_B, aumenta la I_C, debido a variaciones en β e I_{CO}.

1.7. BJT. Efectos de segundo orden.

- Efecto: *tensión de ruptura* (*Breakdown Voltage*)
  - Limite máximo en las curvas de salida: $v_{CE_max} = BV_{CE0}$

- **Ruptura por perforación**:
  Cuando la base desaparece debido a una elevada polarización inversa de la unión CB ⇨ ***perforación de base,*** dejando que toda la corriente de colector pase a emisor, aumentando $\boldsymbol{I_{CE}}$ pudiendo llegar a destruir el dispositivo.

- **Ruptura por avalancha**:
  Se produce cuando la unión CB está polarizada en inversa (con un valor elevado). I_C aumenta de forma descontrolada.

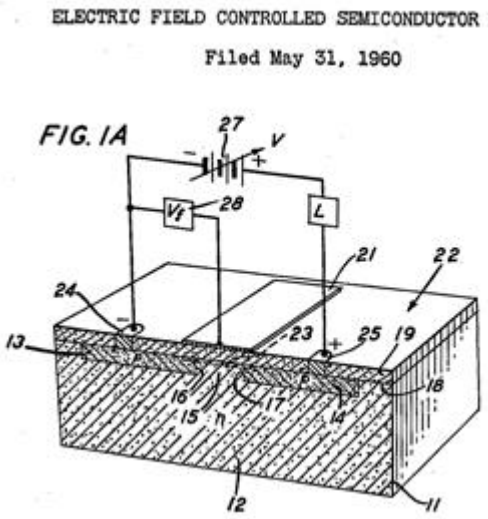


2. Transistores de Efecto Campo, FET.
Índice parcial.

- Transistores de Efecto Campo (**FET**, ***Field Effect Transistor***)
  - **Aspectos generales**
  - **MOSFET**: **M**etal **O**xide **S**emiconductor **FET**
    - *MOS de Acumulación*
      - Análisis cualitativo: principio de funcionamiento
      - Análisis cuantitativo: Ecuaciones y zonas de trabajo
    - *MOS de Deplexión*
      - Estructura
      - Curvas características
  - Comportamiento en continua. Efectos de 2º orden.
    - *Modulación de la longitud del canal*
    - *Efecto de la temperatura*
    - *Tensión de ruptura*

2. *Field Effect Transistors*. Introducción.

- **Breve introducción histórica** (*):
  - Primeras propuestas de los FET desde 1926 (Lilienfeld y otros)
  - El **MOSFET**, dispositivo base de la electrónica moderna, se desarrolló en 1959 por D. Kahng y otros en los laboratorios Bell.



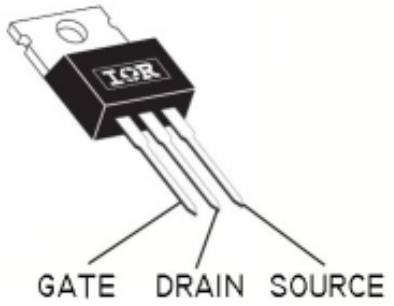
Dawon Kahng

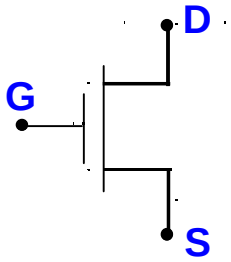
- Los *transistores de efecto campo* son aquellos que mediante un **campo eléctrico** controlan la conductividad de un "***canal***" en el material semiconductor ⇨ flujo de **portadores mayoritarios**
- Se les denomina **unipolares** porque la corriente se debe a *un único tipo* de portador, **e^-** ó **h^+** ⇨ se pueden distinguir dos tipos en función del tipo de portador: **Canal n** y **Canal p**.

(*) http://www.computerhistory.org/semiconductor/timeline/1960-MOS.html

2.1. FET. Aspectos Generales.

- Características de la estructura interna:
  - *Dispositivos de 3 terminales basado en material semiconductor que se usa en aplicaciones de amplificación y conmutación.*
    - **D = Drain**: sumidero de portadores libres.
    - **S = Source**: fuente de portadores libres.
    - **G= Gate**: control de la conductividad del canal.



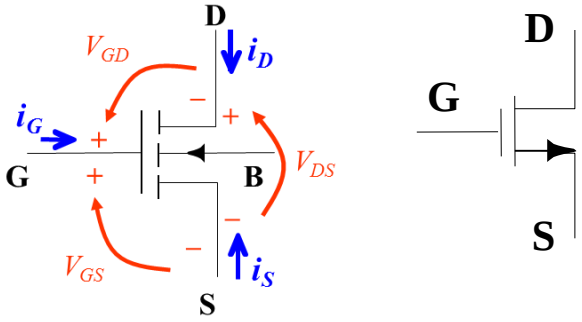


- Distintos tipos de FETs en función del tipo de puerta:
  - ***MOSFET**: puerta aislada basada en una estructura **M**etal-**O**xido-**S**emic.*
    - Acumulación
    - Deplexión
  - *Existen otras muchas variantes como los **JFET**, con puerta basada en una unión pn; los **MESFET** e **IGBT** usados para aplicaciones de potencia; o los **TFT**, muy populares en el diseño de pantallas planas.*

2.2. MOSFET de Acumulación.

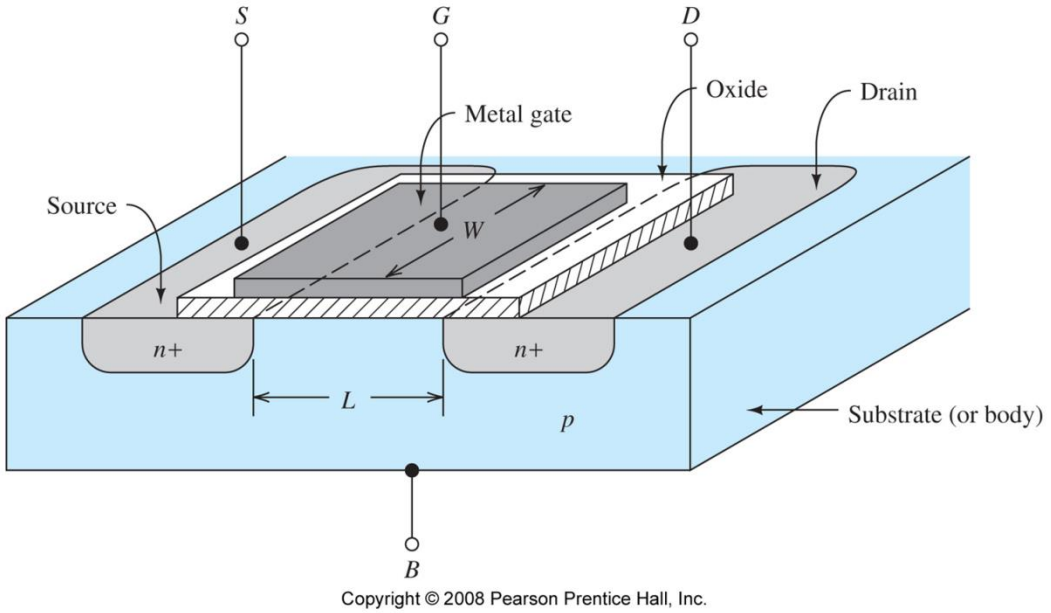
- Estructura y simbología

Canal n



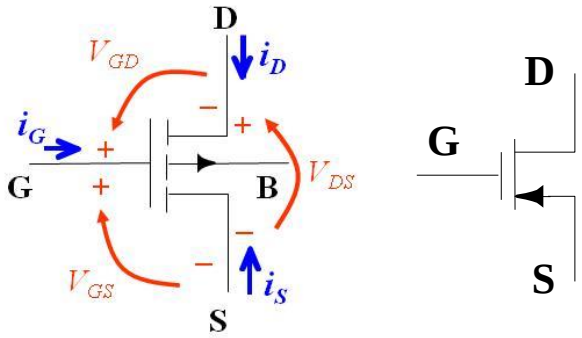
$i_G = 0 \Rightarrow i_D = i_S$

$v_{GS} = v_{DS} + v_{GD}$



Copyright © 2008 Pearson Prentice Hall, Inc.

Canal p



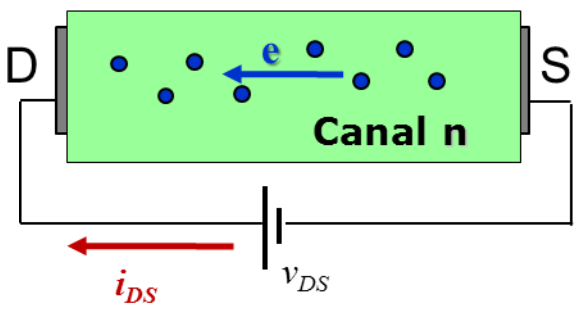
V_t = Tensión umbral (*threshold*): tensión de puerta necesaria para inducir un canal de signo opuesto al del substrato.

Nota: En el substrato (B=Bulk) a veces se instala un 4º terminal que modifica el comportamiento del MOSFET. Para que esto no suceda, B se conecta a S en los MOSFET de tres terminales.

