

Transistores de Efecto de Campo parte 2

Rev. 1.1

Curso Electrónica Fundamental

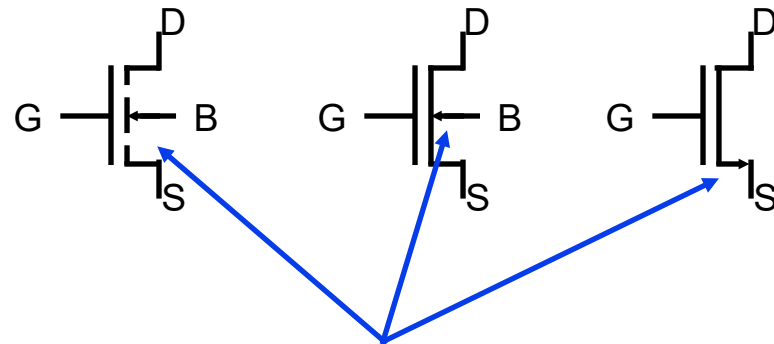
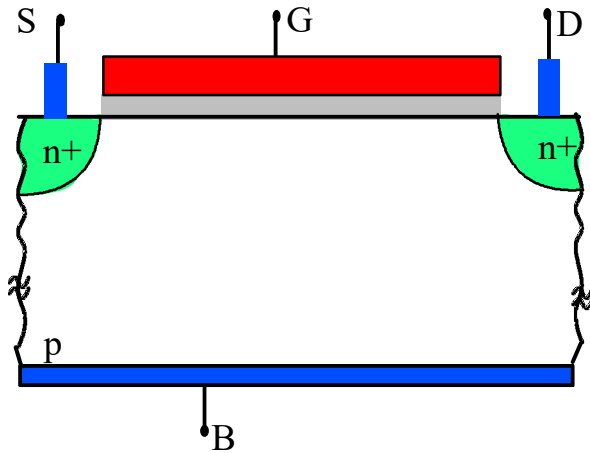
Fernando Silveira

Instituto de Ingeniería Eléctrica

Contenido

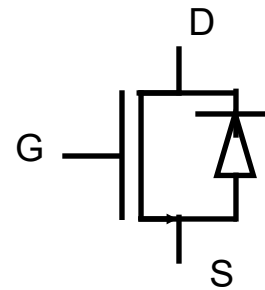
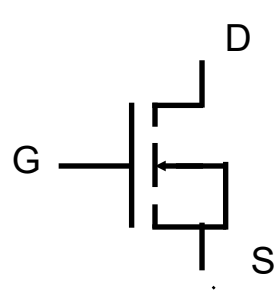
- ◆ Transistor nMOS: Símbolos de circuito
- ◆ Transistor pMOS y tecnología CMOS
- ◆ Llave analógica
- ◆ No idealidades:
 - Efecto de Modulación de Largo de Canal
 - Corriente Subumbral

Transistor nMOS: Símbolos de circuito



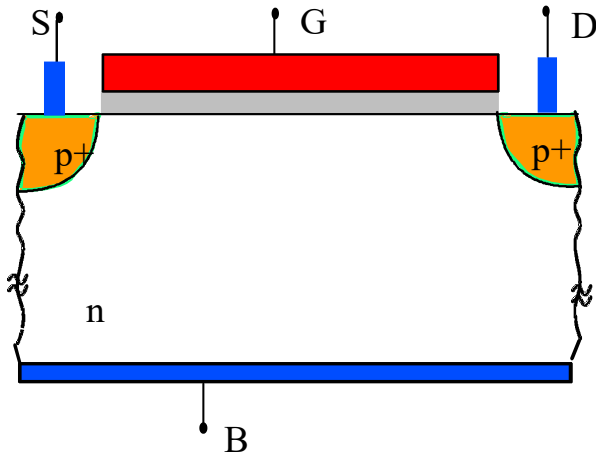
Flecha en sentido de
juntura BS en directo

nMOSFET discreto

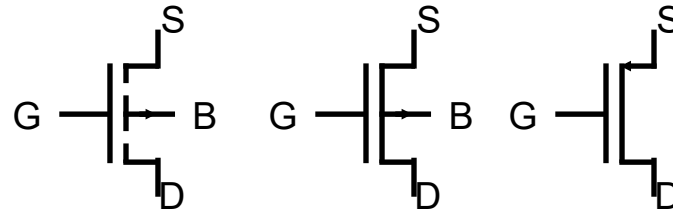


Diodo DB en
"antiparalelo"

