

T5. Transistores de efecto campo.

Transistores de efecto campo

- ¶ **Objetivos.**
- ¶ **Introducción.**
- ¶ **Estructura física y funcionamiento.**
- ¶ **Modos de operación.**
- ¶ **Funcionamiento en un circuito.**
- ¶ **Aplicaciones.**

Objetivos

- ❶ Entender el funcionamiento del transistor de efecto campo.
- ❷ Resolver circuitos que contienen estos transistores.
- ❸ Conocer (y entender) algunas de sus aplicaciones principales.

Introducción

💡 Inconvenientes del transistor bipolar.

» **Alto consumo (relativamente).**

- ▣ Tensión umbral de los diodos.

- ▣ I_B de control.

- ▣ Sus circuitos requieren siempre de resistencias.

» Circuitos resistivos → implementación de resistencias.

💡 Solución: Transistor de efecto campo (FET: Field Effect Tr.).

» **Características generales:**

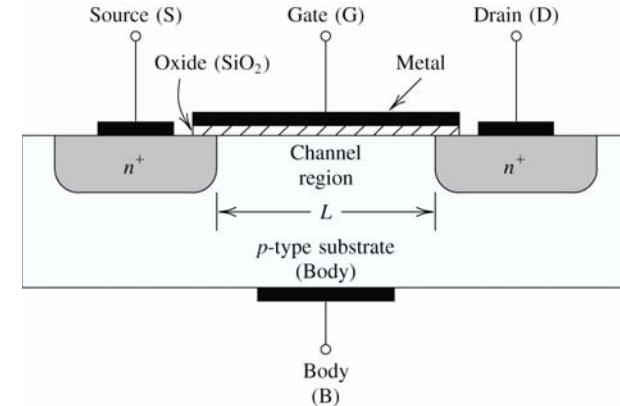
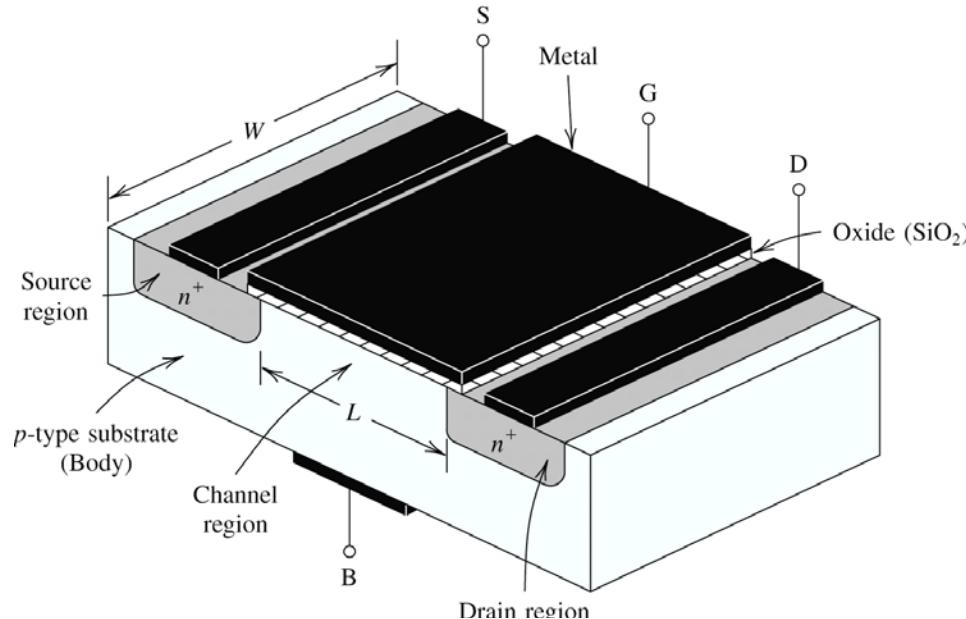
- ▣ Se controla la resistencia de un canal (sin consumo en el terminal de control).

- ▣ Como poseen una resistencia, no es necesario (en general) implementar resistencias.

Estructura física y funcionamiento

💡 Estructura física:

- » 3 terminales: Source, Gate (control), Drain. (4º: substrato).
- » Simétrico: Source = Drain.
- » Óxido entre Gate (puerta) y substrato.



Pentium IV de Intel

Medida de la oblea = 30 cm
Número de micros/oblea = 700
Densidad = 80 millones de transistores/Chip

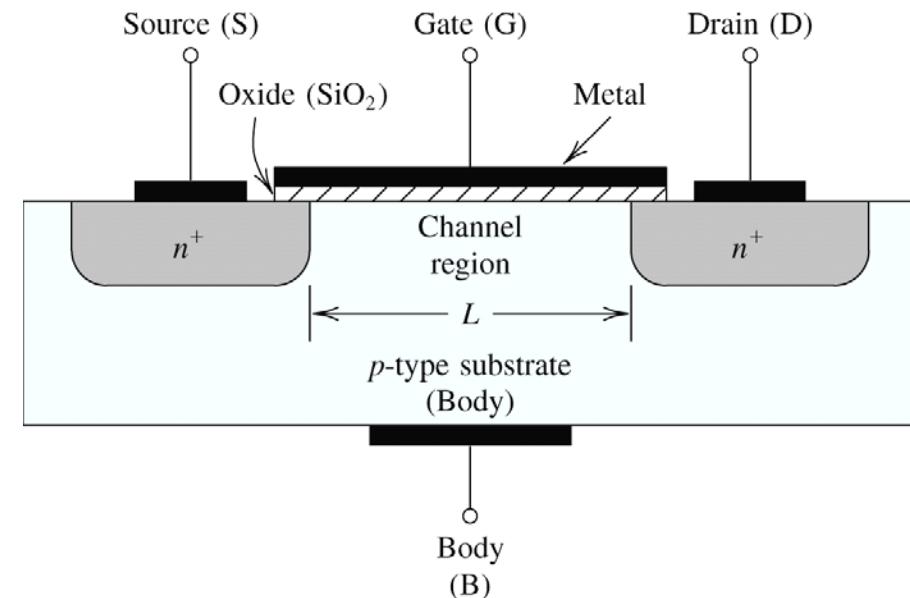
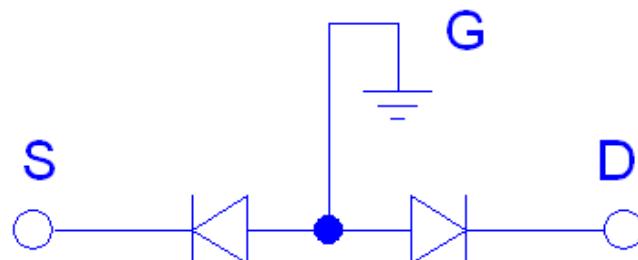
Proceso = 0.13 μm

Grosor de puerta = 1.2 nm (4 monocapas de SiO₂)
Longitud de canal (L)= 70 nm
Metalización = 6 niveles

Estructura física y funcionamiento

💡 Funcionamiento:

- » Por G (gate; puerta) NUNCA circulará corriente (en DC).
- » Si $V_G = V_S = V_D = 0$:
 - ▣ No puede circular corriente entre S y D.



Estructura física y funcionamiento

💡 Funcionamiento: (cont.)

- » A partir de un valor de la tensión V_{GS} se crea un canal conductivo entre D y S. Esta tensión es la tensión umbral, indicado por V_T). (no es el voltage térmico).
 - ▣ Por tanto, si se aplica una diferencia de tensión entre S y D, podrá circular corriente.
 - » Por regla general, a mayor V_{GS} , más conductivo (menos resistivo) es el canal.

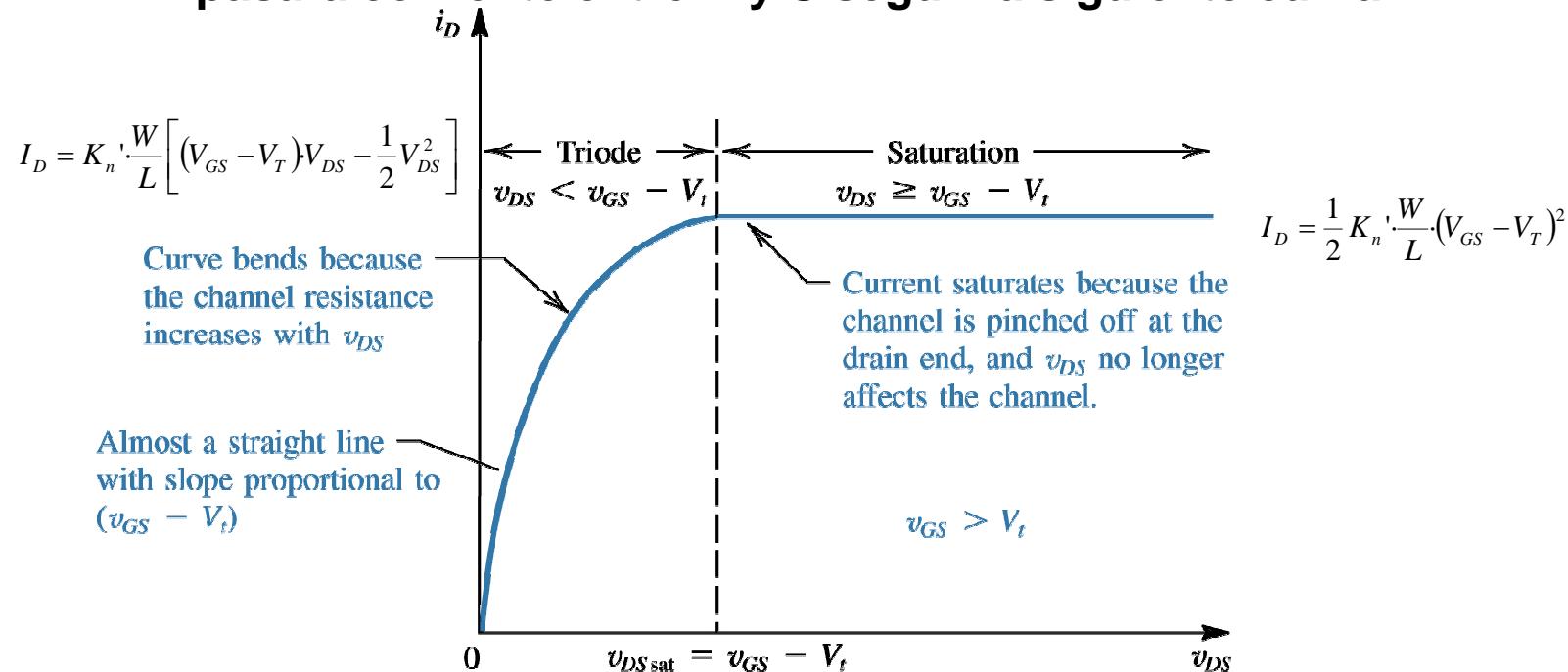
Estructura física y funcionamiento

💡 Curva característica: (como resistencia no-lineal)

» Corte: $V_{GS} < V_T$.