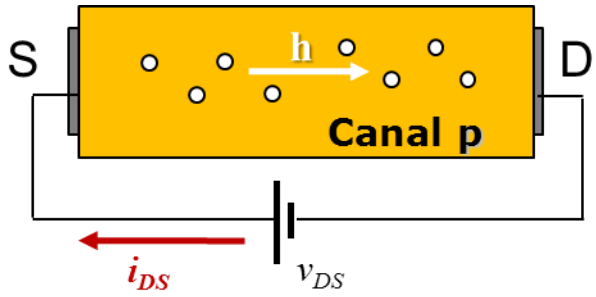
2.2. MOS-Acumulación. Estructura.

- **DRAIN** (DRENADOR) y **SOURCE** (FUENTE, SURTIDOR)
  - La funcionalidad del terminal como ***D*** y ***S*** la define la polarización teniendo en cuenta que la ***S*** será la fuente de portadores y ***D*** donde se drenan.
  - Si se polariza un semiconductor extrínseco se establece un canal (por donde se desplazan los portadores) por donde circula una corriente de portadores mayoritarios.

Canal n



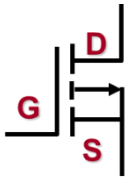
Canal p

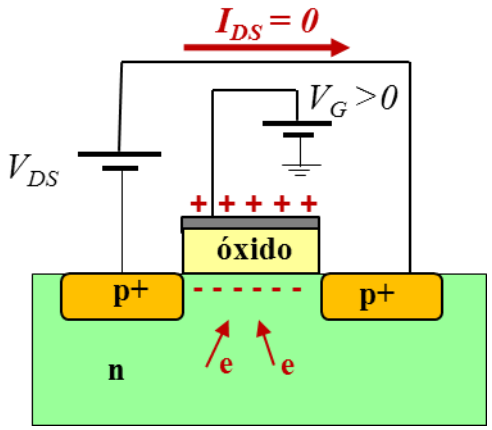


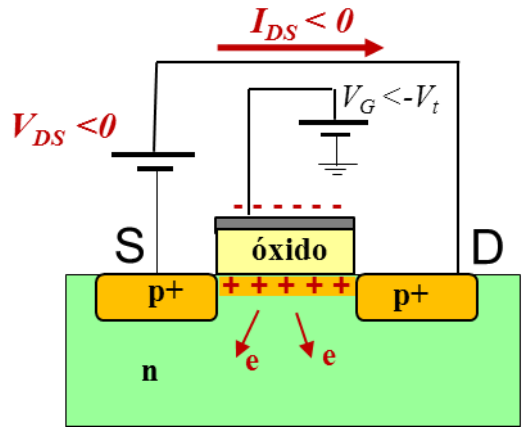
2.2. MOS-Acumulación. El canal: *n* y *p*.

- Formación del canal

Canal p
PMOS



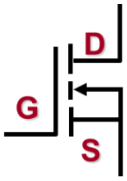


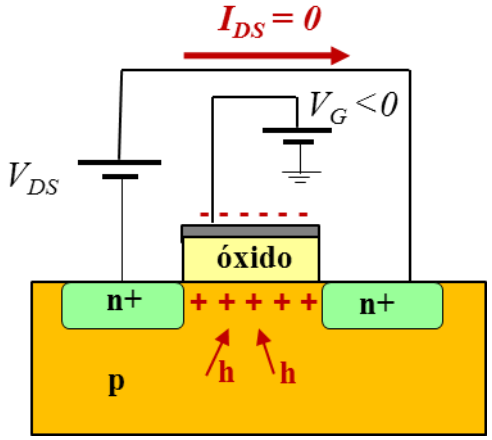


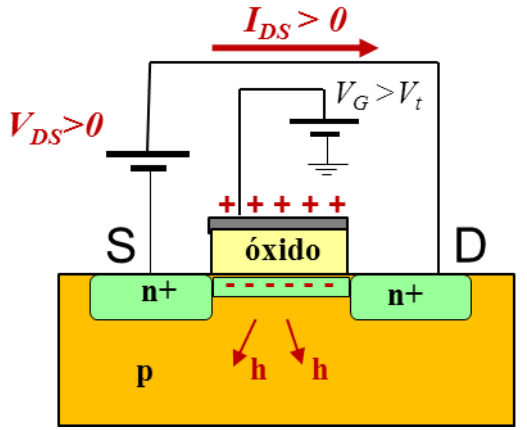
$v_{GS} > |V_t| \Rightarrow$ **formación del canal**

V_t : **Tensión umbral** (*threshold*)

Canal n
NMOS



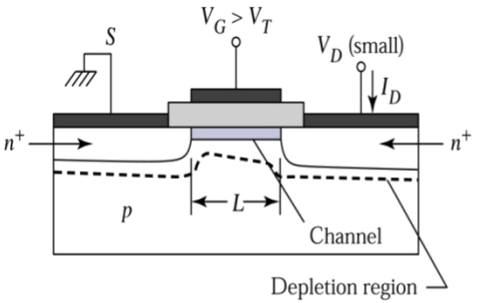


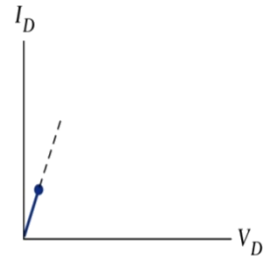


2.2. MOSFET de Acumulación.
Formación del canal: zonas de conducción.

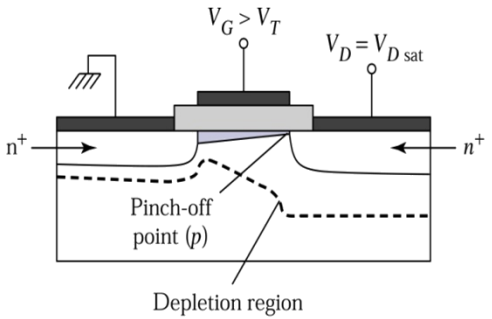
- Análisis cualitativo: NMOS

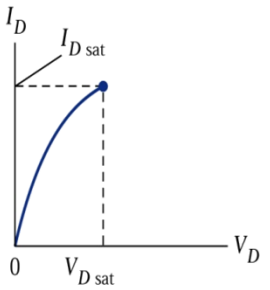
$V_{GS} > V_t > 0$ creación capa de inversión





$0 < V_D < V_{Dsat}$ aparece un corriente de drenador (I_D) lineal con V_D. Canal uniforme.

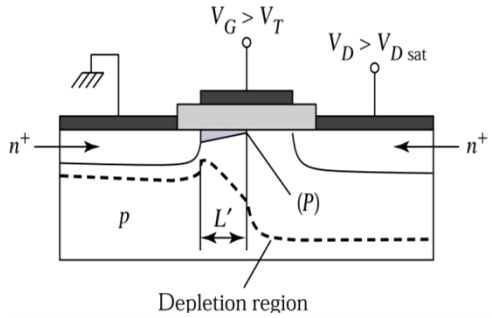


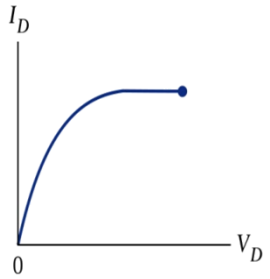


Estrangulamiento del canal;

$$V_{DS} \leq V_{GS} - V_t = V_{Dsat}$$

$$\Delta I_D / \Delta V_D = 0$$



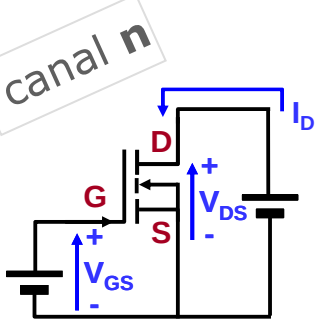


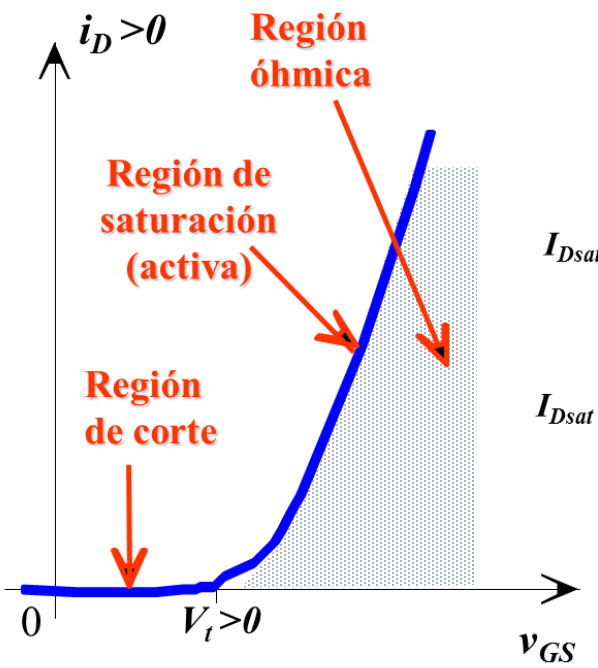
$V_{DS} > V_{DSsat}$; $I_D = I_{Dsat}$

Disminuye la longitud efectiva del canal.