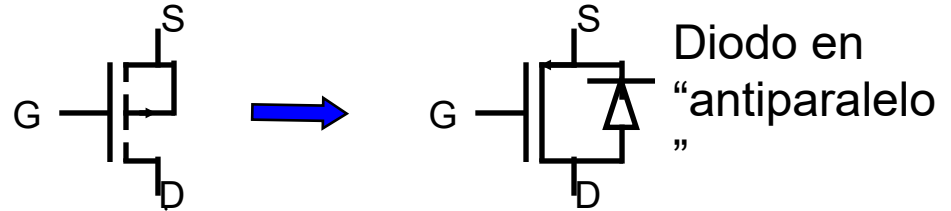
Transistor pMOS



$$V_{t0}, V_{GB}, V_{SB}, V_{DB}, V_{GS}, V_{DS} < 0$$



pMOSFET discreto



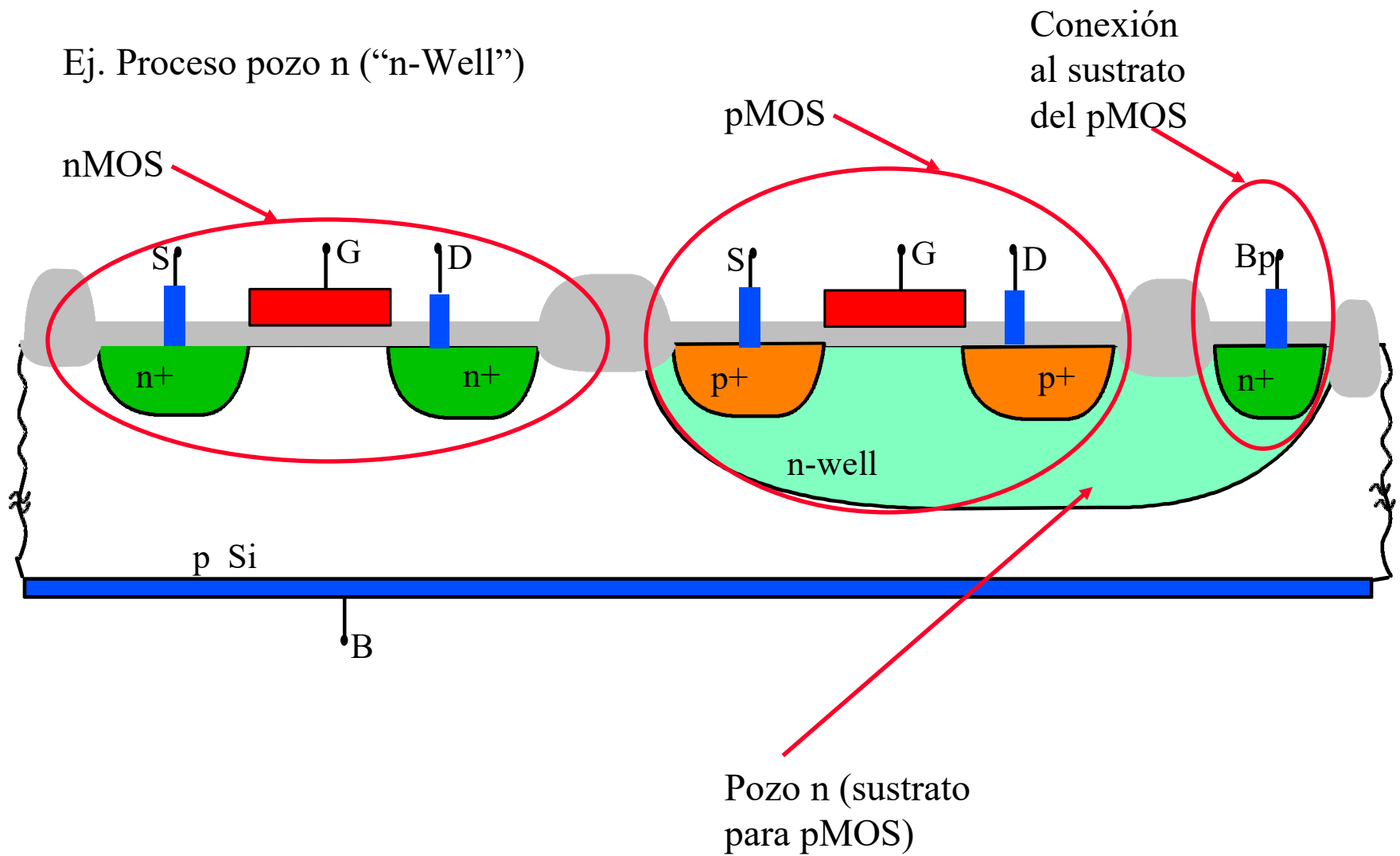
Considerar ecuaciones del transistor nMOS, corriente en sentido contrario (de S a D) y tomar como variables las tensiones opuestas a las del nMOS:

$$|V_{t0}|, V_{BG}, V_{BS}, V_{BD}, V_{SG}, V_{SD} > 0$$

Ej: Ecuación en saturación referida a la S:

$$I_D = \frac{\beta}{2(1+\delta)} \cdot \left(V_{SG} - (|V_{t0}| + \delta \cdot V_{BS}) \right)^2$$

Tecnología MOS complementaria (CMOS)

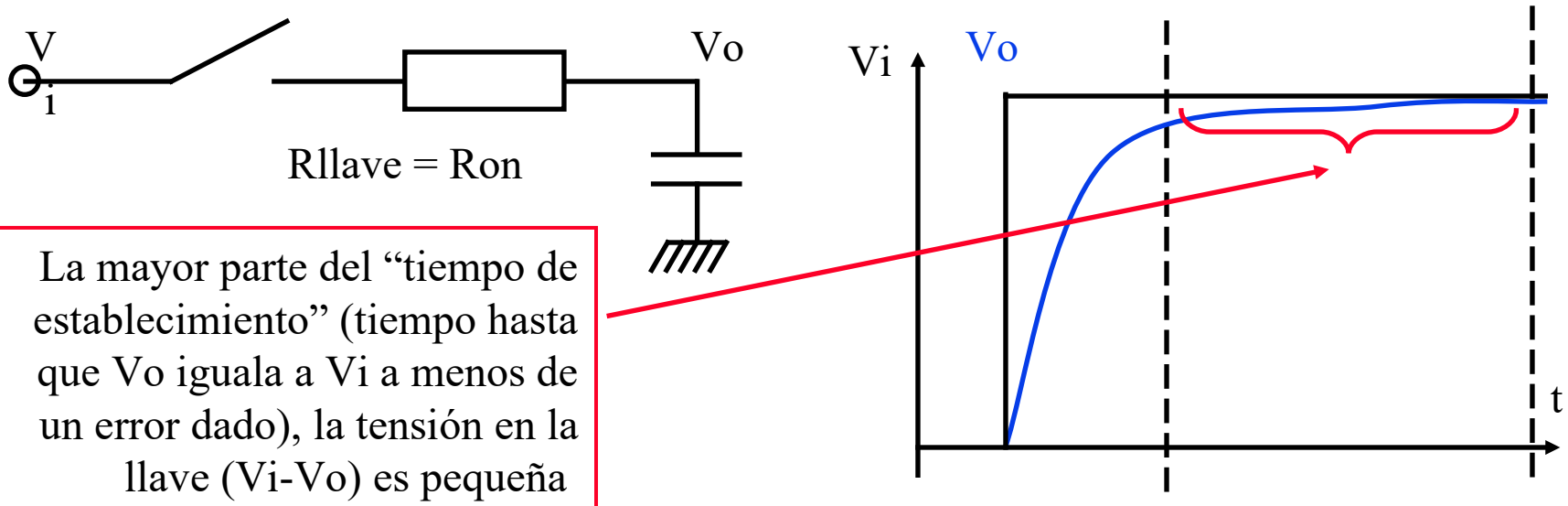


Llave analógica: Resistencia On (1)