» Triodo y saturación.

■ Si $V_{GS} > V_T$, al aplicar una diferencia de tensión entre D y S, pasará corriente entre D y S según la siguiente curva:



Comportamiento en un circuito

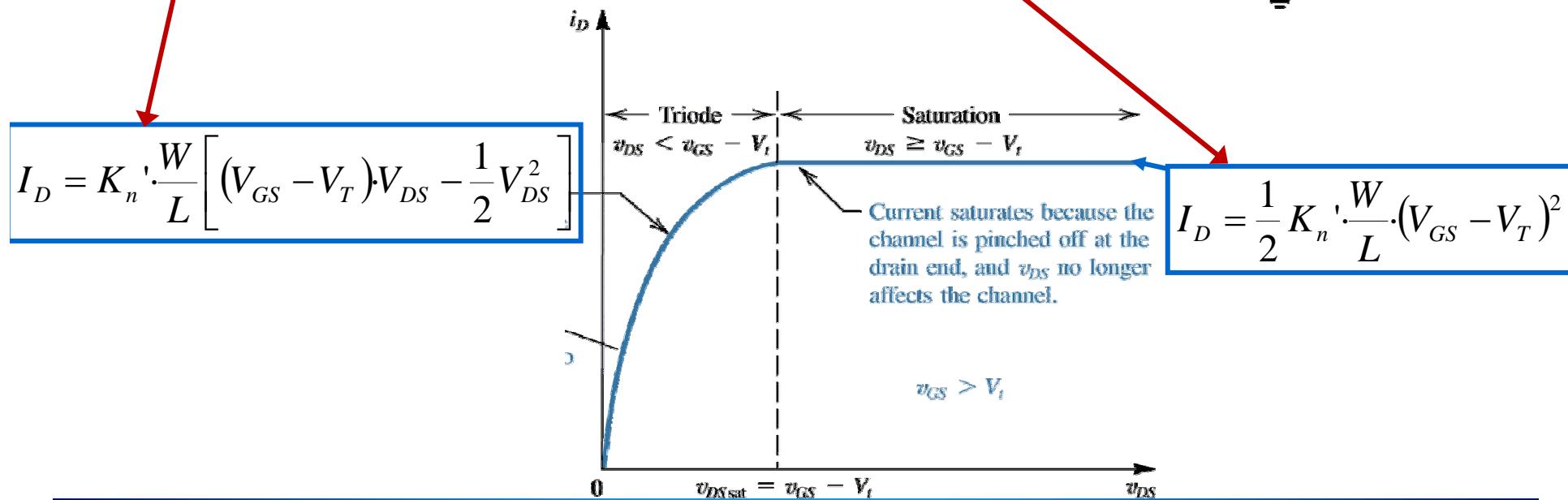
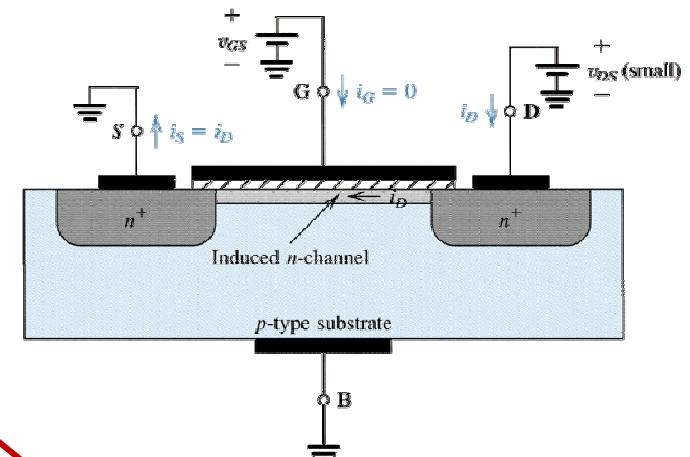
💡 3 zonas de trabajo:

» Siempre $I_S = I_D$

» Corte: $V_{GS} < V_T \rightarrow I_S = I_D = 0$

» Triodo: $V_{GS} > V_T$ y $V_{DS} < V_{GS} - V_T$

» Saturación: $V_{GS} > V_T$ y $V_{DS} > V_{GS} - V_T$



Comportamiento en un circuito

$$I_D = K_n' \cdot \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right]$$

$$I_D = \frac{1}{2} K_n' \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_T)^2$$

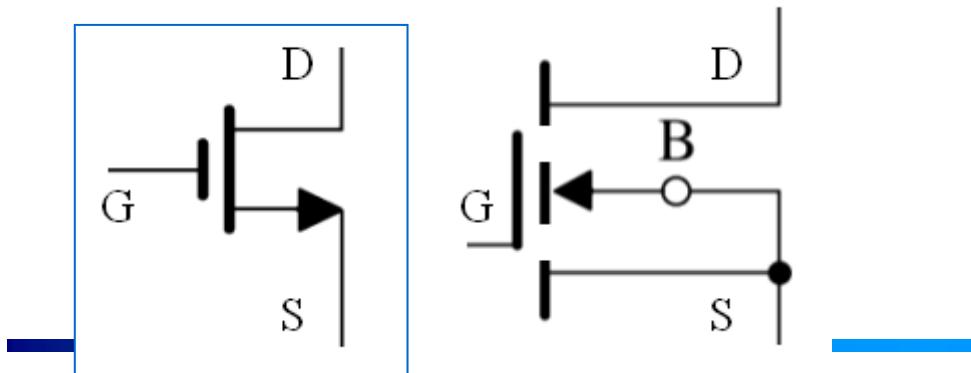
- » L y W son las dimensiones del canal (longitud i anchura).
- » W/L se le llama la relación de aspecto.
- » K_n' : transconductància, donde $K_n' = \mu_n C_{ox}$.
 - donde $\mu_n = 580 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ y $C_{ox} = \epsilon_{ox}/t_{ox}$.
 - y $\epsilon_{ox} = 3.5 \cdot 10^{-13} \text{ F/cm}$ y t_{ox} el grosor del óxido de puerta.

Comportamiento en un circuito

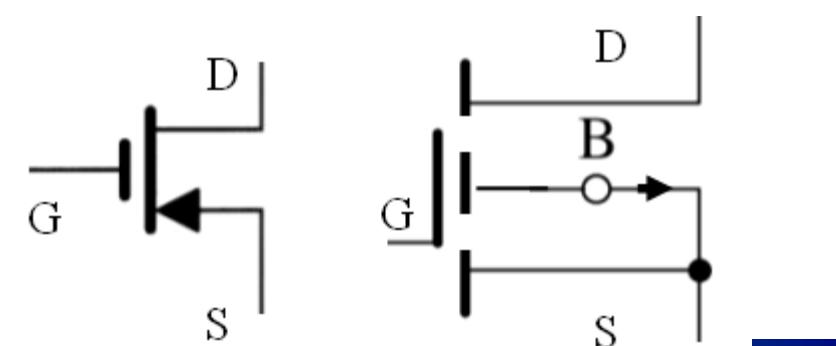
💡 Símbolos:

- » Símbolos con y sin substrato (B:Body/Bulk).
- » El más habitual, sin substrato.
- » Convenio entre S y D: Tomar S donde la tensión es menor.
(Por tanto, siempre sabremos que $V_D > V_S$).
- » Flecha de S: Como si fuese diodo entre substrato y S.
- » Si hay substrato: Flecha en substrato. Como diodo entre substrato y canal.

NMOS



PMOS



Comportamiento en un circuito

💡 Curva característica: $I_D(V_{DS})$ para distintas V_{GS} .