2.3. MOSFET de Acumulación.
Canal *N*, curvas (*i-v*).

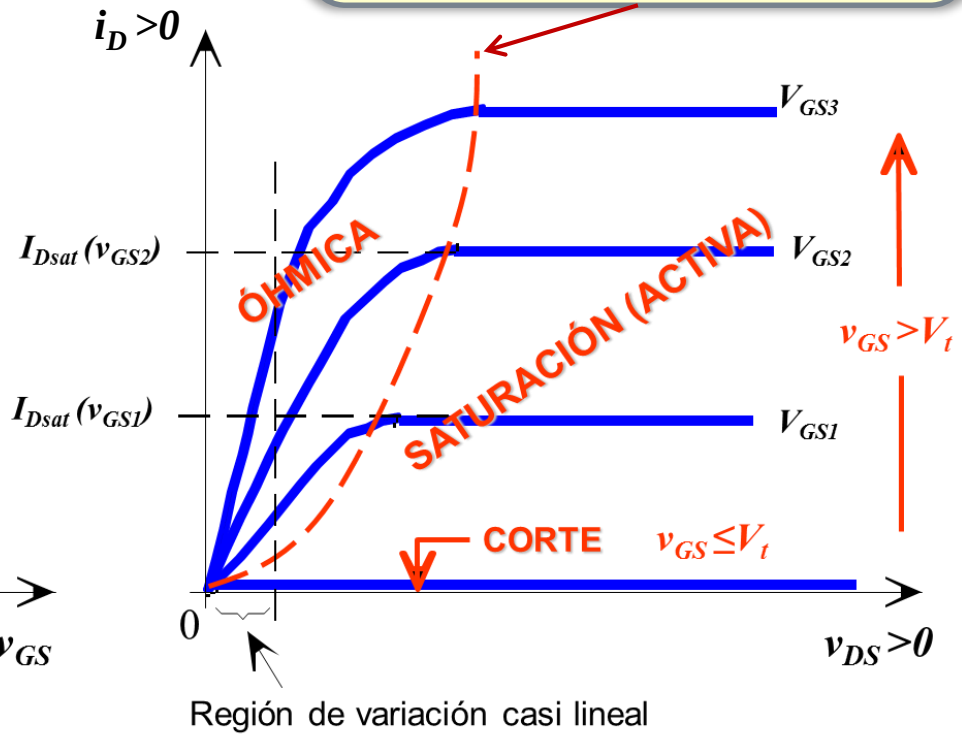
- Curvas características reales





Límite entre la zona óhmica y la de saturación (activa):

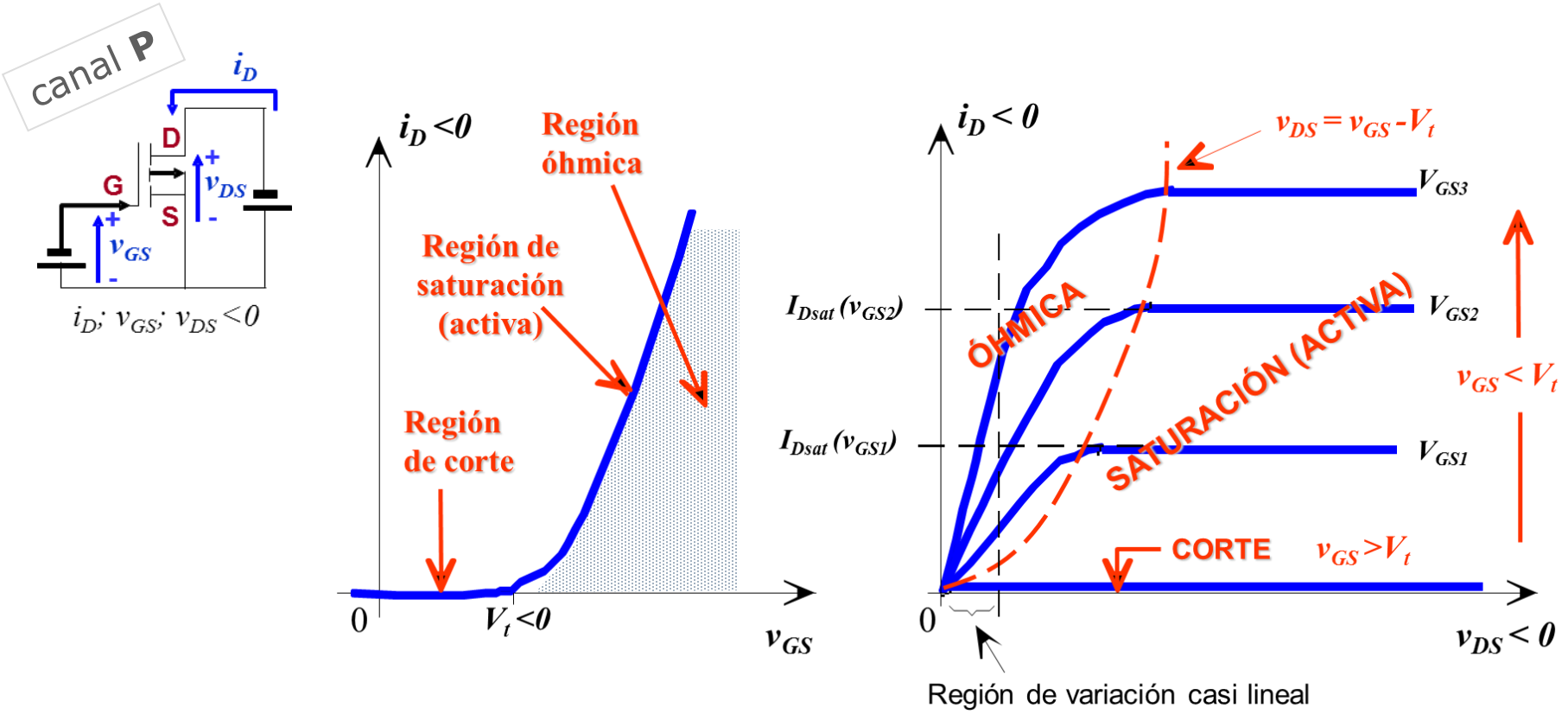
$$v_{DS} = (v_{GS} - V_t)$$



Observaciones: al no haber corriente de entrada → no hay una "*curva i-v de entrada*" En su lugar definimos la "*curva de transferencia*" $i_D=f(v_{GS})$

2.3. MOSFET de Acumulación.
Canal *P*, curvas (*i-v*).

- Curvas características reales



Canal p: Idéntico al del canal ***n*** pero hay que invertir los sentidos reales de tensiones y corrientes para operar en los mismas zonas de trabajo ⇨ $V_t<0$ y $v_{GS}<0$, $v_{DS}<0$, $i_{DS}<0$.

2.3. MOSFET de Acumulación.
Zona Óhmica.

- Análisis cuantitativo
  - Zona óhmica:

$$i_D = k\cdot\left((v_{GS}-V_t)\cdot v_{DS}-\frac{v_{DS}^2}{2}\right)$$

Línea casi recta con pendiente proporcional a $(v_{GS}-V_t)$

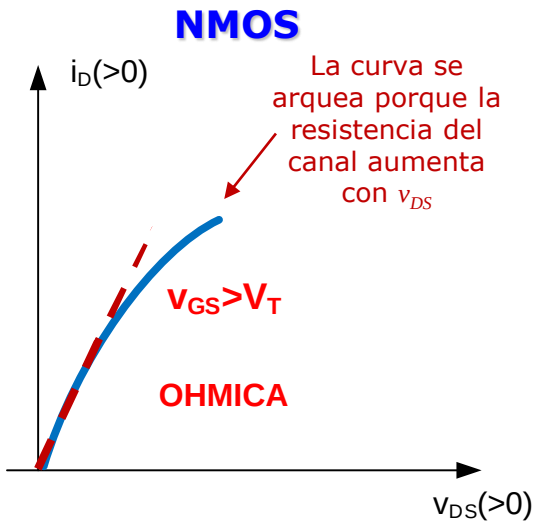
para $\frac{v_{DS}^2}{2} << \left((v_{GS}-V_t)\cdot v_{DS}\right)$

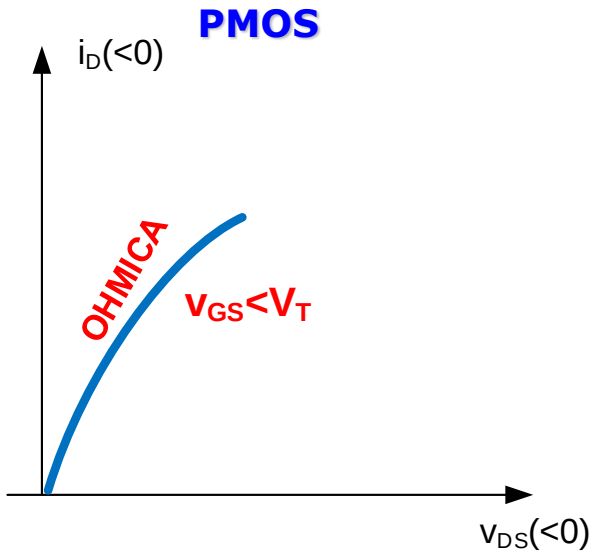
$$\Rightarrow i_D \approx k\cdot\left((v_{GS}-V_t)\cdot v_{DS}\right)$$

Para valores de

$$v_{DS} \le 0.2\left(v_{GS}-V_t\right)$$

$$R_{DSon} \approx \frac{v_{DS1}}{i_{DS1}} = \frac{1}{k\cdot\left(v_{GS}-V_t\right)}$$





2.3. MOSFET de Acumulación.
Zona de Saturación (Activa).

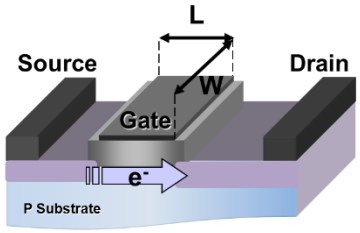
- Análisis cuantitativo
  - Zona saturación:

$$i_{Dsat} = \frac{k}{2}\left(v_{GS} - V_t\right)^2$$

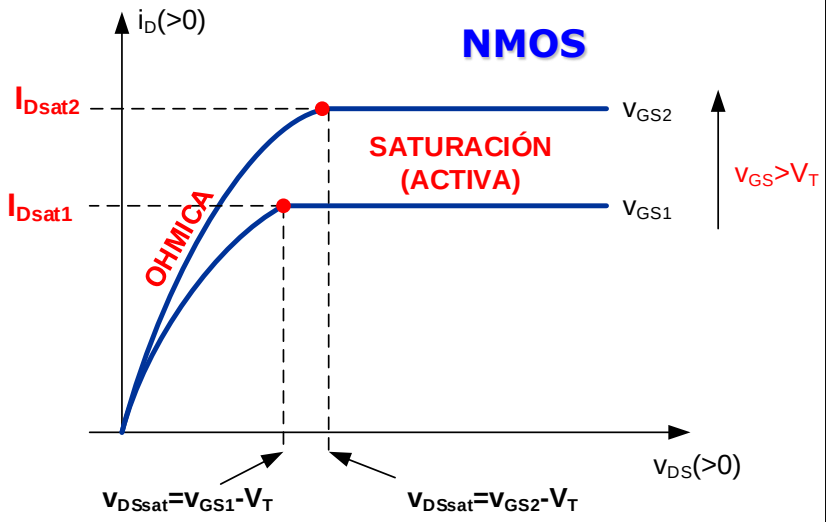
En donde:

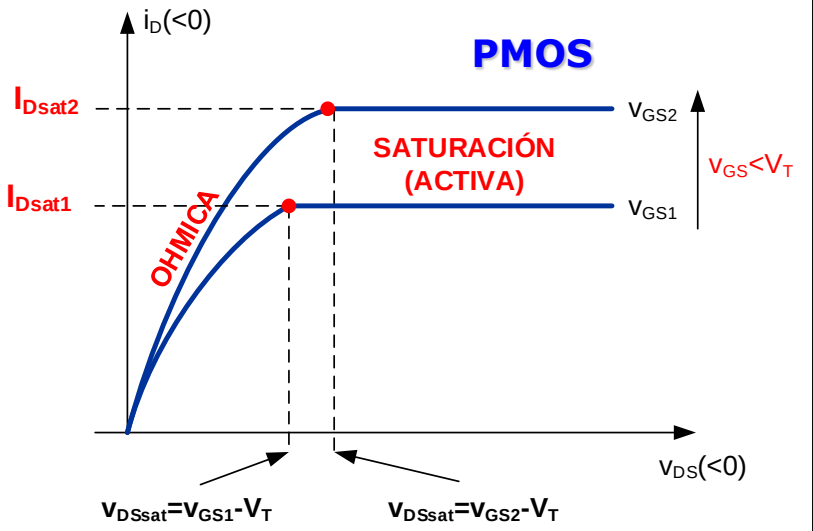
$$k = \frac{W}{L}\cdot\mu\cdot C_{OX}\left[\frac{A}{V^2}\right] \approx \frac{W}{L}\cdot 50_{NMOS}\,/\,25_{PMOS}\left[\frac{A}{V^2}\right]$$

$$C_{OX} = \left.\frac{\varepsilon_{OX}}{x_0}\right|_{SiO}$$



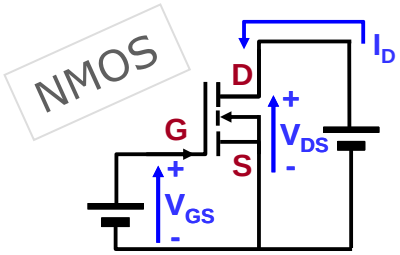
$$\textit{MOSFET Acumulación}\begin{cases}\text{Canal n: } k>0,\ V_T>0,\ i_D>0,\ v_{DS}>0\\ \text{Canal p: } k<0,\ V_T<0,\ i_D<0,\ v_{DS}<0\end{cases}$$

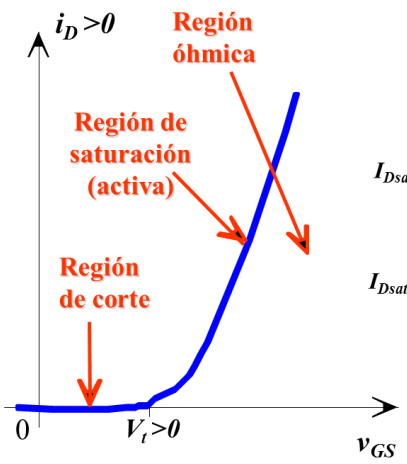


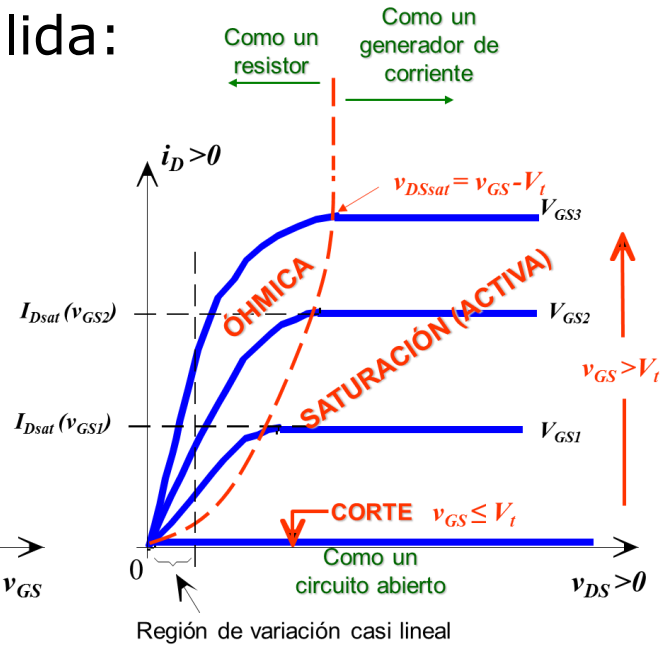


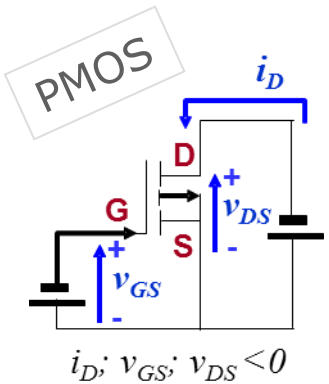
2.3. MOSFET de Acumulación.
Resumen, canales *N* y *P*: curvas y zonas.

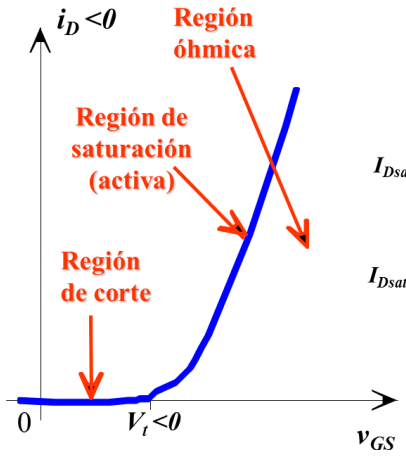
- F. transferencia y característica de salida:

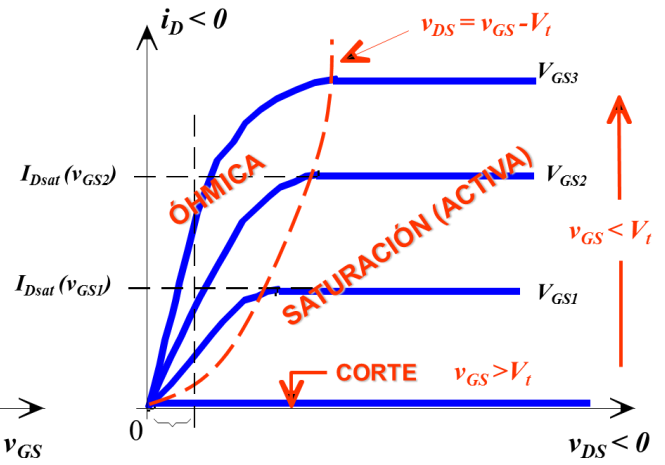






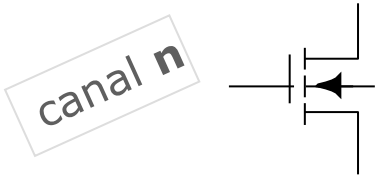






2.3. MOSFET de Acumulación.
Resumen, canal *N*: modelos lineales.

SIMBOLOGÍA Y SIGNOS

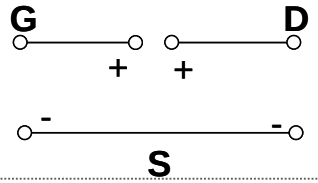


$V_t > 0,\ k > 0,\ v_{DS} \geq 0,\ i_D \geq 0$

CORTE

$v_{GS} \leq V_t$

$i_D = 0$



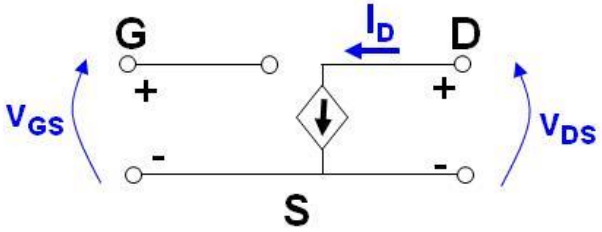
SATURACIÓN

$v_{DS} \geq V_{Dsat}$

$v_{GS} \geq V_t \geq 0$

$$i_{Dsat} = \frac{k}{2}(v_{GS} - V_t)^2$$

$$V_{DSsat} = v_{GS} - V_t$$



ÓHMICA

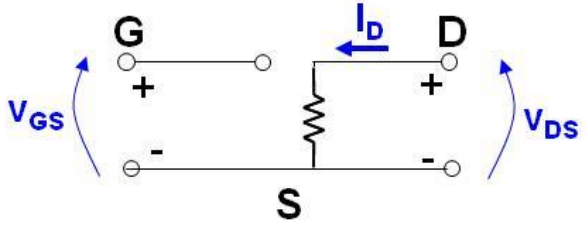
$v_{DS} \leq V_{Dsat}$

$v_{GS} \geq V_t \geq 0$

$$i_D \approx k \cdot (v_{GS} - V_t) \cdot v_{DS}$$

$$\Rightarrow |v_{DS}| \leq 0.2 |v_{GS} - V_t|$$

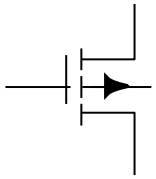
$$\Rightarrow R_{DSon} = \frac{1}{k \cdot (v_{GS} - V_t)}$$



2.3. MOSFET de Acumulación.
Resumen, canal *P*: modelos lineales.

SIMBOLOGÍA Y SIGNOS

canal **p**

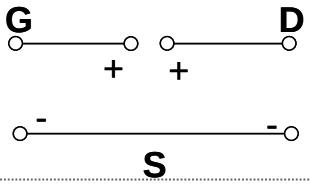


$V_t<0,\ k<0,\ v_{DS}\leq 0,\ i_D\leq 0$

CORTE

$v_{GS}\geq V_t$

$i_D=0$



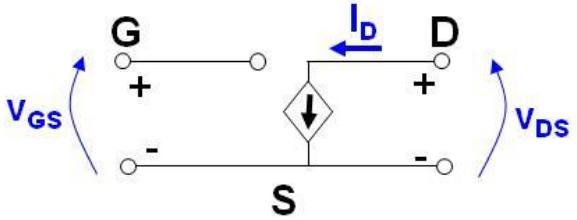
SATURACIÓN

$v_{DS}\leq V_{Dsat}$

$v_{GS}\leq V_t\leq 0$

$$i_{Dsat}=\frac{k}{2}(v_{GS}-V_t)^2$$

$$V_{DSsat}=v_{GS}-V_t$$



ÓHMICA

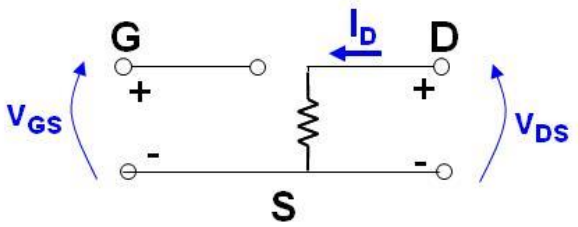
$v_{DS}\geq V_{Dsat}$

$v_{GS}\leq V_t\leq 0$

$$i_D\approx k\cdot(v_{GS}-V_t)\cdot v_{DS}$$

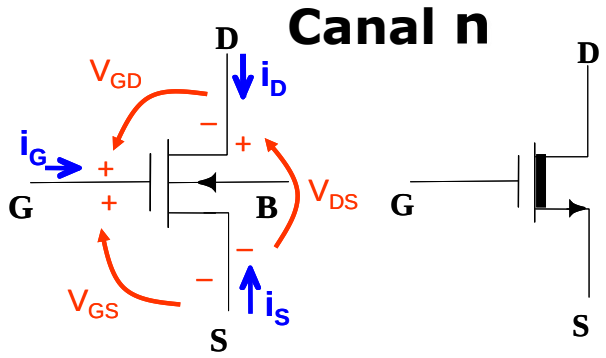
$$\Rightarrow |v_{DS}|\leq 0.2|v_{GS}-V_t|$$

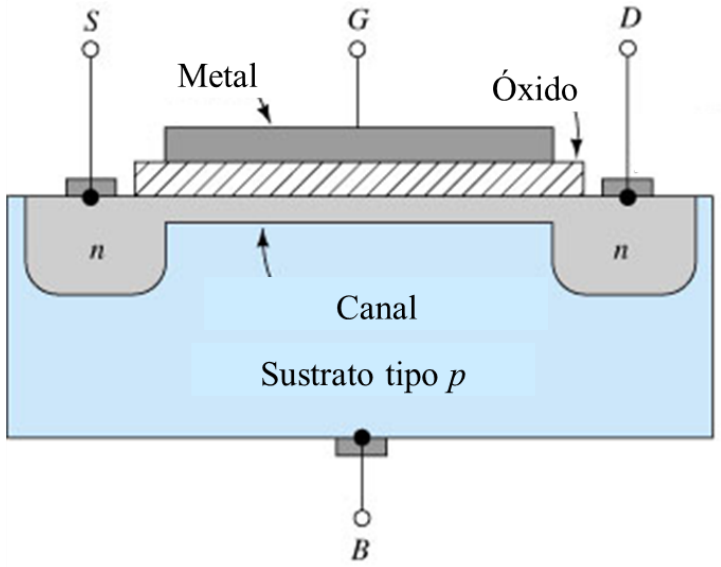
$$\Rightarrow R_{DSon}=\frac{1}{k\cdot(v_{GS}-V_t)}$$

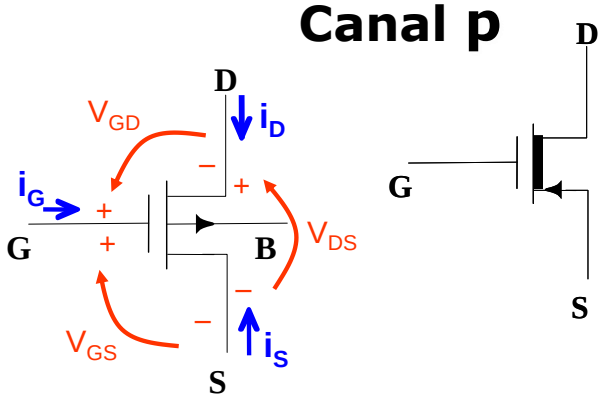


2.4. MOSFET de Deplexión.

- Estructura y simbología





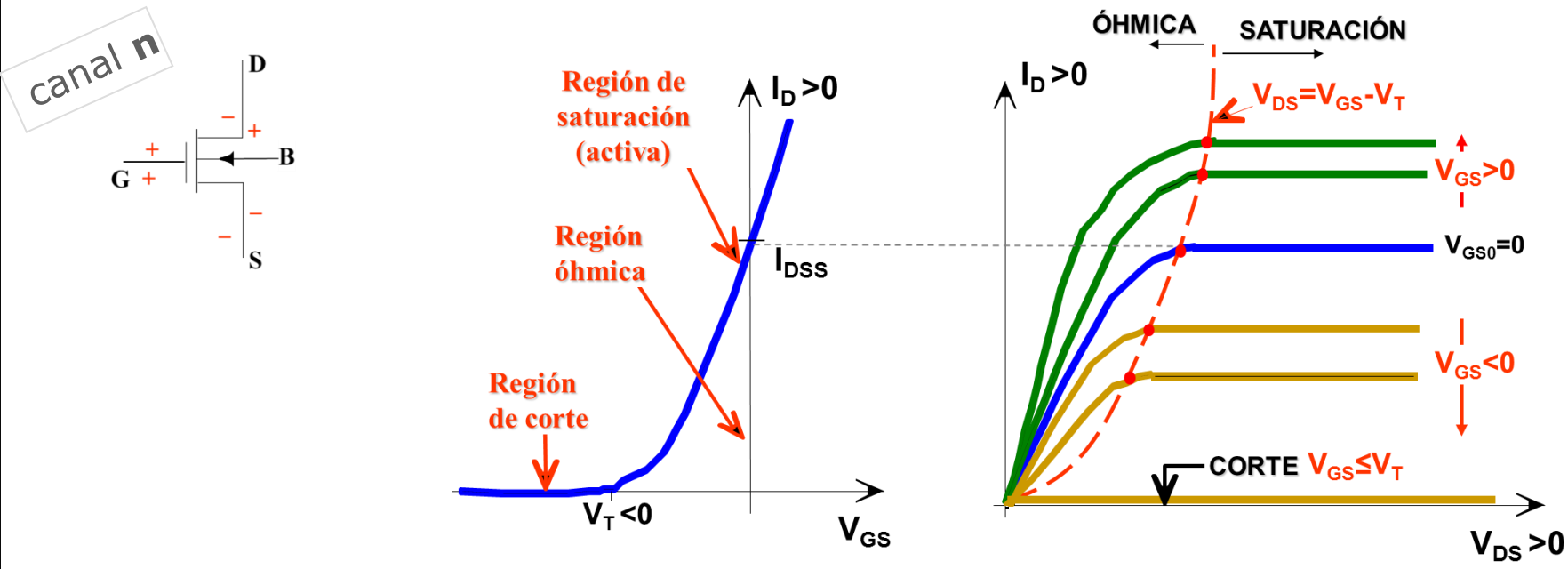


- **Existe canal** sin necesidad de aplicar tensión a la puerta:

  ⇨ "sin excitación → *M* = ***on***"

2.4. MOSFET de Deplexión.
Canal ***N***, curvas (*i-v*).

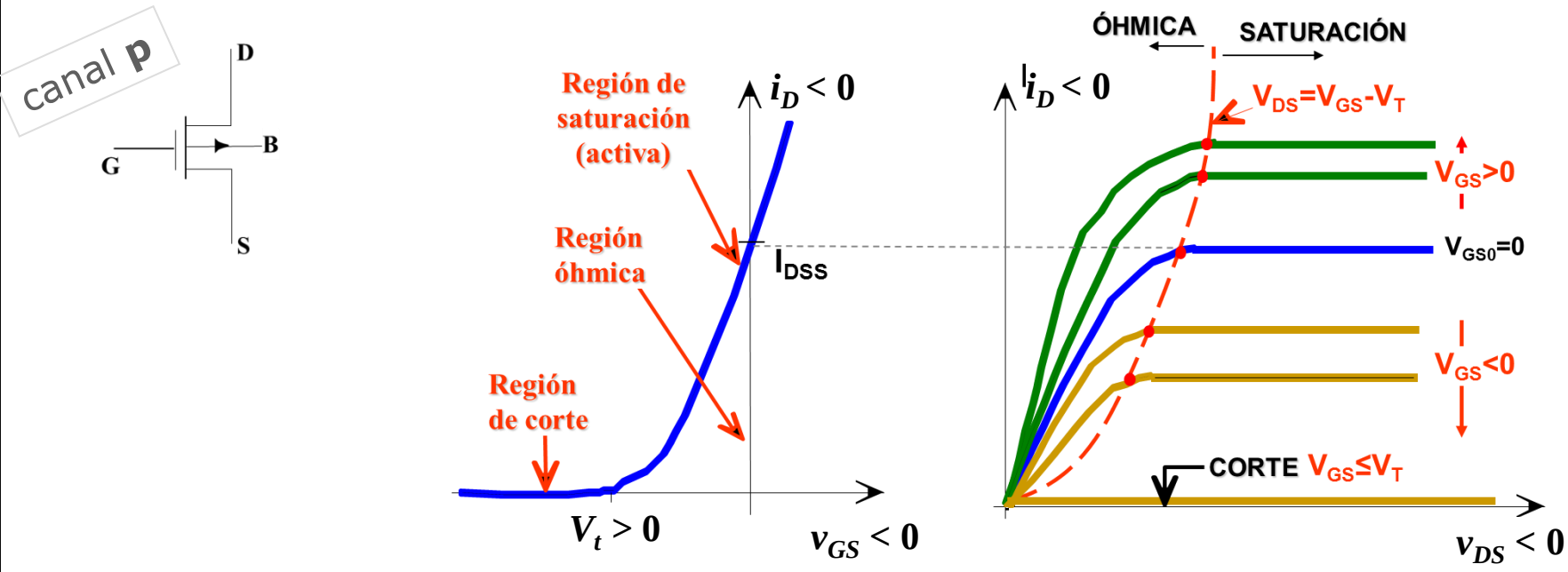
- Curva característica



- V_{GS} >0 ⇨ el canal se enriquece de electrones y aumentará la conducción (actúa como el transistor de enriquecimiento, con las mismas ecuaciones).
- I_{DSS}: corriente de saturación para V_{GS} =0
- V_{GS} < 0 ⇨ el canal se vacía de electrones disminuyendo la intensidad de drenador.

2.4. MOSFET de Deplexión.
Canal *P*, curvas (*i-v*).

- Curva característica



Canal p: Idéntico al del canal *n* pero invirtiendo los sentidos reales de tensiones y corrientes para operar en las mismas zonas de trabajo ⇨ $V_T>0$ y $V_{GS}<0$ para trabajar en acumulación.

2.4. MOS: Acumulación vs. Deplexión

Curvas de transferencia: comparativa.

- Curvas de transferencia $i_D = f(v_{GS})$ → semejanzas y diferencias:

Diferencia ***Acu.*** ↔ ***Dep.***

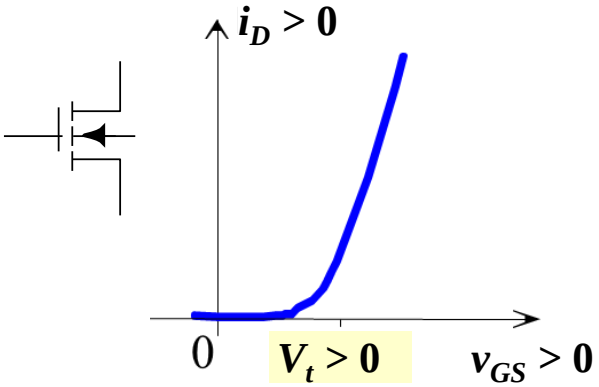
MOSFET acumulación

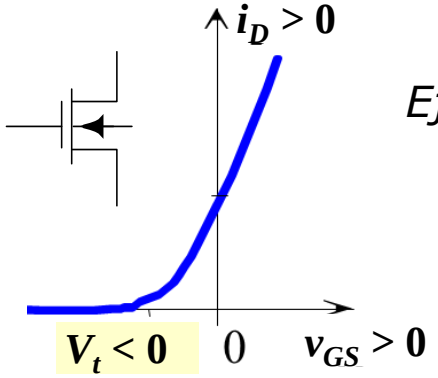
*Entrada cero → M=**OFF***

MOSFET deplexión

*Entrada cero → M=**ON***

Canal *N*

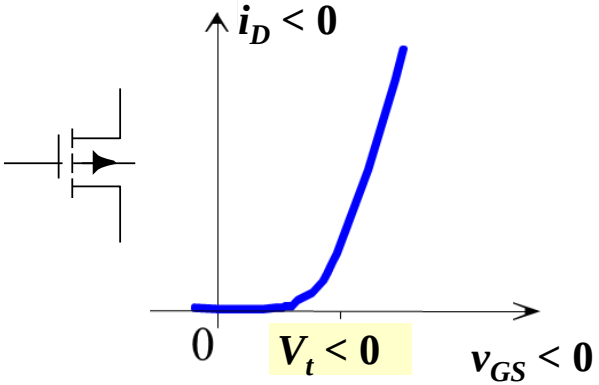


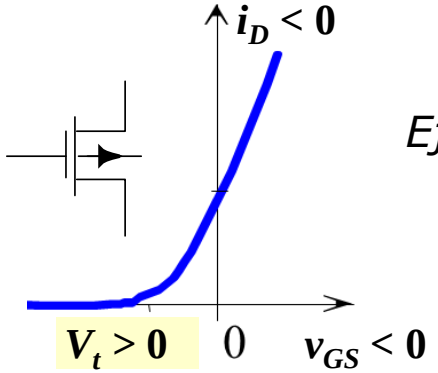


*Ejes de variables → **Positivos***

Diferencias ***n*** ↔ ***p***

Canal *P*





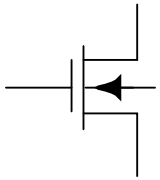
*Ejes de variables → **Negativos***

2.4. MOSFET de Deplexión.

Canal ***N***: zonas y modelos lineales.

SIMBOLOGÍA Y SIGNOS

canal **n**

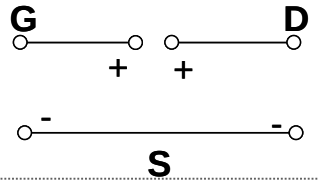


$V_t < 0,\ k > 0,\ v_{DS} \geq 0,\ i_D \geq 0$

CORTE

$v_{GS} \leq V_t$

$i_D = 0$



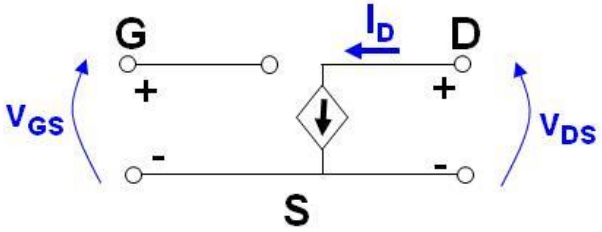
SATURACIÓN

$v_{DS} \geq V_{dsat}$

$v_{GS} \geq V_t$

$$i_{Dsat} = \frac{k}{2}(v_{GS} - V_t)^2$$

$$V_{DSsat} = v_{GS} - V_t$$



ÓHMICA

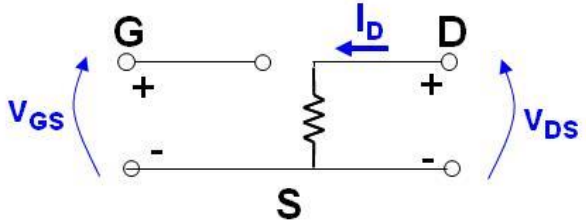
$v_{DS} \leq V_{Dsat}$

$v_{GS} \geq V_t$

$$i_D \approx k \cdot (v_{GS} - V_t) \cdot v_{DS}$$

$$\Rightarrow |v_{DS}| \leq 0.2 |v_{GS} - V_t|$$

$$\Rightarrow R_{DSon} = \frac{1}{k \cdot (v_{GS} - V_t)}$$

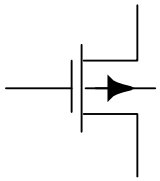


2.4. MOSFET de Deplexión.

Canal ***P***: zonas y modelos lineales.

SIMBOLOGÍA Y SIGNOS

canal **p**

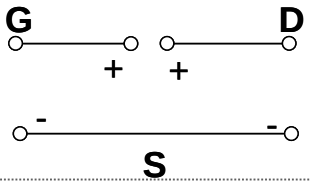


$V_t > 0,\ k < 0,\ v_{DS} \leq 0,\ i_D \leq 0$

CORTE

$v_{GS} \geq V_t$

$i_D = 0$



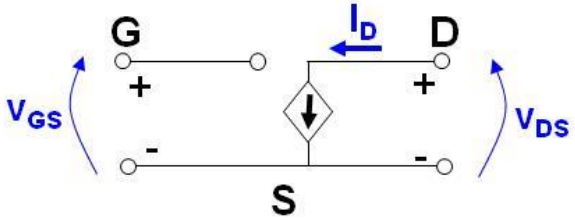
SATURACIÓN

$v_{DS} \leq V_{dsat}$

$v_{GS} \leq V_t$

$$i_{Dsat} = \frac{k}{2}(v_{GS} - V_t)^2$$

$$V_{DSsat} = v_{GS} - V_t$$



ÓHMICA

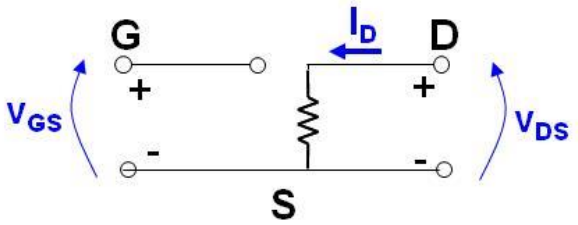
$v_{DS} \geq V_{Dsat}$

$v_{GS} \leq V_t$

$$i_D \approx k \cdot (v_{GS} - V_t) \cdot v_{DS}$$

$$\Rightarrow |v_{DS}| \leq 0.2 |v_{GS} - V_t|$$

$$\Rightarrow R_{DSon} = \frac{1}{k \cdot (v_{GS} - V_t)}$$

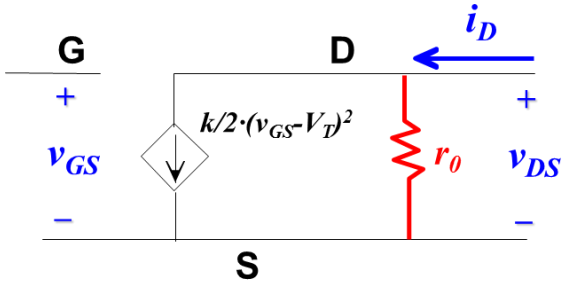


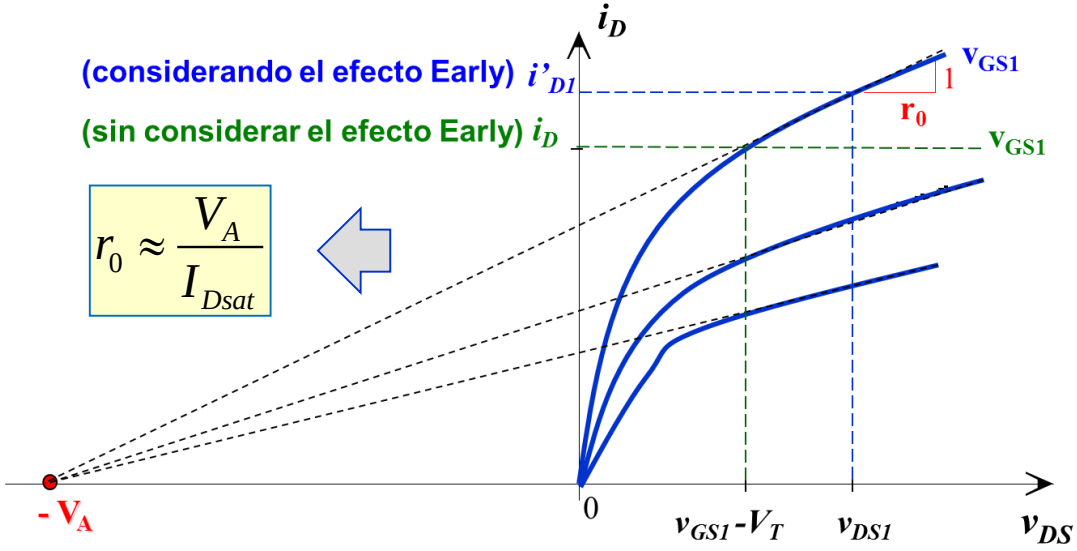
2.5. MOS: efectos de segundo orden.

- Modulación de longitud de canal: **efecto Early**
  - Visible sobre las curvas de salida en surtidor común

Zona de saturación:

$$i'_{DS}(v_{DS}) = \underbrace{\frac{k}{2}(v_{GS}-V_t)^2}_{I_{Dsat}} + \underbrace{\frac{v_{DS}}{r_0}}_{Efecto\ Early}$$

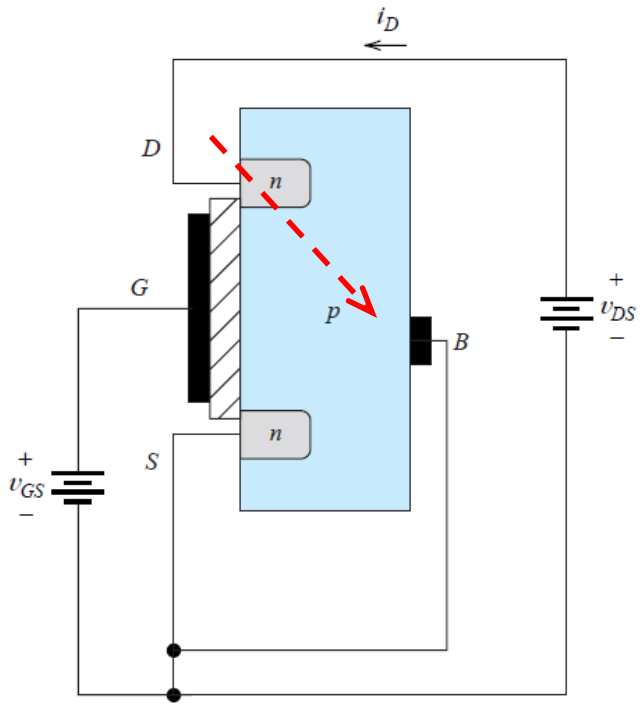


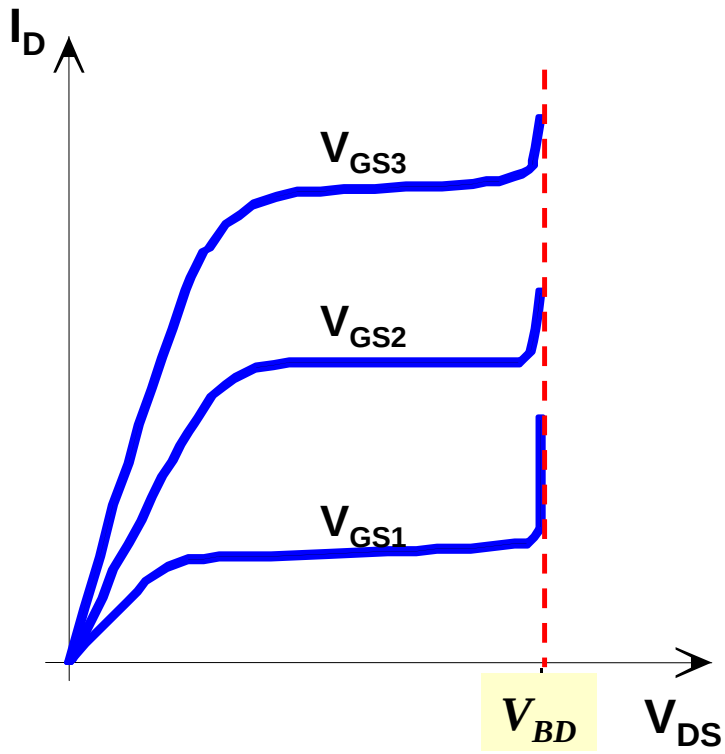


$$i_D = I_{DQ} + i_d = \frac{k}{2}(V_{GSQ} + v_{GS} - V_t)^2 \overbrace{\left[1 + \frac{V_{DSQ} + v_{DS}}{V_A}\right]}^{\text{Efecto Early}}$$

2.5. MOS: efectos de segundo orden.

- Tensión de ruptura (*BD= Break-Down*)
  - Máxima tensión de trabajo entre D y S → $V_{DS} < V_{BD}$.
    - *La corriente I_D deja de estar controlada y crece bruscamente.*
    - *En los MOSFET, ocurre por la ruptura de la unión entre D y B.*





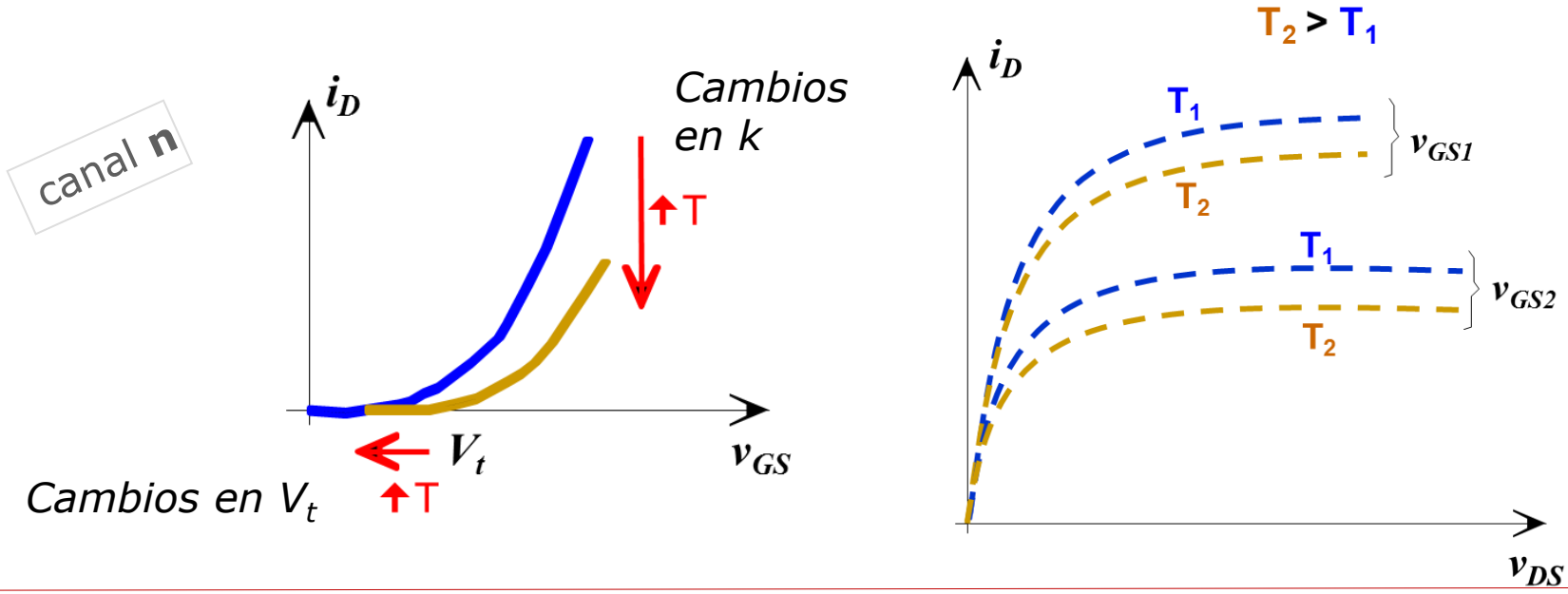
2.5. MOS: efectos de segundo orden.

- Efectos de la temperatura
  - $I_D = f(T)$ dado que la movilidad 'μ' de portadores es $f(T)$

$$\mu(T) = \mu(T_R)\cdot\left(\frac{T_R}{T}\right)^{\frac{3}{2}}, \text{ donde } \quad T_R = 300K$$

  - Esto causa cambios en la tensión umbral V_t y en la constante k

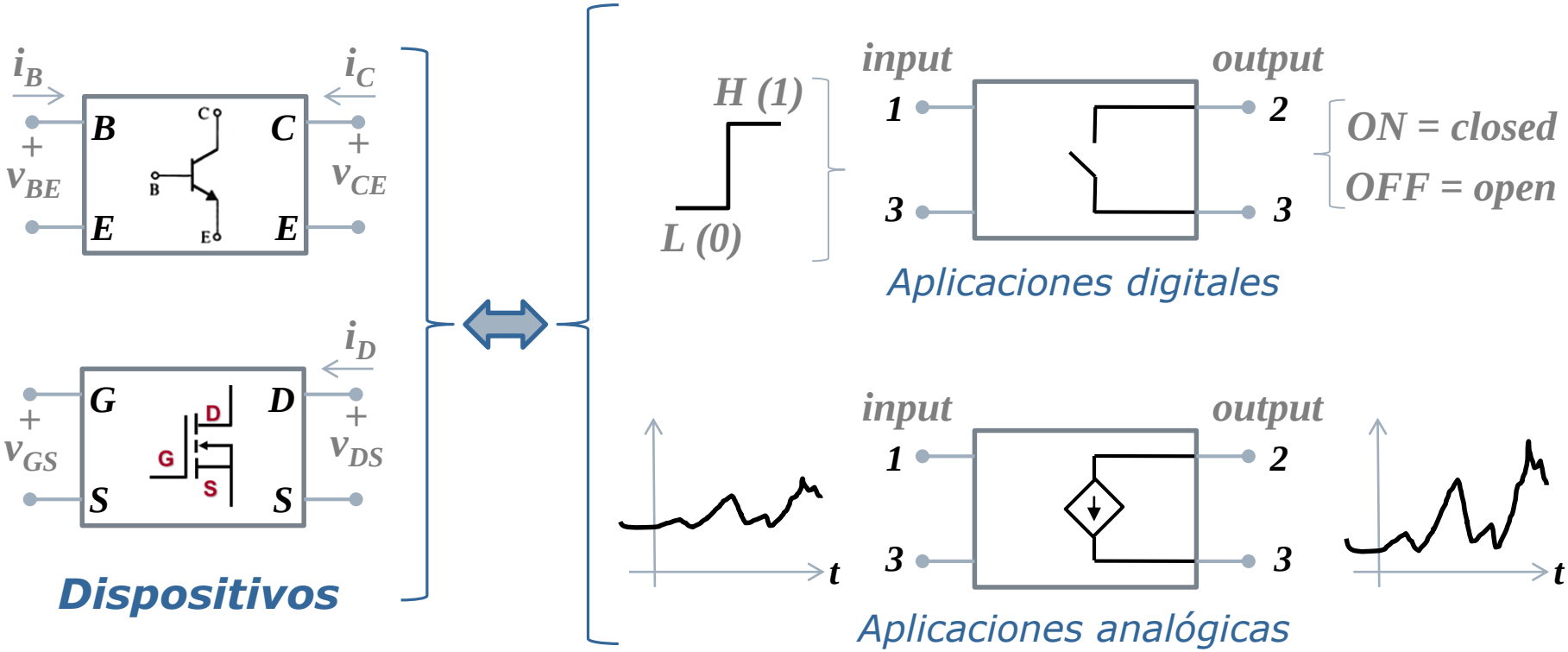
$$V_t(T) = V_t(T_R) \pm C\cdot(T - T_R)\begin{cases} - \text{ canales n} \\ + \text{ canales p} \end{cases}, \text{ donde C} \approx 2mV/^oC$$



3. Resumen: aplicaciones típicas

Los transistores como dispositivo controlado

- Las aplicaciones de los TRTs se relacionan con su capacidad de poder **controlar** su **comportamiento** (*modelo*) en salida:
  - **OFF** (*corte*); **ON** (*sat./óhmica*); **generador dependiente** (*Activa*)
  - Según el modelo, tenemos aplicaciones ***digitales*** o ***analógicas***



3. Resumen: comparativa general

Transistores unipolares vs. bipolares

FET	BJT
Control mediante ***tensión***: *tensión de puerta-fuente*	Control mediante ***corriente***: *corriente de base*.
Teóricamente dispositivo simétrico: *drenador y fuente, intercambiables*.	Teóricamente dispositivo **asimétrico**: *emisor y colector no intercambiables*.
Entrada sin consumo en DC: $\boldsymbol{I_g=0}$.	Entrada con consumo en DC: $\boldsymbol{I_B \neq 0}$.
Impedancia de entrada **muy alta** → puerta aislada en DC.	Impedancia de entrada **media** → efecto resistivo del orden de kΩ.
Menor ganancia de transconductancia, (g_m) que los BJT.	Mayor ganancia que los FET, favorece su aplicación en amplificadores.
Acusado comportamiento capacitivo: → menores frecuencias de trabajo.	Bajo comportamiento capacitivo: → mayores frecuencias de trabajo.
Mayor estabilidad térmica que los BJT.	Menor estabilidad térmica que los FET.
Sencillos de fabricar con una **alta integración**.	Mayor complejidad tecnológica y con **menor grado de integración**.

Transistores
Bibliografía

- Básica:
  - Allan R. Hambley. Electrónica, 2º edición.Ed. Prentice Hall 2008 (Capítulos 4 y 5).
  - Sedra-Smith. Circuitos Microelectrónicos. Capítulos 4 (secciones 4.1 y 4.2) y capítulo 5 (secciones 5.1 y 5.2)
  - Norbert R. Malik. CIRCUITOS ELECTRÓNICOS: Análisis, simulación y diseño. Ed. Prentice Hall. 1996 (Capítulos 4 y 5).

- Complementaria:
  - "The silicon engine". 1947→ invención del BJT, inicio de la serie en: http://www.computerhistory.org/siliconengine/invention-of-the-point-contact-transistor/
  - "The silicon engine". 1960 → MOSFET práctico, inicio de la serie en: http://www.computerhistory.org/siliconengine/metal-oxide-semiconductor-mos-transistor-demonstrated/

Control de revisiones.

- 2017-01-17. Versión inicial.
- 2017-01-26. Rectificaciones en la sección 3: eliminada una transparencia duplicada y actualizados los títulos. Actualización de la bibliografía. Cambios menores en transparencias 29, 30 y 44.