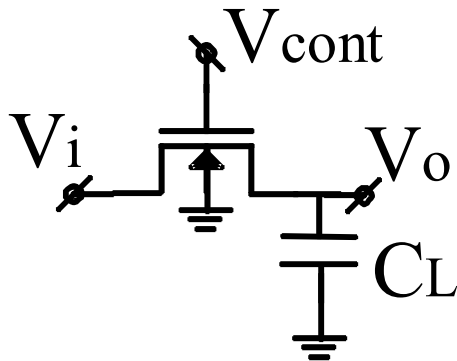
- ◆ Aplicaciones: Sistemas con Datos muestreados (sample and hold, procesamiento analógico con datos muestrados), MUX Analógico
- ◆ Se caracteriza por su Conductancia On o Resistencia On, definida como:

$$g_{on} = \frac{1}{R_{on}} = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{DS}} \Big|_{V_{DS} \approx 0}$$

- ◆ Se define para $V_{DS} \cong 0$ pues si se tiene por ejemplo:



Llave analógica: Resistencia On (2)



- ◆ V_{cont} alto ($V_{cont} = V_{DD}$) \Rightarrow llave on \Rightarrow

$$g_{on} = \frac{1}{R_{on}} = \left. \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{DS}} \right|_{V_{DS} \approx 0} = \beta \cdot (V_{DD} - V_{T0} - n \cdot V_i)$$

$$n = (1 + \delta)$$



Zona lineal (Inversión Fuerte)

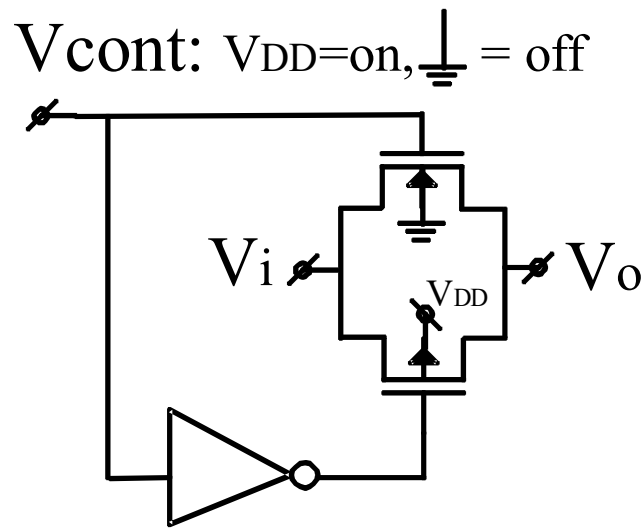


$$V_i < (V_{DD} - V_{T0})/n$$

$$V_i \geq (V_{DD} - V_{T0})/n \Rightarrow \text{transistor cortado} \Rightarrow g_{on} = 0, R_{on} = \infty$$

En realidad: inversión moderada y débil $\Rightarrow g_{on} \searrow \searrow R_{on} \nearrow \nearrow$

Llave analógica CMOS: Resistencia On (3)



$$g_n = \beta_n \cdot (V_{GB} - V_{T0_n} - n_n \cdot V_{SB})$$

$$V_{GB} = V_{DD}, V_{SB} = V_i$$

$$g_n = \beta_n \cdot (V_{DD} - V_{T0_n} - n_n \cdot V_i)$$

$$g_n = 0 \quad @ \quad V_i = \frac{V_{DD} - V_{T0_n}}{n_n}$$

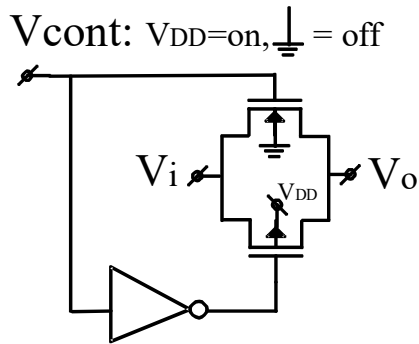
$$g_p = \beta_p \cdot (V_{BG} - |V_{T0_p}| - n_p \cdot V_{BS})$$

$$V_{BG} = V_{DD}, V_{BS} = V_{DD} - V_i$$

$$g_p = \beta_p \cdot (V_{DD} - |V_{T0_p}| - n_p \cdot (V_{DD} - V_i))$$

$$g_p = 0 \quad @ \quad V_i = \frac{(n_p - 1) \cdot V_{DD} + |V_{T0_p}|}{n_p}$$

Llave analógica CMOS: Resistencia On (4)

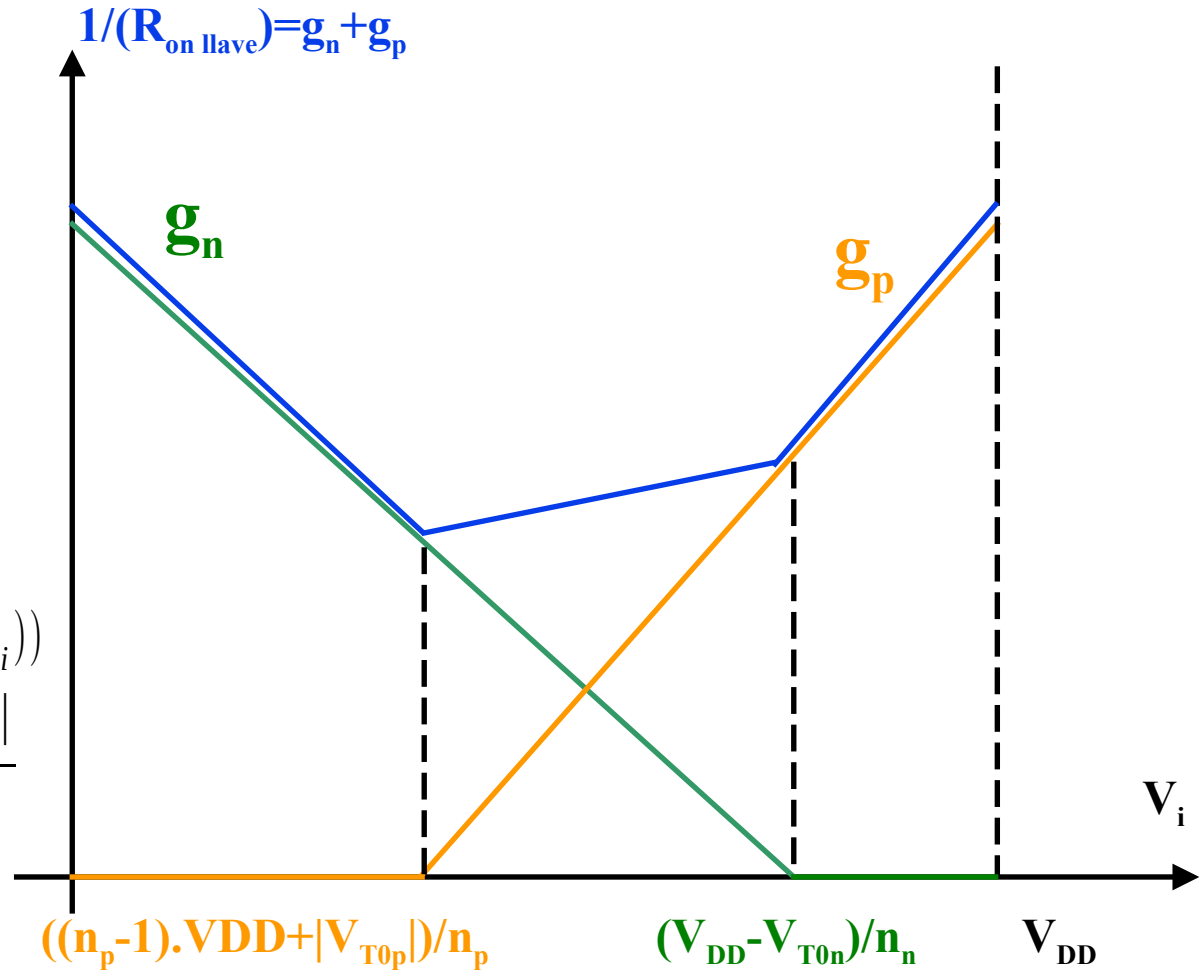


$$g_n = \beta_n \cdot (V_{DD} - V_{T0n} - n_n \cdot V_i)$$

$$g_n = 0 \text{ @ } V_i = \frac{V_{DD} - V_{T0n}}{n_n}$$

$$g_p = \beta_p \cdot (V_{DD} - |V_{T0p}| - n_p \cdot (V_{DD} - V_i))$$

$$g_p = 0 \text{ @ } V_i = \frac{(n_p - 1) \cdot V_{DD} + |V_{T0p}|}{n_p}$$



Ej. si $V_{DD} = 5$, $n_n = n_p = 1.5$,

$$V_{T0n} = -V_{T0p} = 0.7V$$

$$\frac{((n_p - 1) \cdot V_{DD} + |V_{T0p}|)}{n_p}$$

2.1V

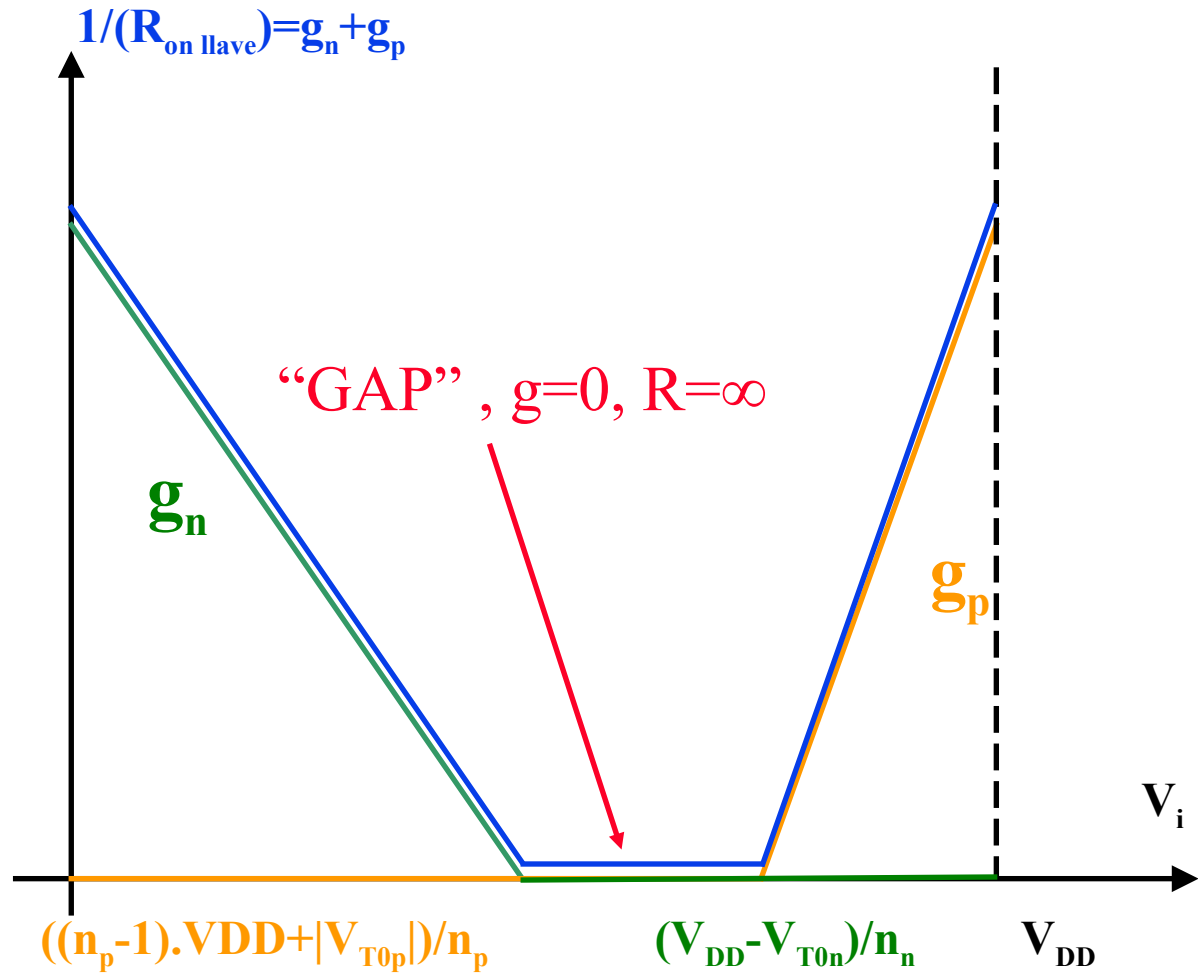
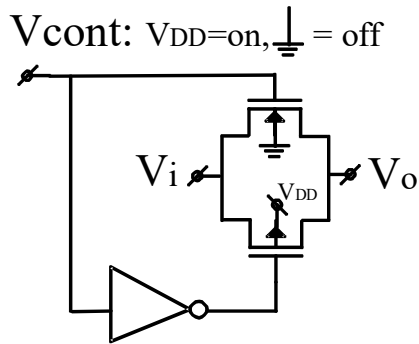
$$\frac{(V_{DD} - V_{T0n})}{n_n}$$

2.9V

V_{DD}

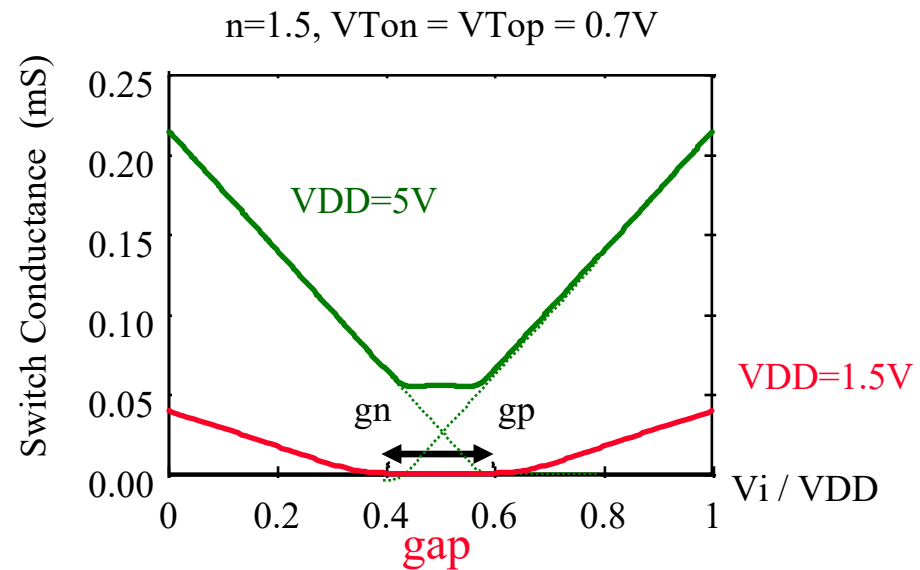
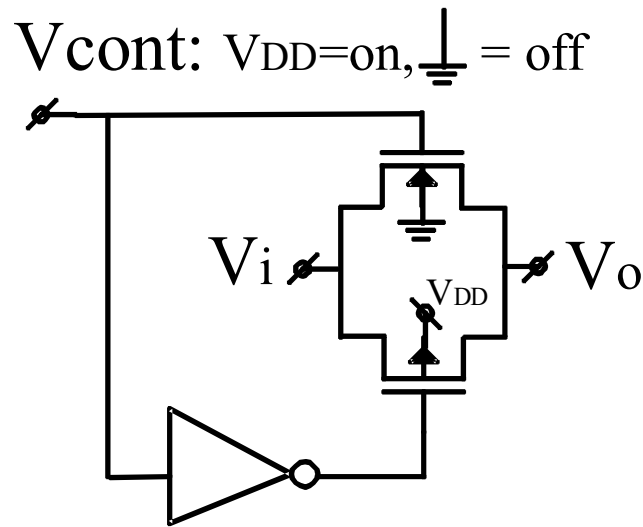
Llave analógica CMOS: Resistencia On (5)

Bajo V_{DD}



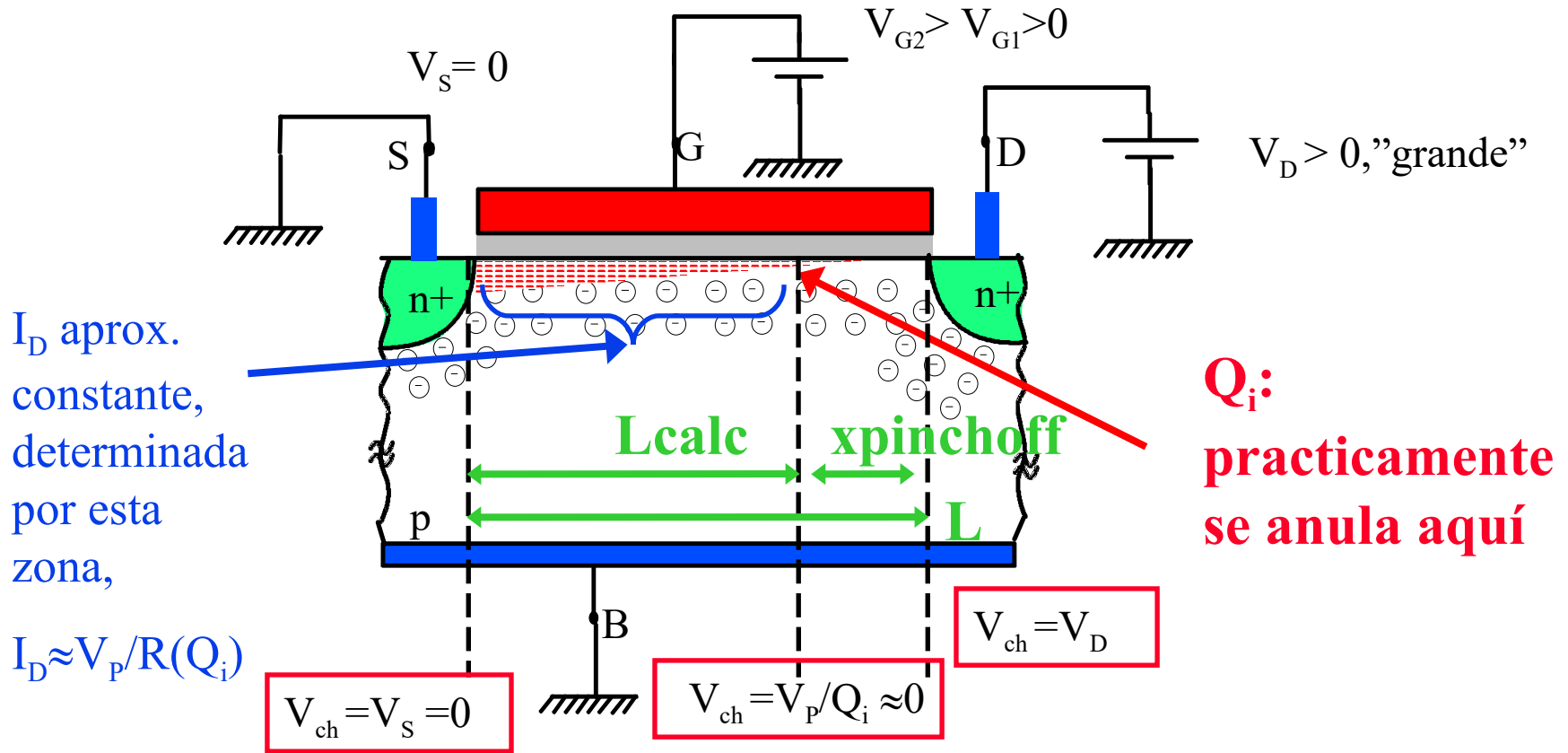
Llave analógica CMOS: Resistencia On (6)

Bajo V_{DD}



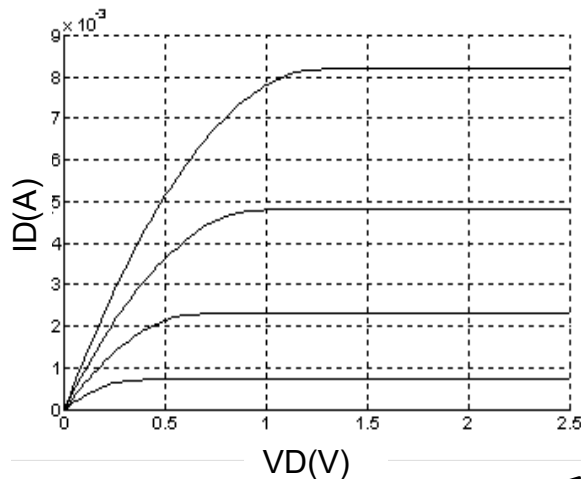
$$\exists \text{ gap} \Leftrightarrow V_{DD} < V_{DDmin} = \frac{n_n \cdot |V_{T0p}| + n_p \cdot V_{T0n}}{n_n + n_p - n_n \cdot n_p} \quad \underbrace{\hspace{1cm}}_{\text{for } T_n \approx T_p} \quad \frac{2 \cdot V_{T0}}{2 - n}$$

Efecto Modulación de Largo de Canal (1)

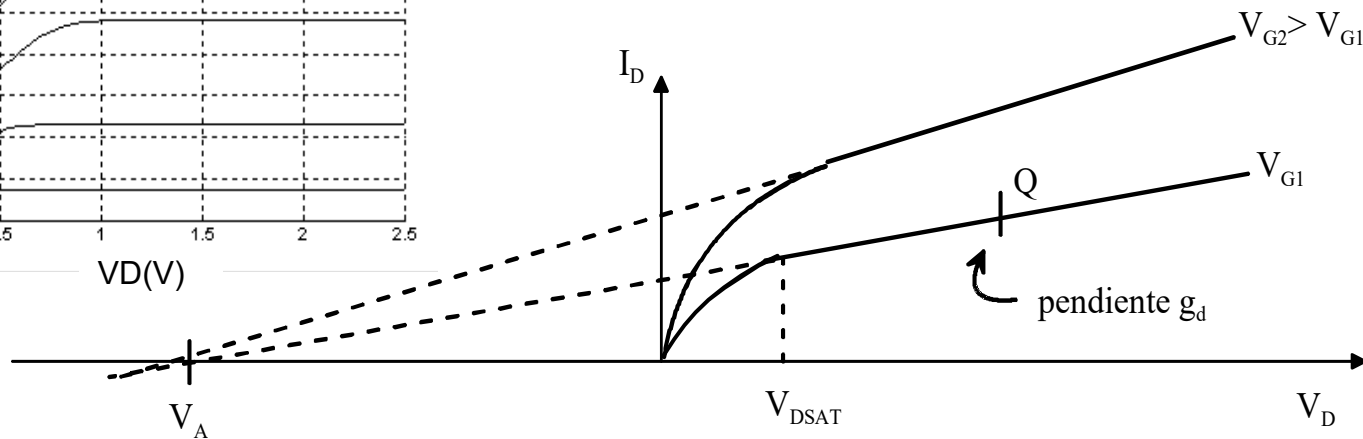


$$\begin{aligned}
 V_D \uparrow &\Rightarrow x_{pinchoff} \uparrow \Rightarrow L_{calc} = (L - x_{pinchoff}) \downarrow \\
 &\Rightarrow I_D \text{ (prop. a } W/L_{calc}) \uparrow
 \end{aligned}$$

Efecto Modulación de Largo de Canal (2)



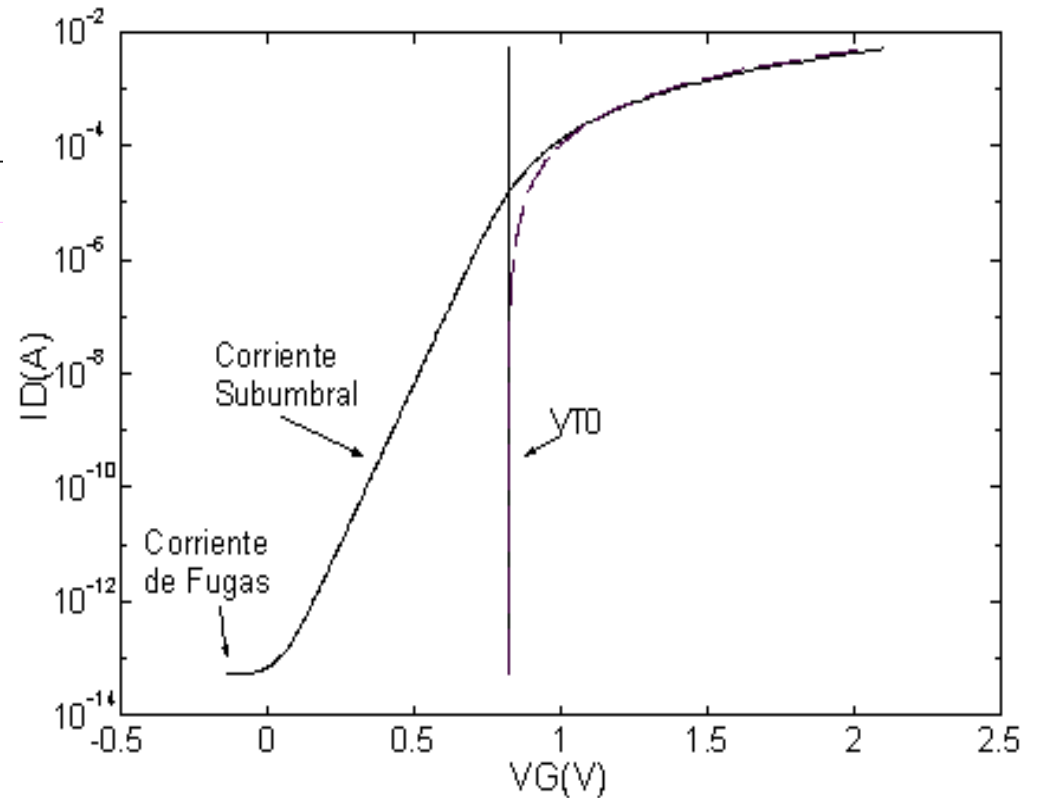
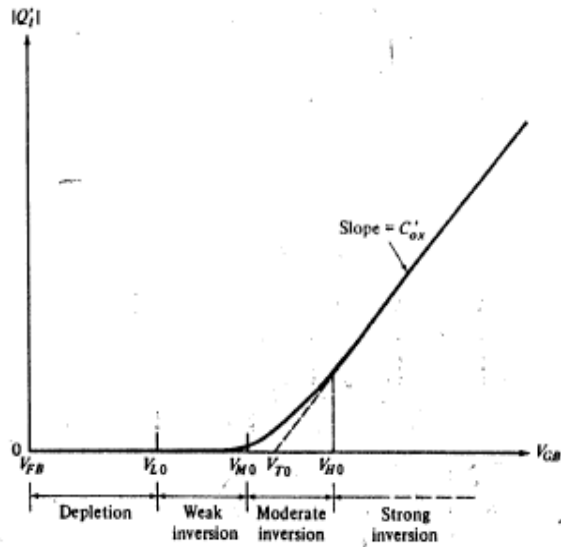
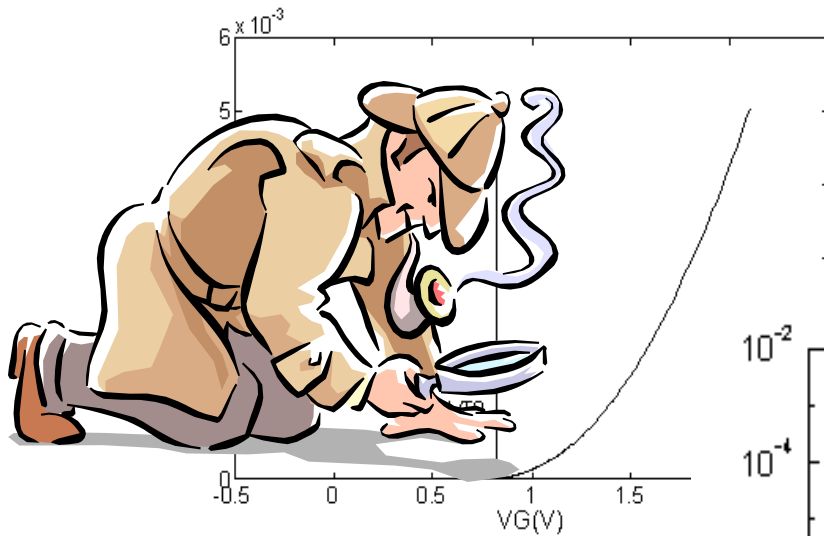
$$I_D = \frac{\beta}{2(1+\delta)} \cdot (V_G - V_{t0} - (1+\delta)V_S)^2 \cdot \left(1 + \frac{V_D}{V_A}\right)$$



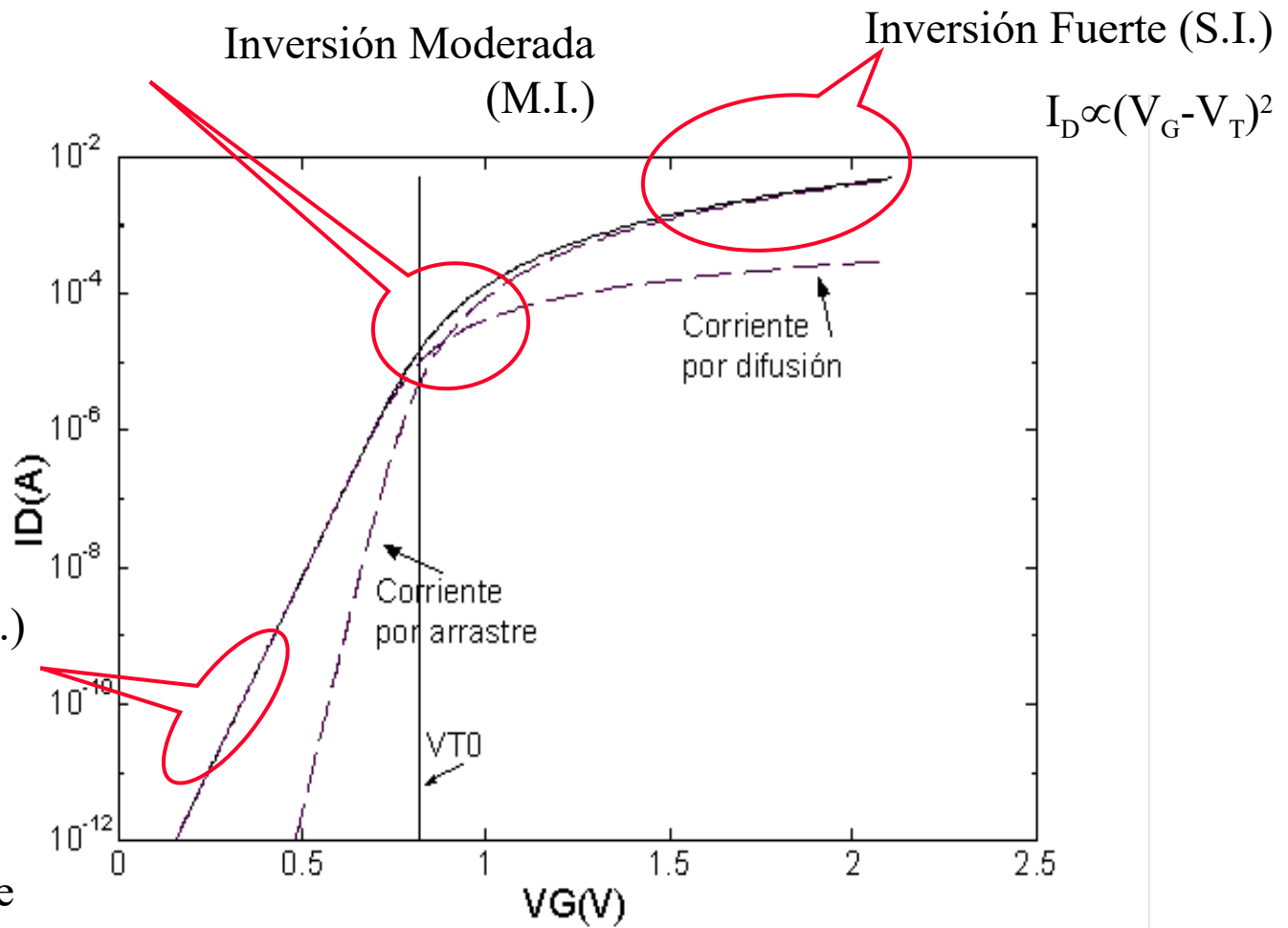
V_A : tensión de Early

- ◆ El transistor en saturación no es una fuente de corriente ideal, tiene una conductancia de salida $g_d = (1/r_o) \cong (I_D/V_A)$
- ◆ $V_A \propto L$ (en primera aproximación)
- ◆ En primera aproximación V_A independiente de I_D , en realidad existe dependencia notoria
- ◆ En gral. despreciamos el efecto a menos que nos interese cuantificar la variación de la corriente con VD o r_o de la fuente de corriente

Corriente subumbral (1)



Corriente subumbral (2)



Inversión Débil (W.I.)

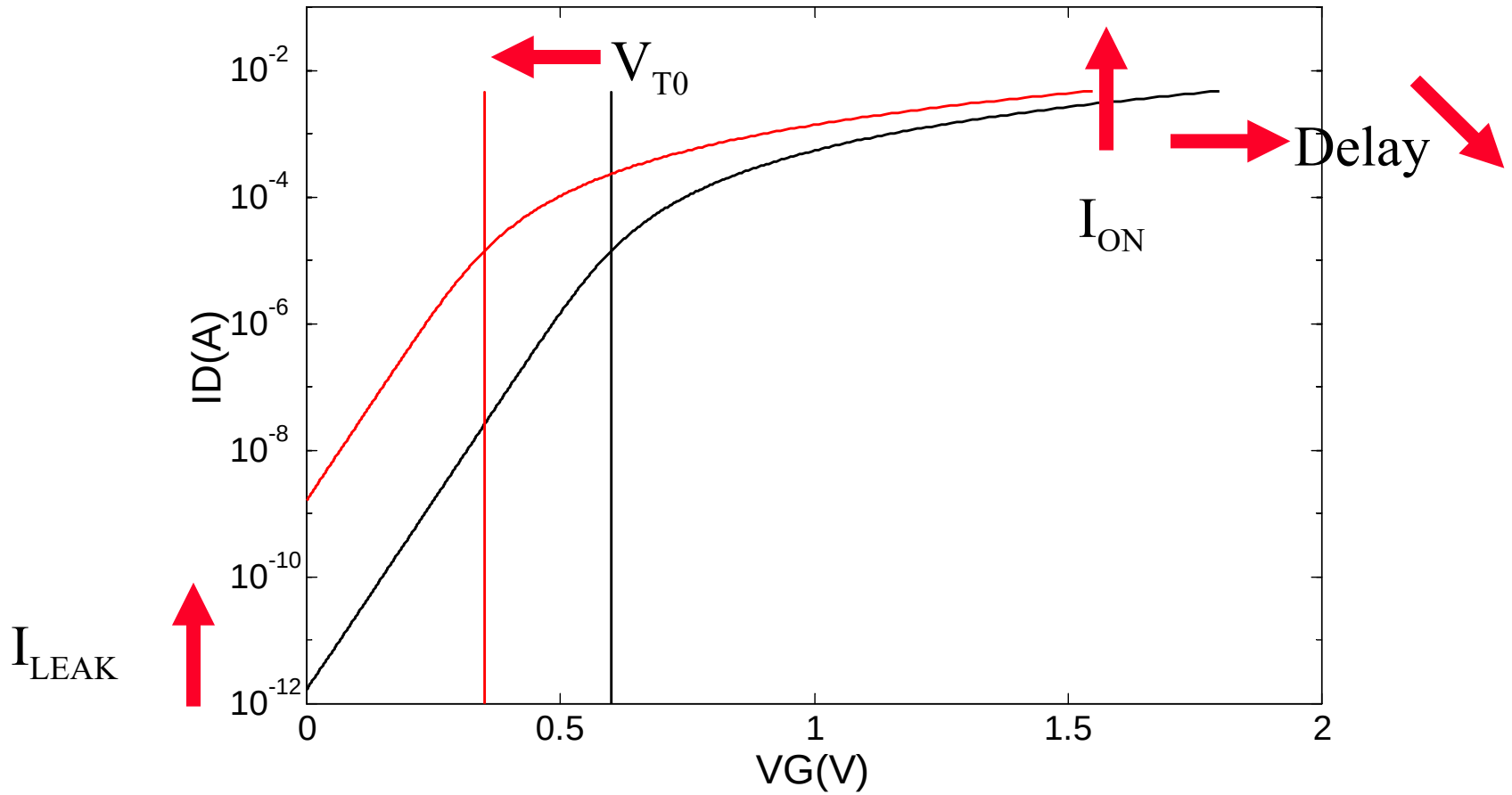
$$I_D \propto e^{V_G/(n \cdot U_T)}$$

$$U_T = k \cdot T / q$$

n: factor de pendiente

Corriente subumbral (3)

- Genera consumo estático en circuitos digitales



- Se usa en diseño de circuitos de muy bajo consumo