» 3 zonas:

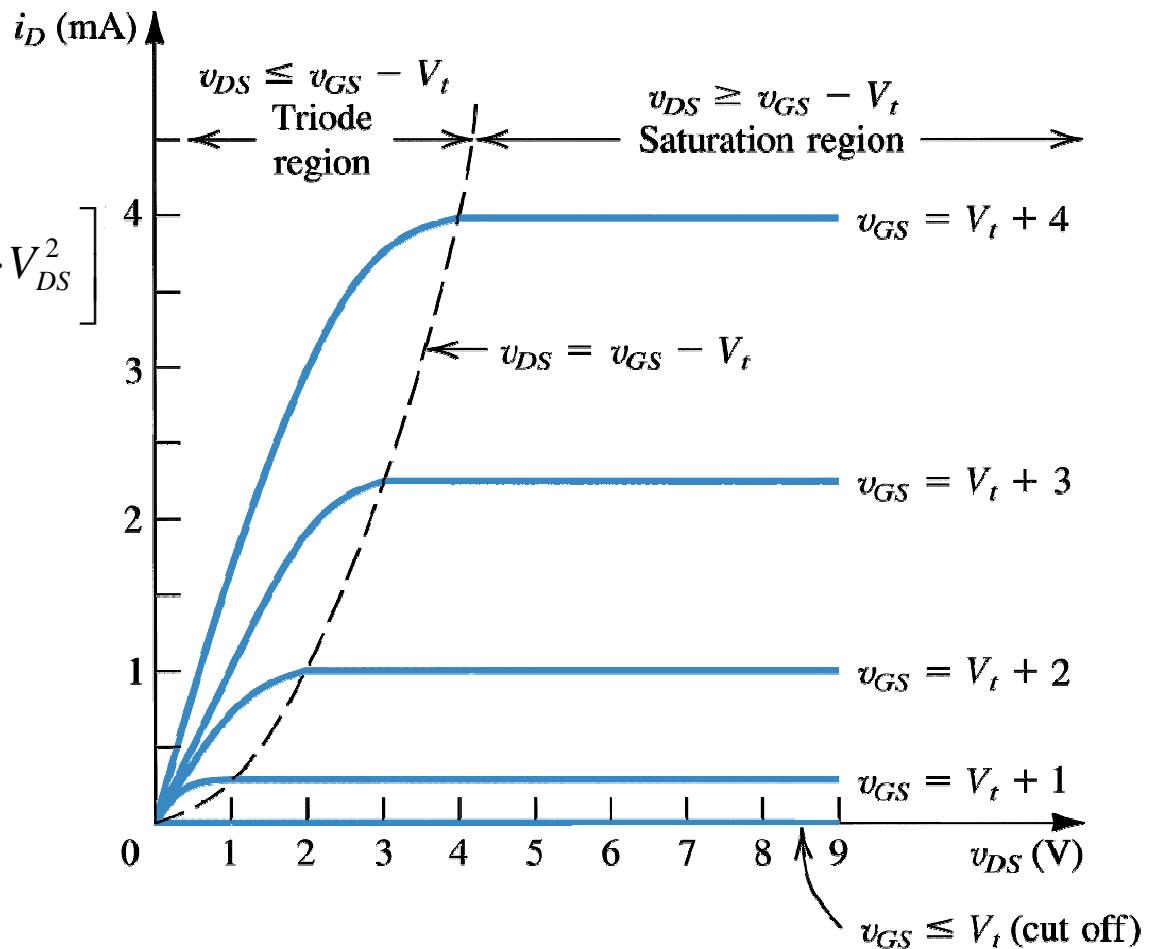
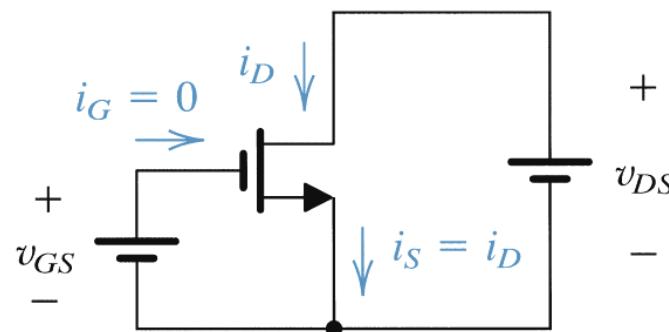
▣ Corte.

▣ Triodo:

$$I_D = K_n \cdot \frac{W}{L} \cdot \left[(V_{GS} - V_T) \cdot V_{DS} - \frac{1}{2} \cdot V_{DS}^2 \right]$$

▣ Saturación:

$$I_D = \frac{1}{2} K_n \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_T)^2$$



Comportamiento en un circuito

💡 Curva característica: (cont.)

» La zona de triodo puede dividirse en dos:

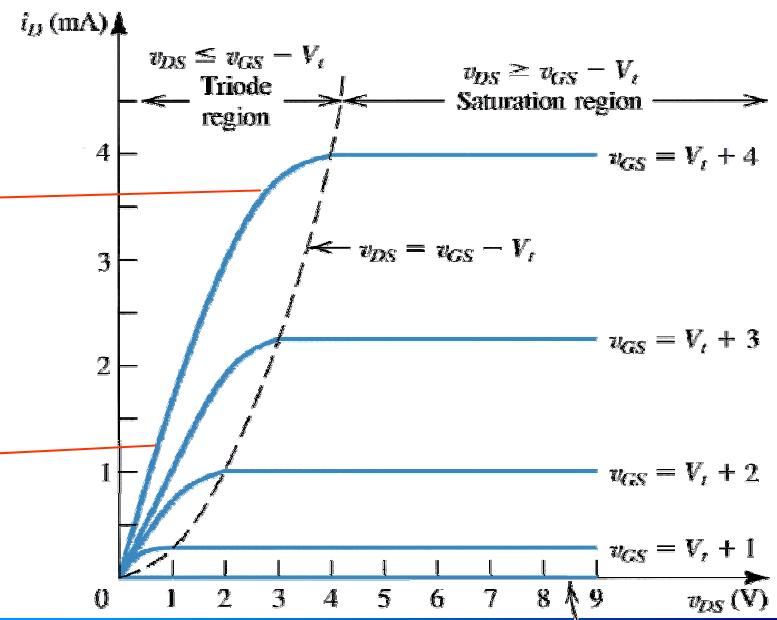
- ▣ **V_{DS} altos ($V_{DS} \sim V_{GS}$)**. $I_D = K_n \cdot \frac{W}{L} \cdot \left[(V_{GS} - V_T) \cdot V_{DS} - \frac{1}{2} \cdot V_{DS}^2 \right]$

- ▣ **V_{DS} bajos ($V_{DS} \ll V_{GS}$)**. $I_D \cong K_n \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_T) \cdot V_{DS}$

- ▣ $V_{DS} = R_{\text{canal}} \cdot I_D$

$$I_D = K_n \cdot \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_T) \cdot V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right]$$

$$I_D \cong K_n \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_T) \cdot V_{DS} \rightarrow R_{DS} = \frac{V_{DS}}{I_D} = \frac{1}{K_n \cdot \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)}$$



Comportamiento en un circuito

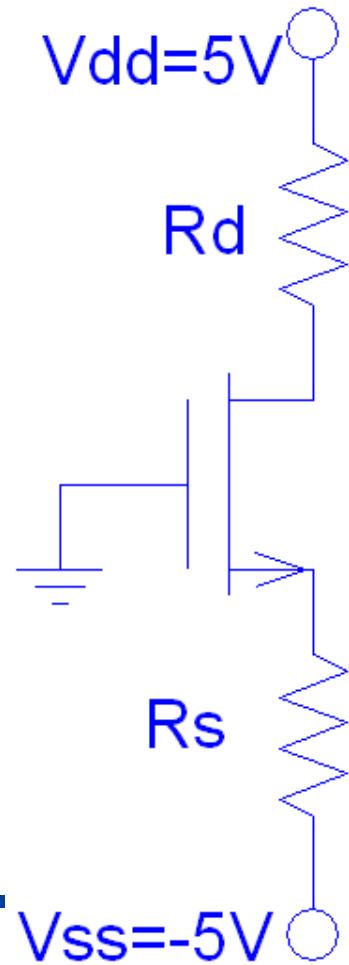
💡 Procedimiento general de resolución de circuitos:

- » $I_G=0$ siempre → Facilita mucho la resolución de circuitos. En muchas ocasiones, V_G podrá obtenerse independientemente del transistor.
- » $I_S=I_D$ siempre → Tomamos sólo una I (I_D).
- » Intentar determinar a priori el modo de trabajo de los transistores o descartar alguno (ej: corte). ($V_{DS} > V_{GS} - V_T$; $V_{DG} > V_T$).
- » Si no se conoce el modo, suponer saturación (más sencillo). Expresar las tensiones en función de I_D y substituir en la expresión característica ($I_D(V_{GS}, V_{DS})$). Obtenemos así I_D .
- » Aplicamos Kirchhoff a las partes del circuito que sean necesarias.
- » Calcular las tensiones a partir de las corrientes obtenidas.
- » Comprobar que las tensiones obtenidas cumplen la condición de saturación ($V_{GS} > V_T$ y $V_{DS} > V_{GS} - V_T$).
- » Si no la cumple, resolver igualmente pero utilizando la expresión en modo de triodo (o triodo lineal).

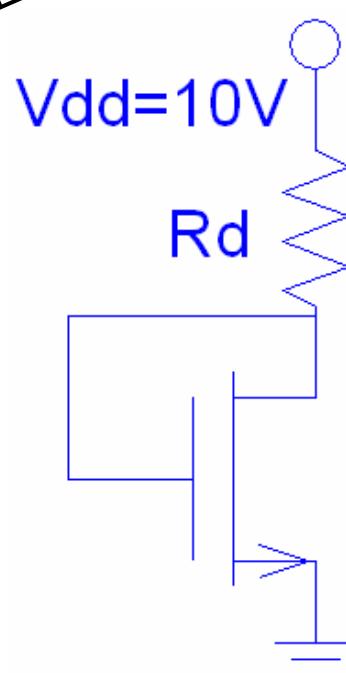
Comportamiento en un circuito

Resolución de circuitos:

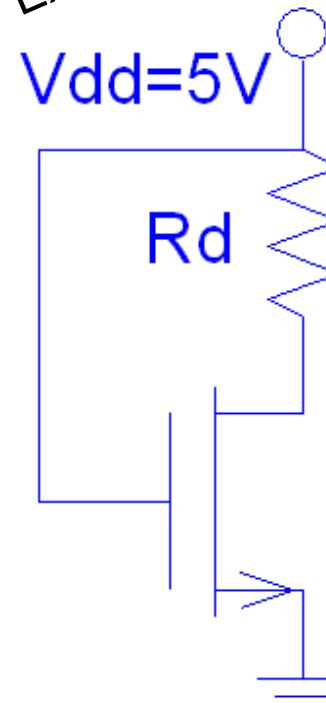
Exemple 1



Exemple 2



Exemple 3



Aplicaciones analógicas

Aplicaciones analógicas:

» Amplificador:

■ Asumimos operación en saturación:

$$V_{DS}^T > V_{GS}^T - V_T \longrightarrow V_{DS} + v_{DS} > V_{GS} + v_{GS} - V_T$$

$$\Rightarrow I_D^T = \frac{1}{2} K_n \cdot \frac{W}{L} (V_{GS} + v_{GS} - V_T)^2 = \frac{1}{2} K_n \cdot \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2 + K_n \cdot \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T) v_{GS} + \frac{1}{2} K_n \cdot \frac{W}{L} v_{GS}^2$$

■ Como V_{GS} es muy pequeña comparada con V_{GS} :

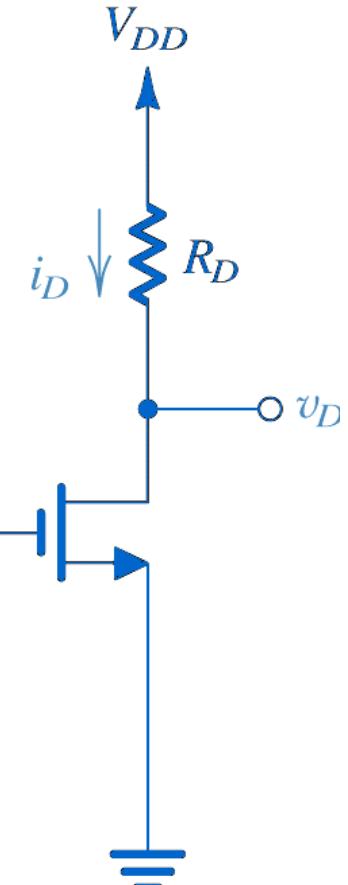
$$K_n \cdot \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T) \cdot v_{GS} \gg \frac{1}{2} K_n \cdot \frac{W}{L} \cdot v_{GS}^2 \Rightarrow v_{GS} \ll \frac{1}{2} (V_{GS} - V_T)$$

■ Esta es la condición de pequeña señal. v_{gs}

$$\Rightarrow I_D^T \approx \frac{1}{2} K_n \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_T)^2 + K_n \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_T) \cdot v_{GS} = I_D + i_D$$

donde $I_D = \frac{1}{2} K_n \cdot \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2$ y $i_D = K_n \cdot \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T) v_{GS}$

$$Tomamos g_m = \frac{i_D}{v_{GS}} = K_n \cdot \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T) \Rightarrow v_D = -i_D \cdot R_D \Rightarrow \frac{v_D}{v_{GS}} = -g_m \cdot R_D$$



Aplicaciones analógicas

Aplicaciones analógicas: (cont.)

» Espejo de corriente:

- Q1: D y G cortocircuitados → saturación ($V_{DS} > V_{GS} - V_T$):

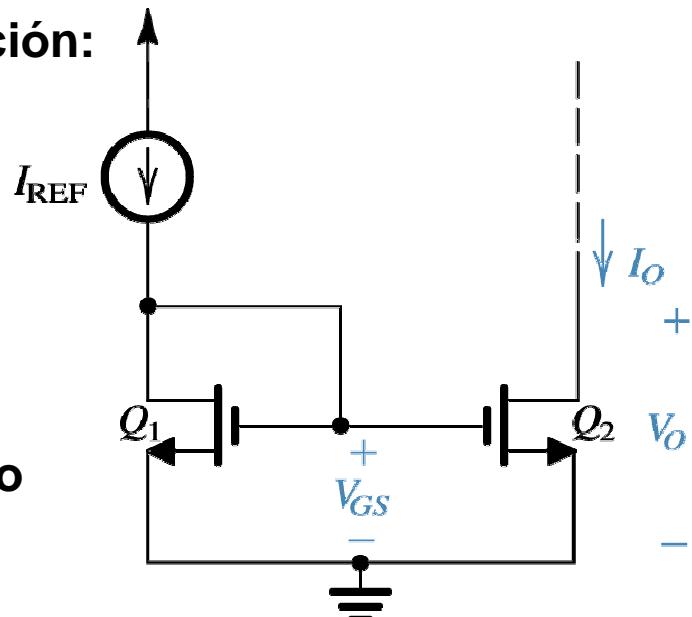
$$I_{D1} = I_{REF} \Rightarrow I_{D1} = \frac{1}{2} K_n \cdot \frac{W_1}{L_1} (V_{GS} - V_T)^2$$

- Q2: Suponemos que está en saturación:

$$I_o = I_{D2} = \frac{1}{2} K_n \cdot \frac{W_2}{L_2} (V_{GS} - V_T)^2$$

$$\Rightarrow I_o = I_{REF} \cdot \frac{W_2 / L_2}{W_1 / L_1}$$

- Por tanto, si Q1 igual a Q2, $I_o = I_{REF}$.
- Independientemente de lo conectado a la salida, I siempre es I_o .



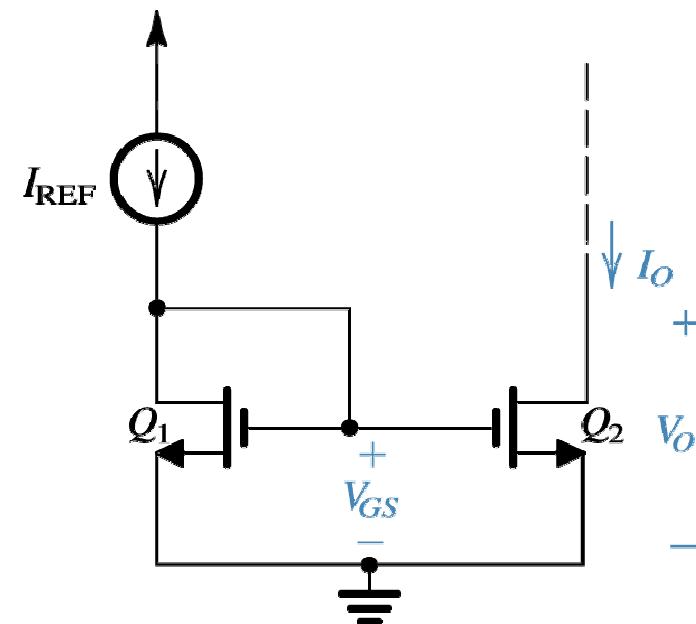
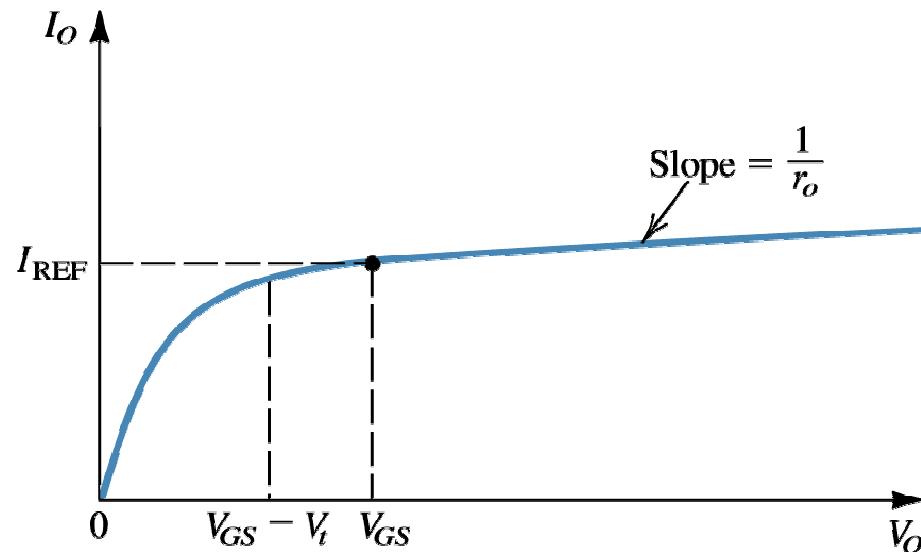
Aplicaciones analógicas

Aplicaciones analógicas: (cont.)

» Espejo de corriente: (cont.)

□ Teniendo en cuenta la modulación del canal:

- I_o dependerá ligeramente de V_o .
- Por tanto, I_o no es exactamente igual a I_{REF} .

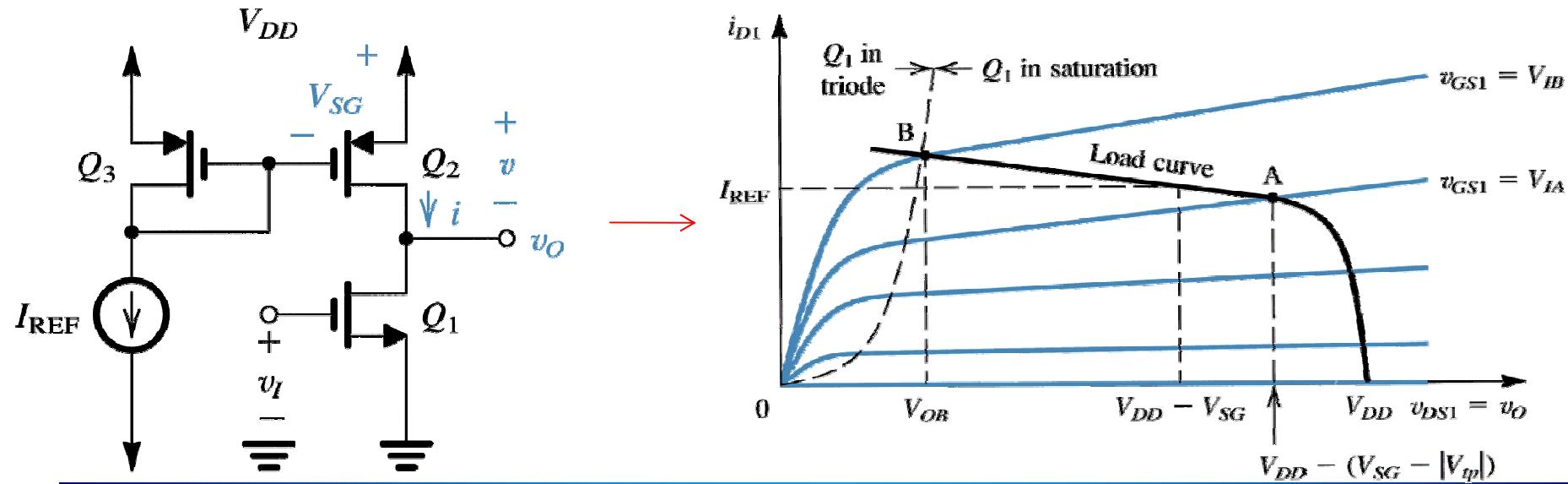


Aplicaciones analógicas

Aplicaciones analógicas: (cont.)

» Amplificador monoetapa:

- Existen de fuente común, drenador común y puerta común.
- Vemos sólo el de fuente común.
- Q2, Q3 y I_{REF} forman un espejo de corriente $\rightarrow i \sim I_{REF}$.

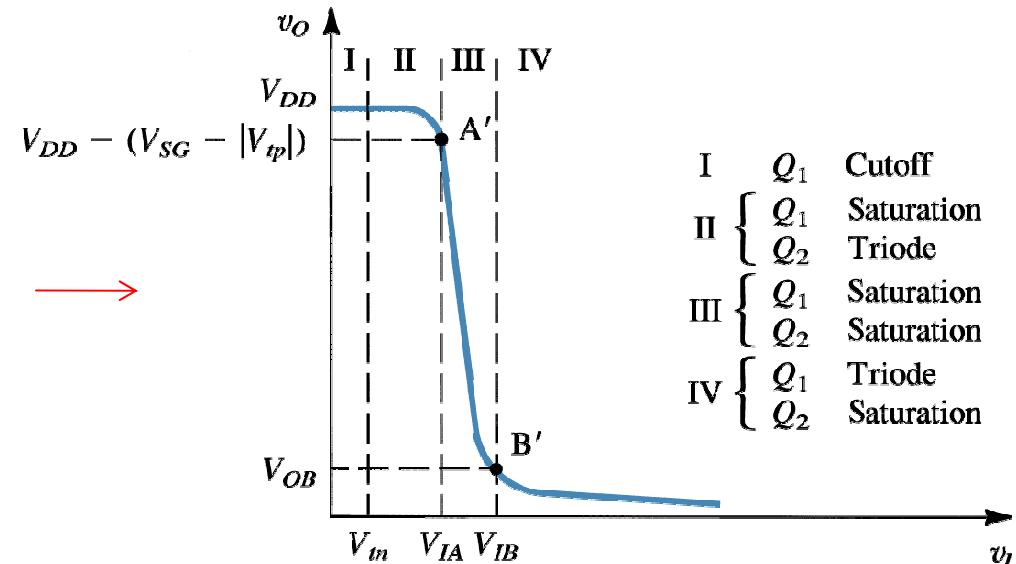
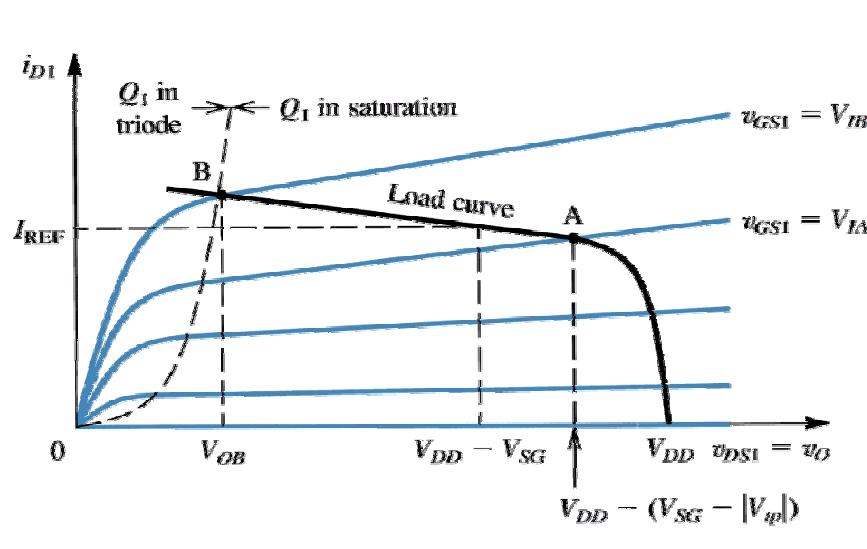


Aplicaciones analógicas

Aplicaciones analógicas: (cont.)

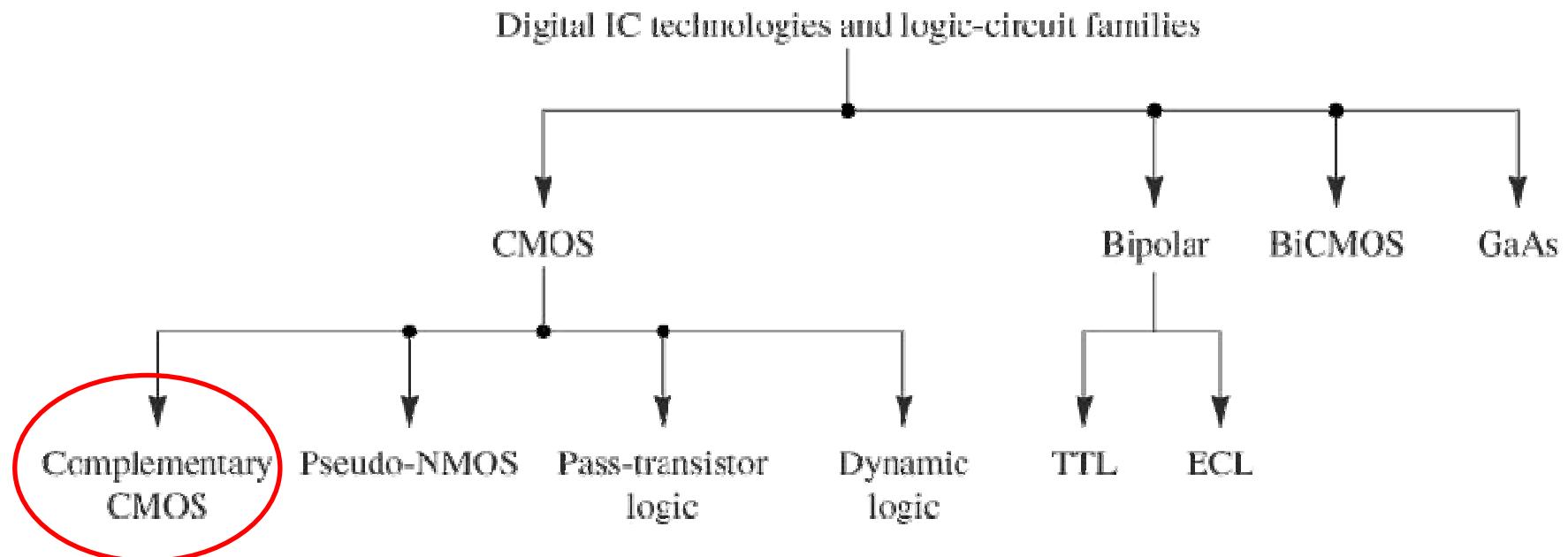
» Amplificador monoetapa fuente común:

○ Representando V_o respecto $V_i (=V_{GS1})$:



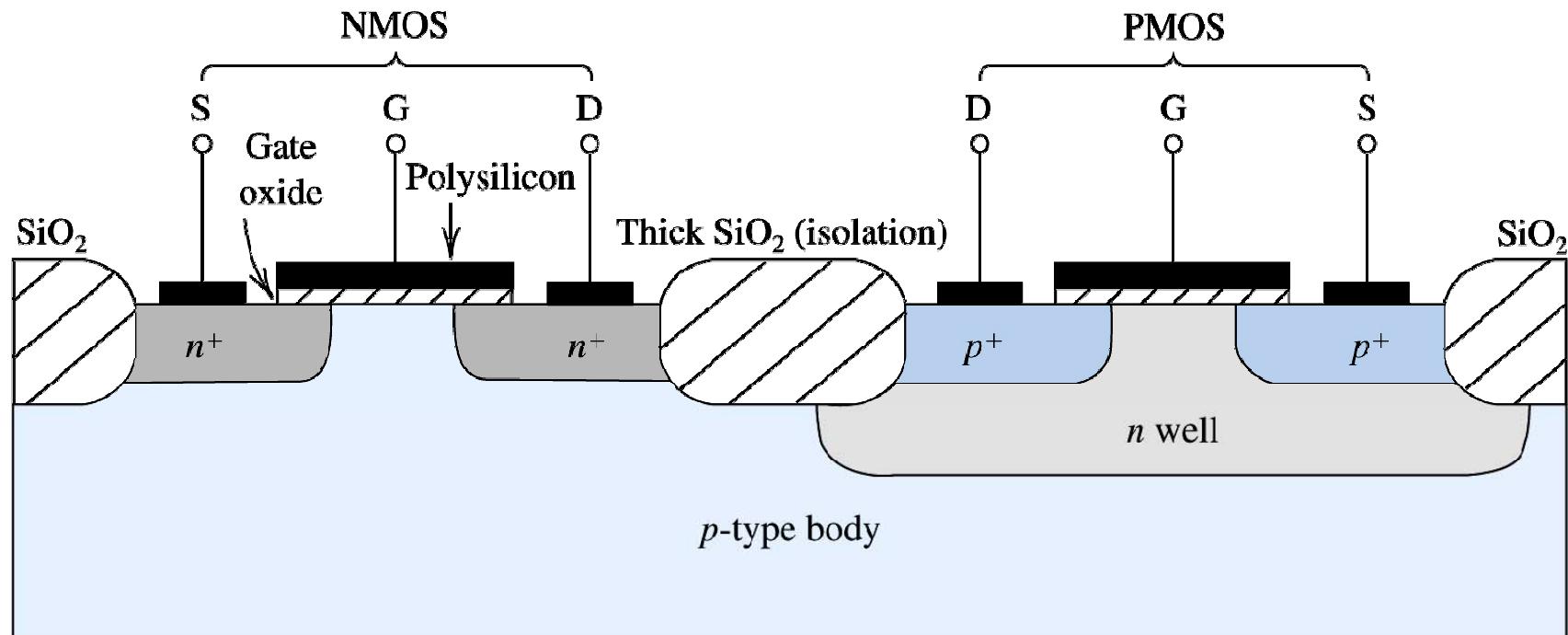
Aplicaciones digitales

💡 Familias digitales:



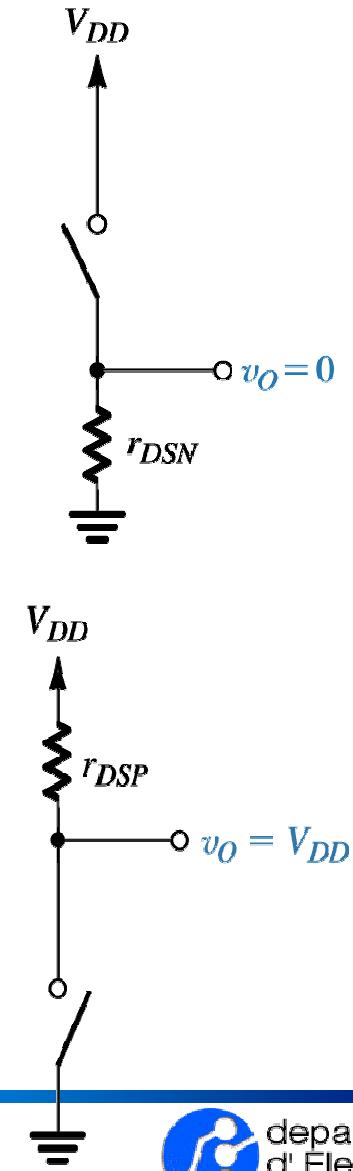
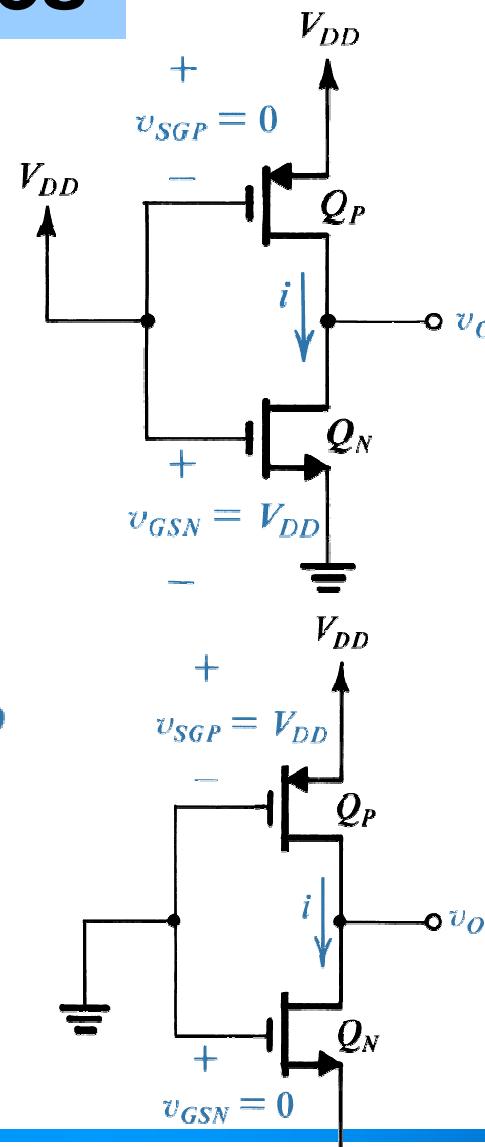
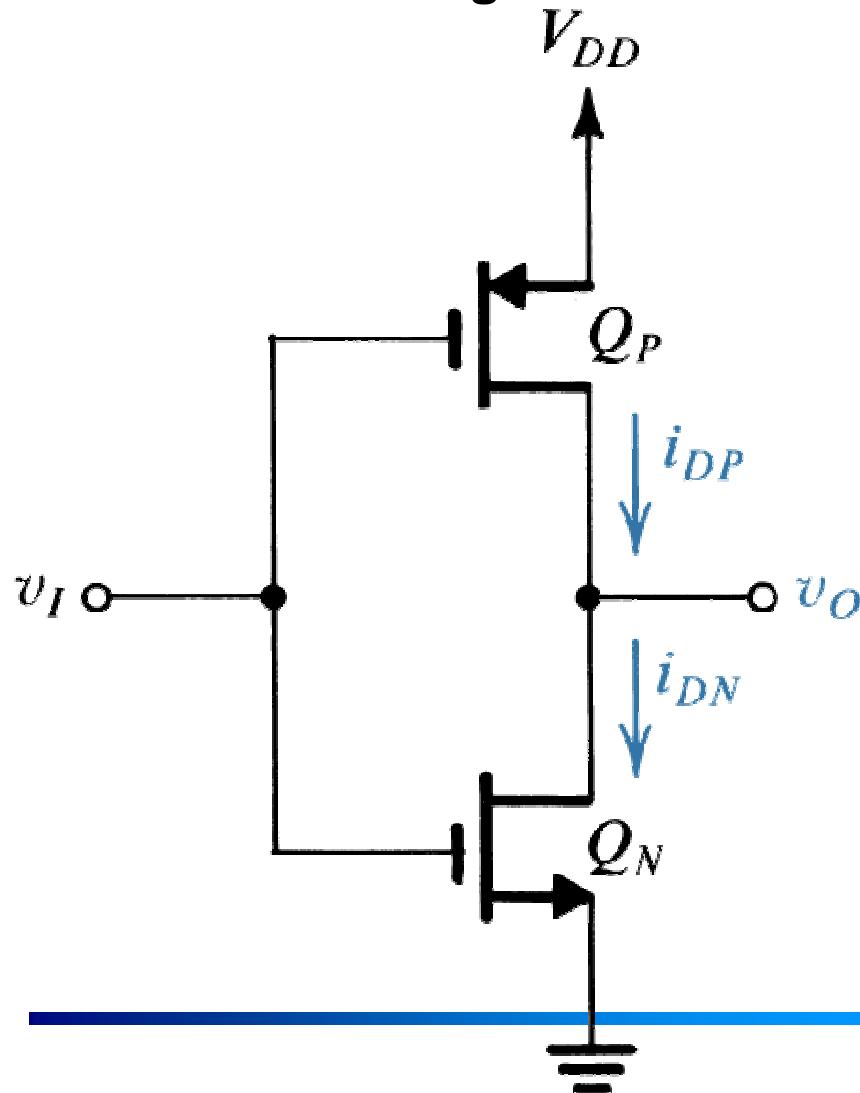
Aplicaciones digitales

💡 Familia lógica CMOS (Complementary Metal Oxide Semicond.):



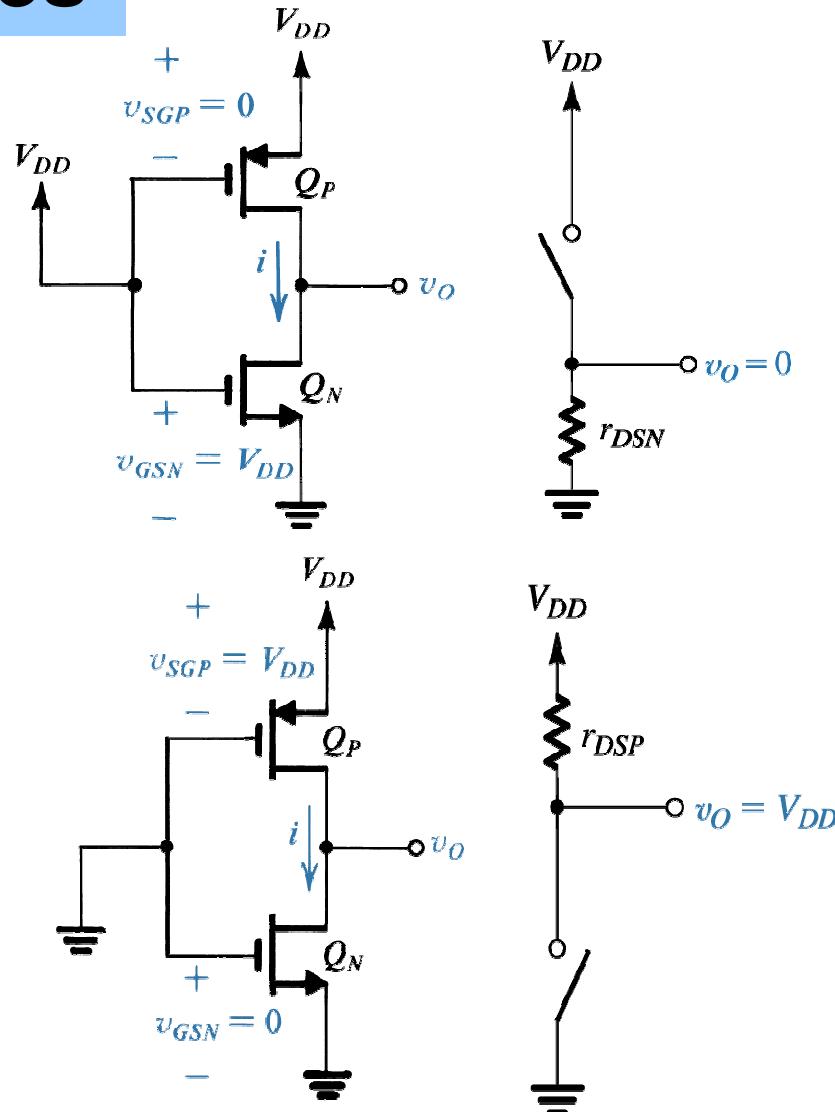
Aplicaciones digitales

💡 Inversor lógico:



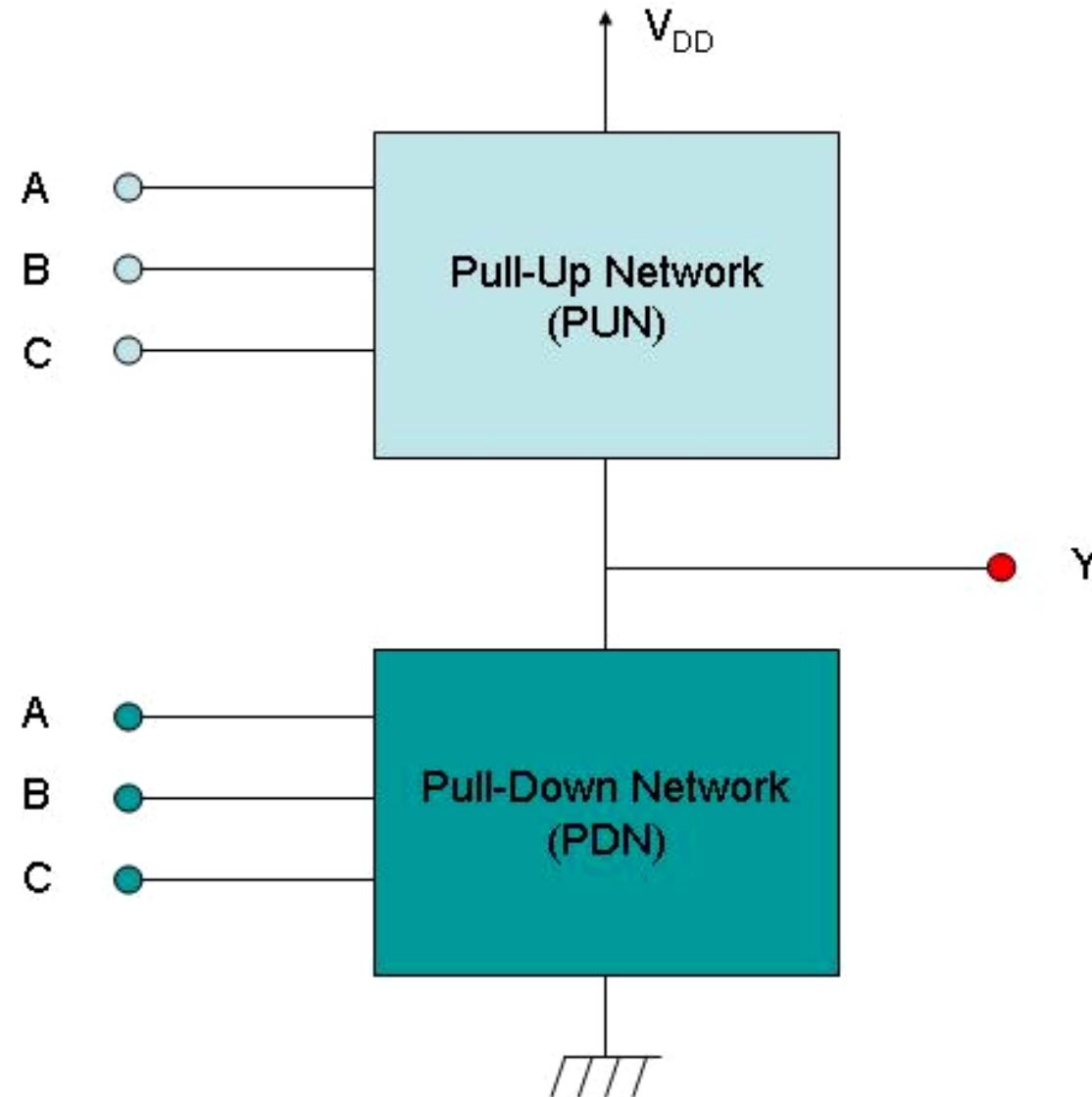
Aplicaciones digitales

💡 Inversor lógico:



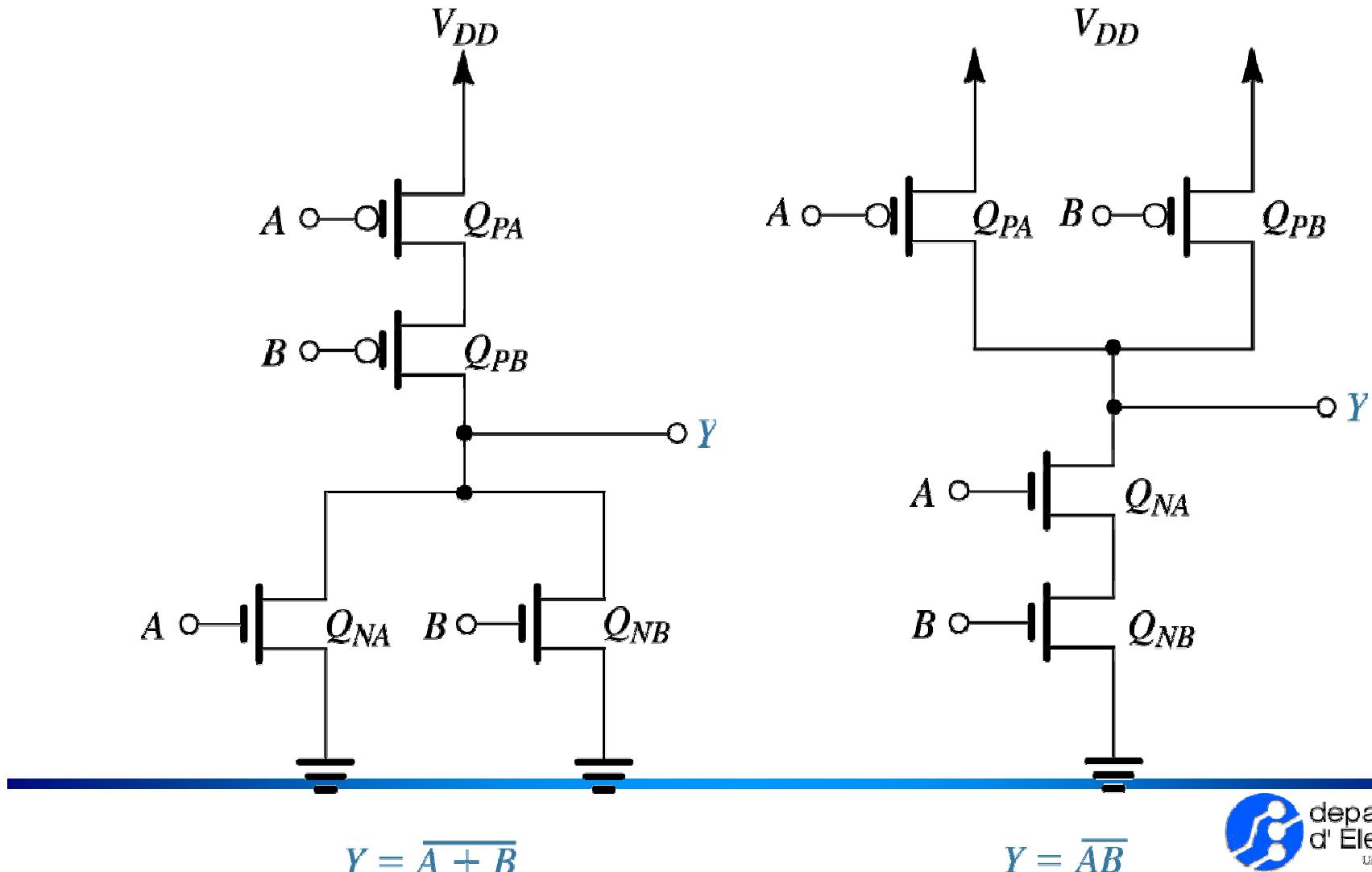
Aplicaciones digitales

💡 Familia lógica CMOS:



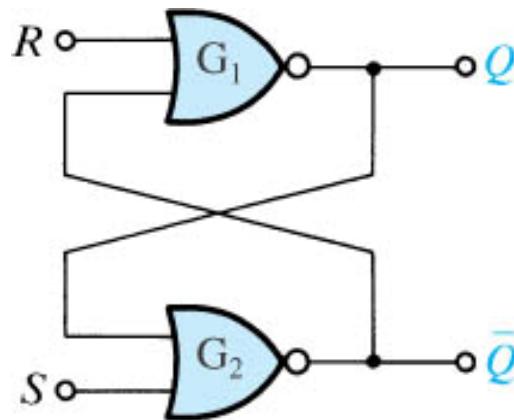
Aplicaciones digitales

💡 Familia lógica CMOS: (cont.)

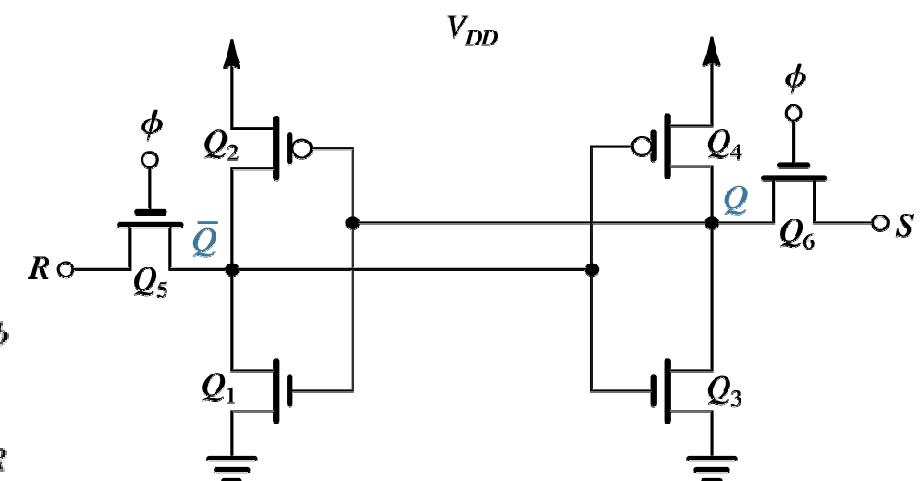
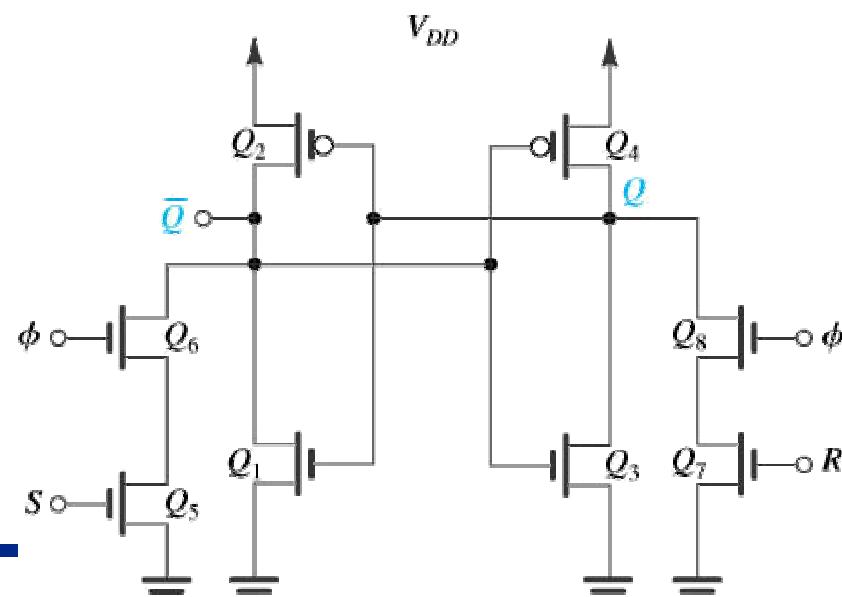


Aplicaciones digitales

Flip-flops: Memorias.

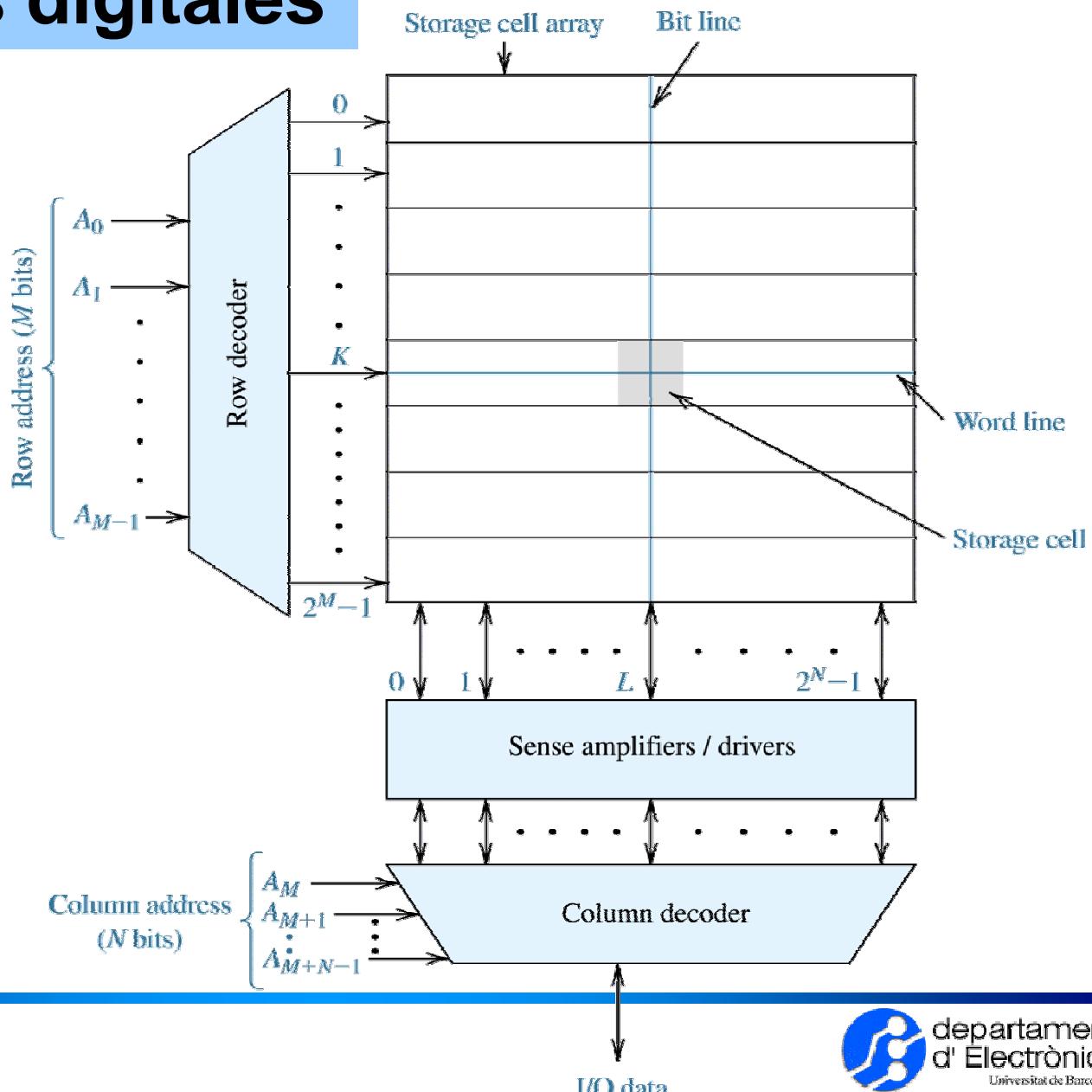


R	S	Q_{n+1}
0	0	Q_n
0	1	1
1	0	0
1	1	Not used



Aplicaciones digitales

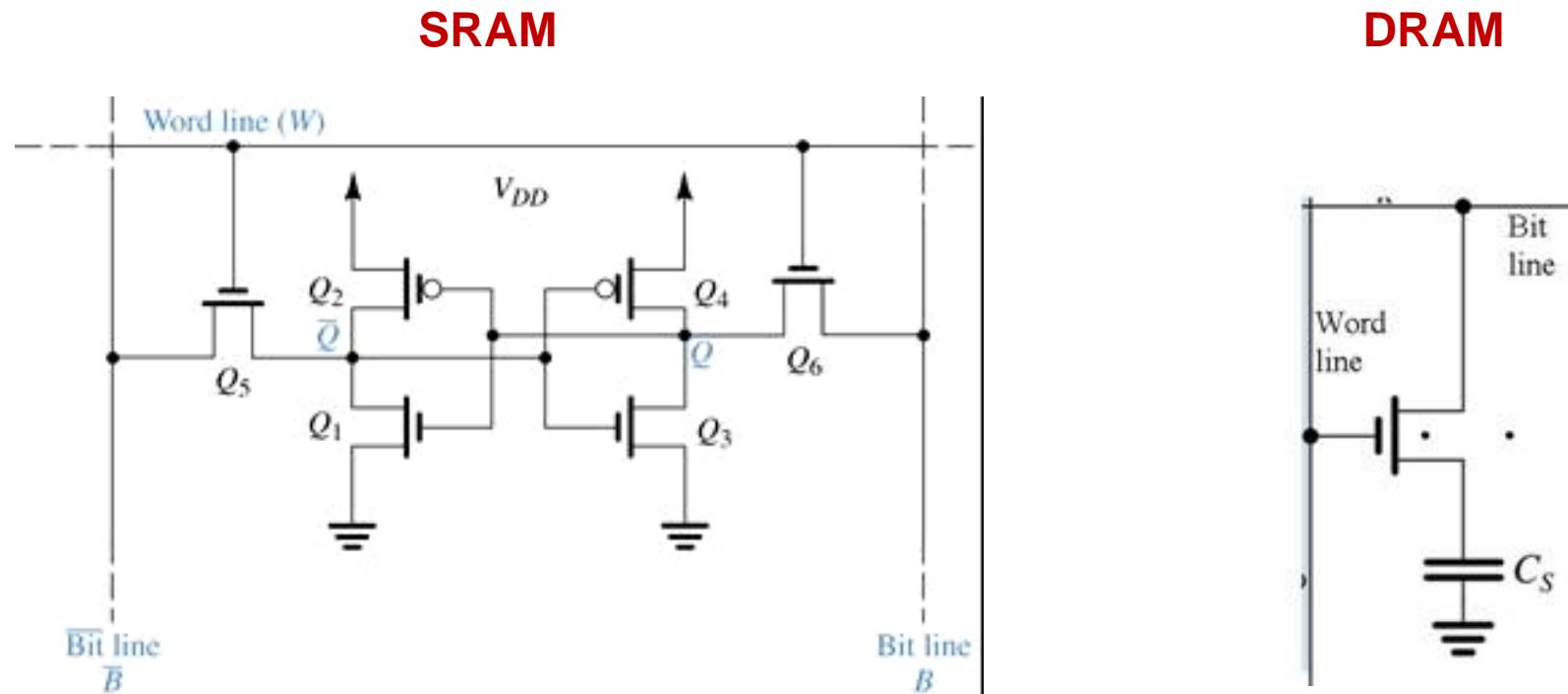
Memorias:



Aplicaciones digitales

Memorias:

- » **SRAM: Flip-flops.**
- » **DRAM: Capacidad.**



Aplicaciones digitales

↳ Memorias:

» EPROM:

