

Dispositivos Electrónicos

AÑO: 2010

TEMA 6: EL TRANSISTOR MOSTFET



Rafael de Jesús Navas González
Fernando Vidal Verdú

TEMA 6: EL TRANSISTOR MOSFET

6.1. Estructura física.

6.1.1 *Estructura Metal Oxido Semiconductor (MOS)*

6.1.2 *El transistor MOSFET de enriquecimiento: de canal N y canal P*

6.1.3 *El transistor MOSFET de empobrecimiento: de canal N y canal P.*

6.2. Regiones de operación de un transistor MOSFET.

6.2.1 *Región de corte.*

6.2.2 *Región lineal u óhmica.*

6.2.3 *Región saturación.*

6.3. El transistor MOSFET como elemento de circuito:

6.3.1 *Variables de circuito y configuraciones básicas:*

- *drenador común,*
- *fuelle común*
- *puerta común.*

6.3.2 *Curvas características y modelos básicos.*

6.3.3 *Circuitos con transistores: Cálculo del punto de trabajo.*

6.3.4 *Comportamiento dinámico: Transistor MOSFET en conmutación.*

6.4. Familias lógicas MOS.

6.4.1 *Familias NMOS: Puertas Lógicas y Funciones Booleanas*

6.4.2 *Familia CMOS: Puertas Lógicas y Funciones Booleanas*

TEMA 6: EL TRANSISTOR MOSFET

OBJETIVOS

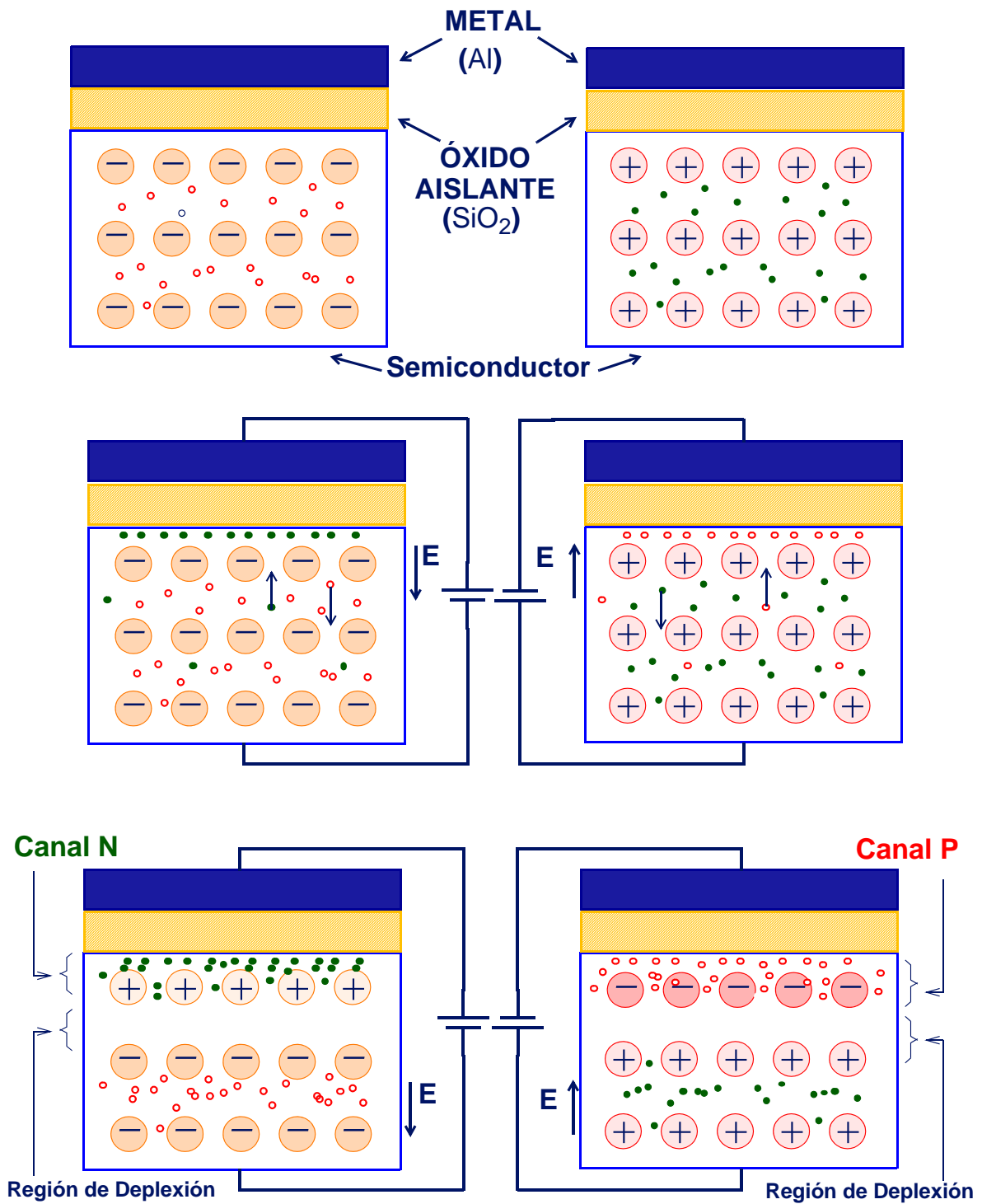
Al estudiar este tema el alumno debe ser capaz de:

- Explicar de forma cualitativa como se crea un región de inversión en una estructura Metal Oxido Semiconductor.
- Explicar de forma cualitativa las características de la estructura física de los transistores MOSFET, tanto los de canal N como los de canal P; y tanto los de enriquecimiento como lo de empobrecimiento.
- Explicar de forma cualitativa las condiciones y mecanismo de funcionamiento de los transistores MOSFET en las diferentes regiones de operación: Region de corte, región óhmica y región de saturación.
- Identificar el transistor MOSFET como elemento de circuito y las variables usadas para su caracterización.
- Conocer el modelo básico de transistor MOSFET (canal N y canal P, de enriquecimiento y de empobrecimiento) en su configuración fuente común en cada una de las regiones de funcionamiento y su relación con sus curvas características.
- Analizar circuitos básicos con un transistor MOS. Analisis DC. Analizar e identificar puertas lógicas basicas de las familias NMOS y CMOS.
- Conocer forma cualitativa el funcionamiento estatico y dinámico del transistor bipolar en conmutación.
- Identificar diferentes funciones booleanas de las familias NMOS y CMOS.

LECTURAS COMPLEMENTARIAS

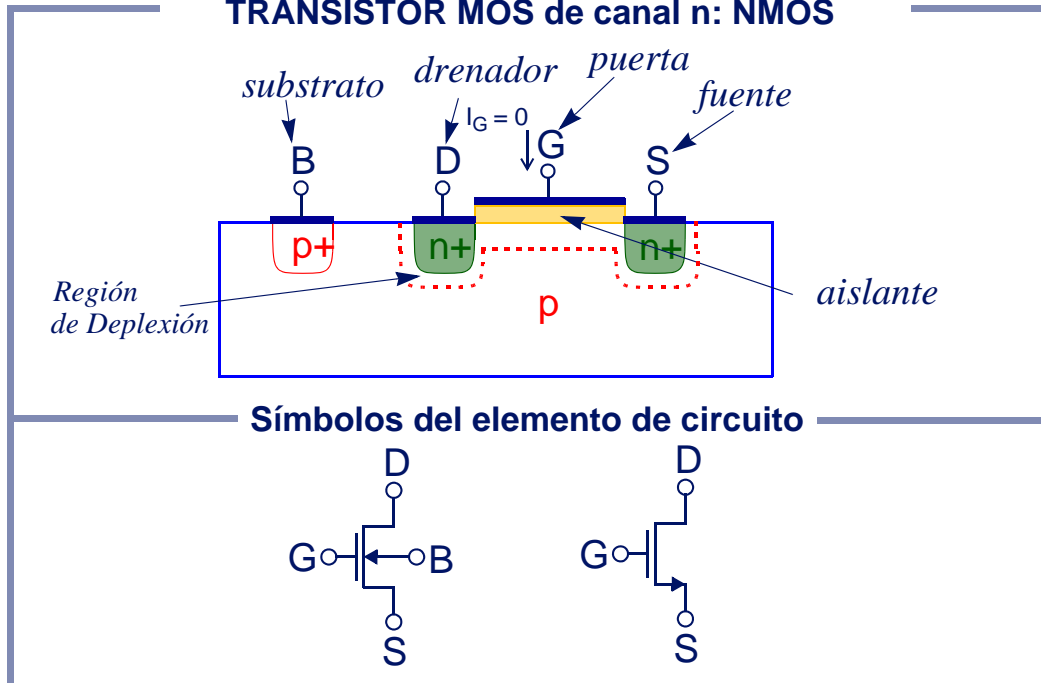
- Navas González R. y Vidal Verdú F. "Curso de Dispositivos Electrónicos en Informática y Problemas de Examen Resueltos" Universidad de Málaga/ Manual 70, 2006. Tema 6: pag.245-268.
- Fernández Ramos, J. y otros, "Dispositivos Electrónicos para Estudiantes de Informática" Universidad de Málaga / Manuales 2002. Tema 6: pag. 135- 176.
- Pollán Santamaría, Tomás, "Electrónica Digital I. Sistemas Combinacionales", Prensas Universitarias de Zaragoza 2003. Apéndice A2: pag. 274-278, TEMA7: pag. 172-184, TEMA 8: pag. 185-204, TEMA9: pag. 205-228.
- Malik, N.R., "Circuitos Electrónicos. Análisis, Simulación y Diseño", Editorial Prentice-Hall 1996. Tema: 5: pag. 291-311, 317-322, y Tema 13: 932-950
- Daza A. y García J. "Ejercicios de Dispositivos Electrónicos" Universidad de Málaga/Manuales 2003. Tema 4: pag 169-252.
- <http://jas.eng.buffalo.edu/education/index.html>
- <http://tech-www.informatik.uni.hamburg.de/applets/cmospdemo.html>

ESTRUCTURA METAL-ÓXIDO-SEMICONDUCTOR

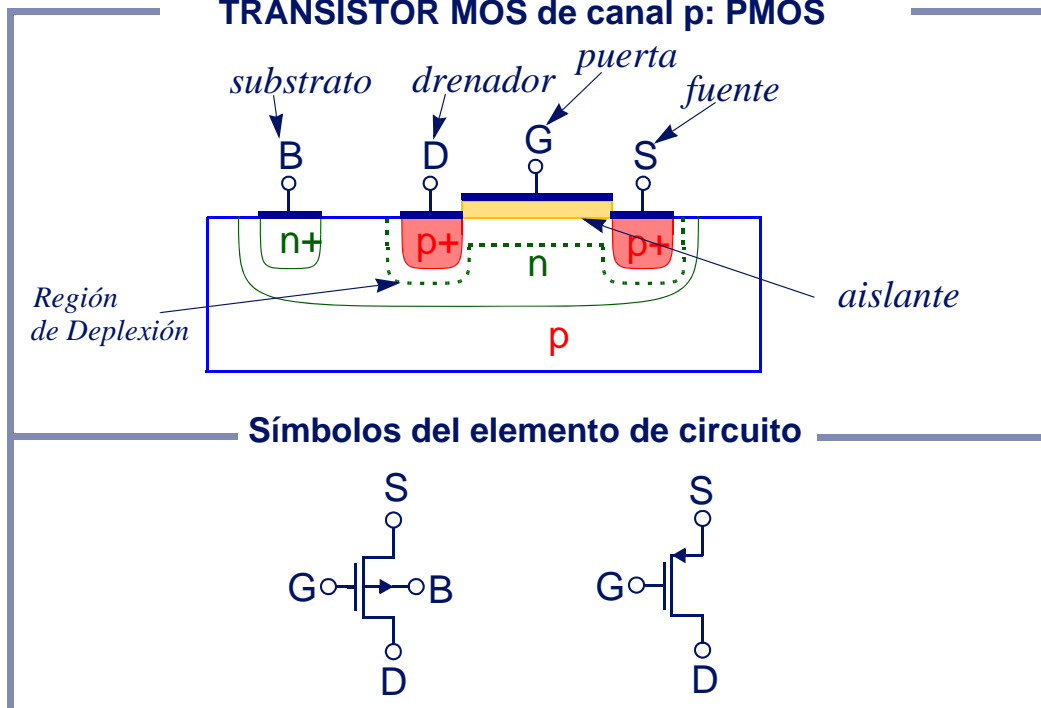


EL TRANSISTOR MOS DE ENRIQUECIMIENTO

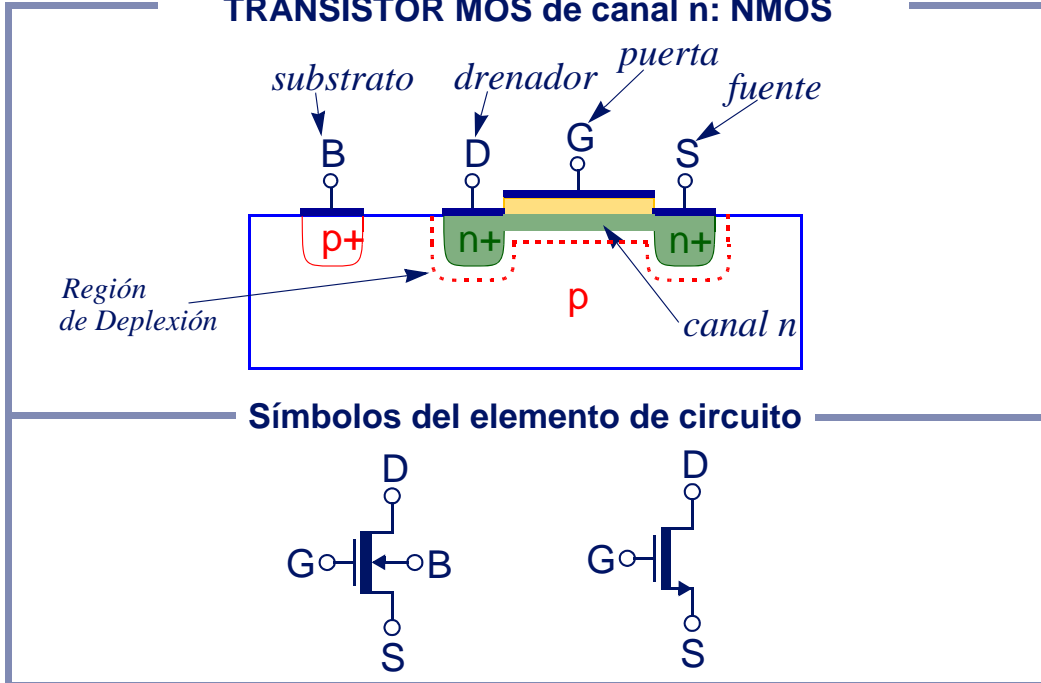
TRANSISTOR MOS de canal n: NMOS



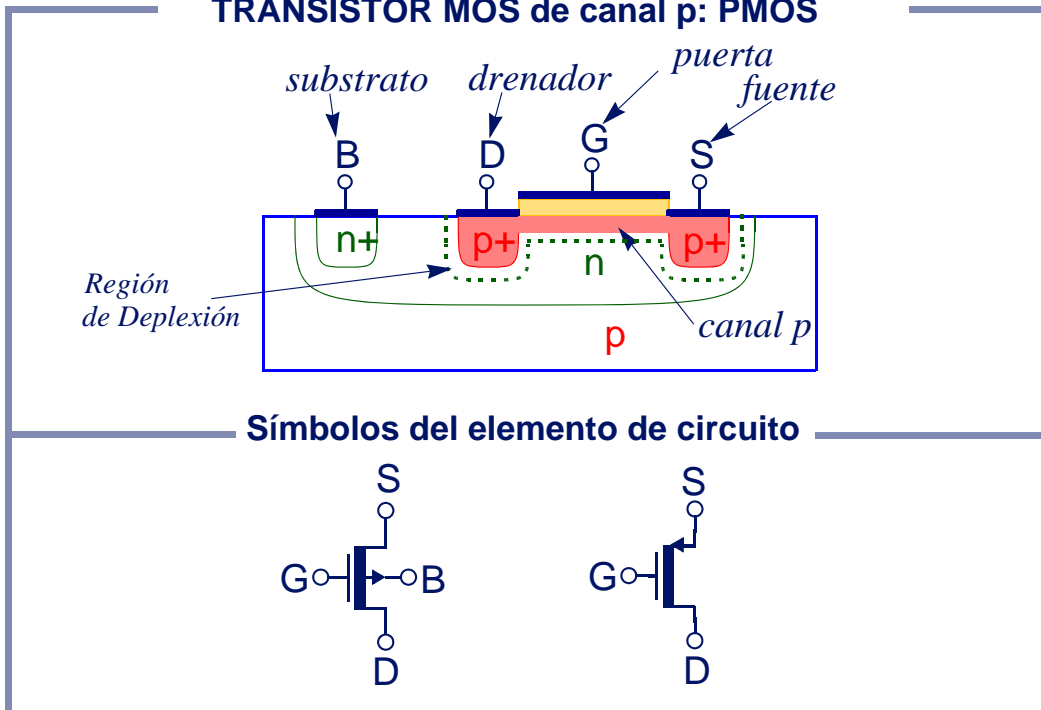
TRANSISTOR MOS de canal p: PMOS



TRANSISTOR MOS de canal n: NMOS



TRANSISTOR MOS de canal p: PMOS



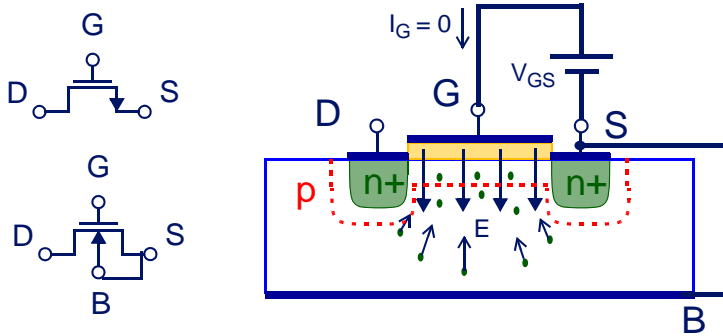
EL TRANSISTOR MOS DE ENRIQUECIMIENTO: REGIONES DE OPERACIÓN

7/29

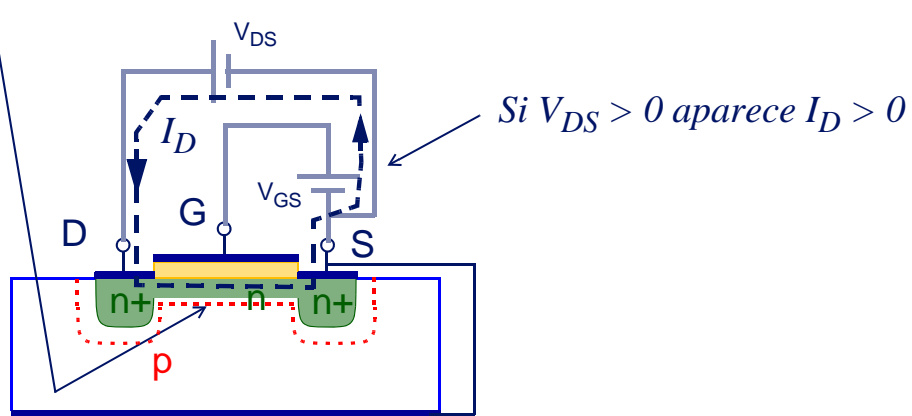
ZONA DE CORTE

Para que el transistor conduzca hacemos $V_{GS} \geq V_T$

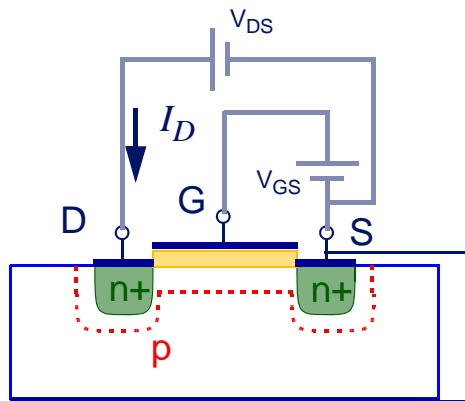
Tensión Umbral



Aparece un canal rico en electrones (tipo n)



Pero si $V_{GS} \leq V_T$ no hay canal. $I_D = 0$, y estamos en CORTE



EL TRANSISTOR MOS DE ENRIQUECIMIENTO: REGIONES DE OPERACIÓN

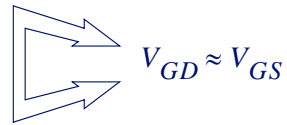
ZONA LINEAL U ÓHMICA

El transistor conduce $V_{GS} \geq V_T$

V_{DS} POSITIVA Y PEQUEÑA

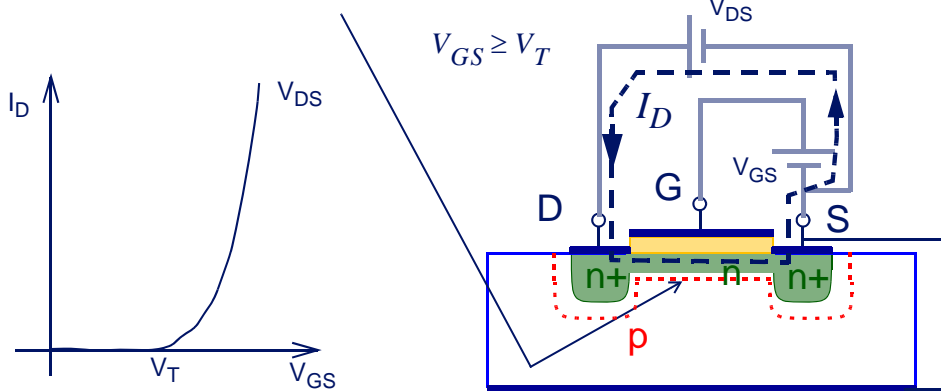
$$V_{GD} = V_{GS} - V_{DS}$$

V_{DS} PEQUEÑA

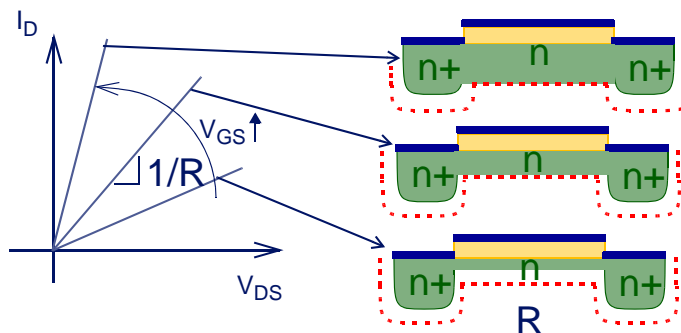


CAMPO ELÉCTRICO UNIFORME

Aparece un canal n uniforme



La anchura del canal depende de V_{GS}



☞ Corriente de arrastre a través de un conductor cuya sección y conductividad (resistencia) se controla con V_{GS}

EL TRANSISTOR MOS DE ENRIQUECIMIENTO: REGIONES DE OPERACIÓN

9/29

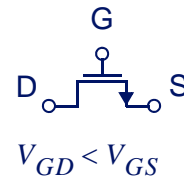
ZONA DE SATURACIÓN

El transistor conduce $V_{GS} \geq V_T$

V_{DS} POSITIVA Y GRANDE

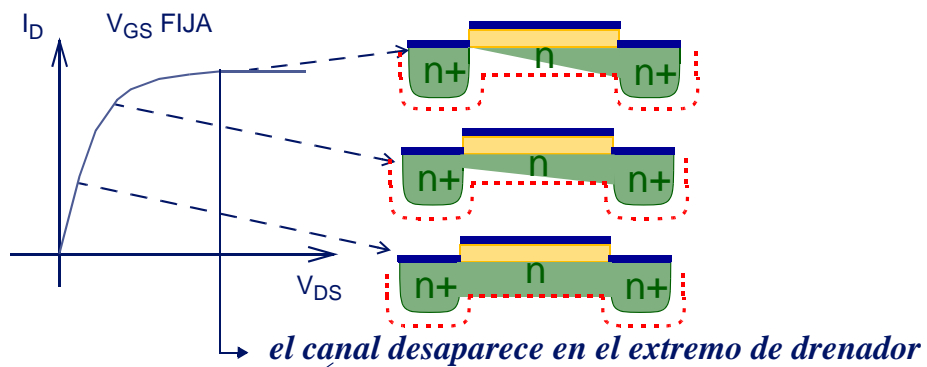
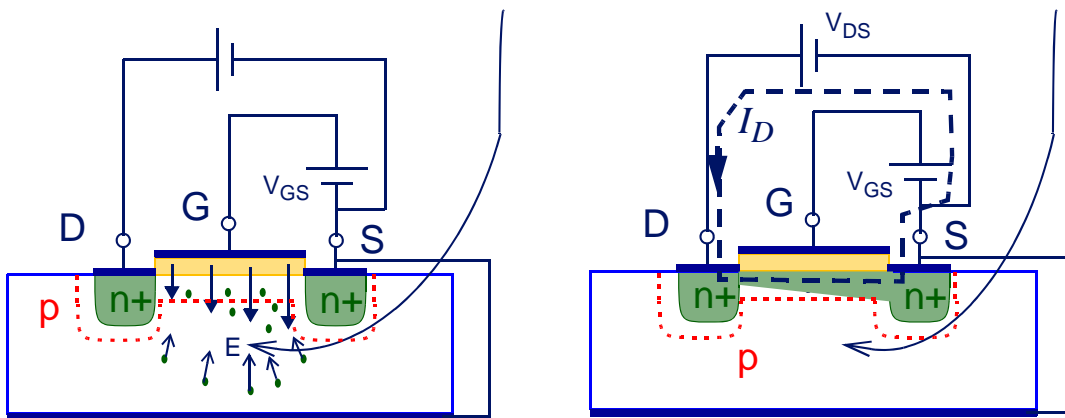
$$V_{GD} = V_{GS} - V_{DS}$$

V_{DS} GRANDE



CAMPO ELÉCTRICO **NO** UNIFORME

Se tiene un canal n no uniforme



$$V_{GD} = V_T$$

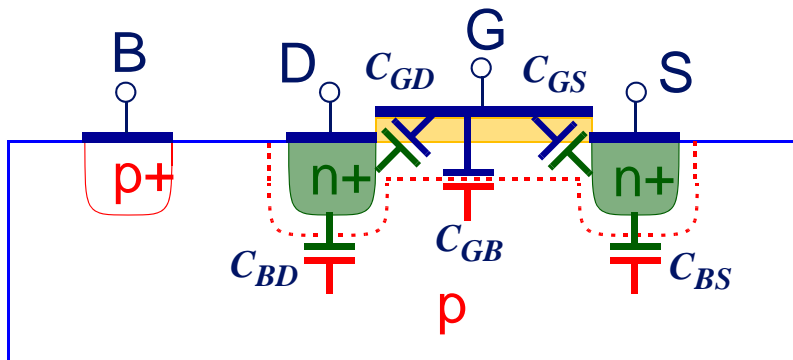
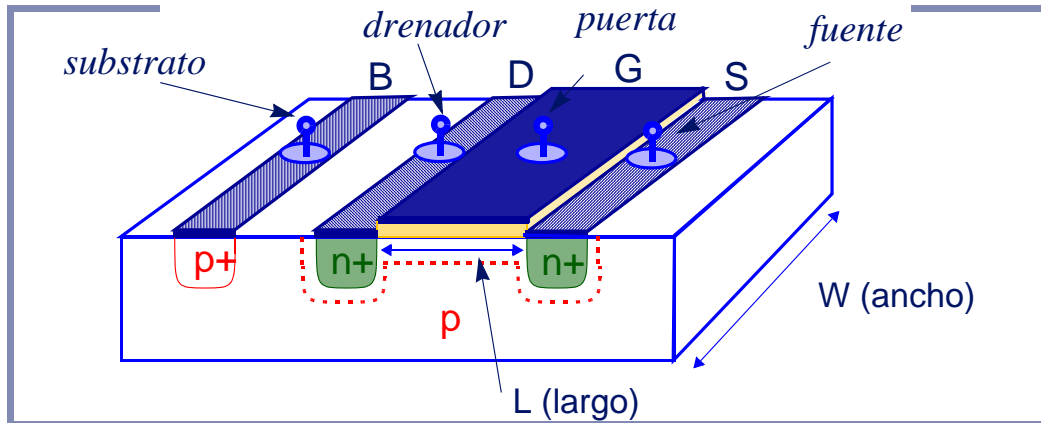
$$V_{GD} = V_{GS} - V_{DS}$$

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

 Corriente de difusión que no depende de V_{DS}

EL TRANSISTOR MOS: CAPACIDADES PARÁSITAS

10/29



C_{BD} corresponde a la capacidad de deplexión en la unión sustrato-drenador

C_{BS} corresponde a la capacidad de deplexión en la unión sustrato-fuente

C_{GB} corresponde a la capacidad parásita entre la puerta y el sustrato, con la capa de óxido como dieléctrico

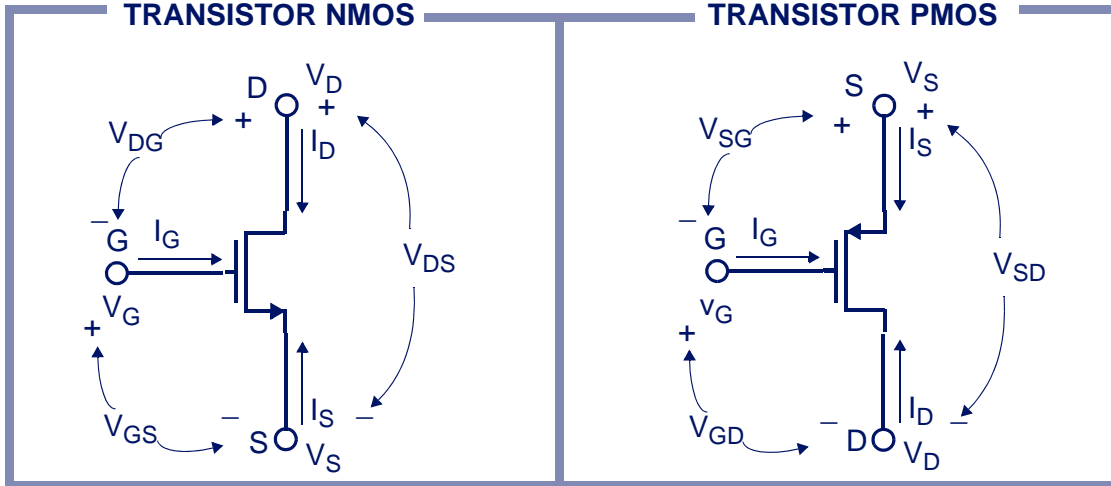
C_{GD} corresponde a la capacidad parásita entre la puerta y el drenador, con la capa de óxido como dieléctrico.

C_{GS} corresponde a la capacidad parásita entre la puerta y la fuente, con la capa de óxido como dieléctrico.

C_{GB} , C_{GD} y C_{GS} dependen principalmente de las dimensiones del transistor: W ancho y L Largo, del solapamiento de las regiones puerta fuente y puerta drenador, y del grosor de la capa de óxido,

De todas ellas depende fundamentalmente el comportamiento dinámico del transistor MOS

TRANSISTOR MOS COMO ELEMENTO DE CIRCUITO



Elemento de tres terminales: seis variables de circuito

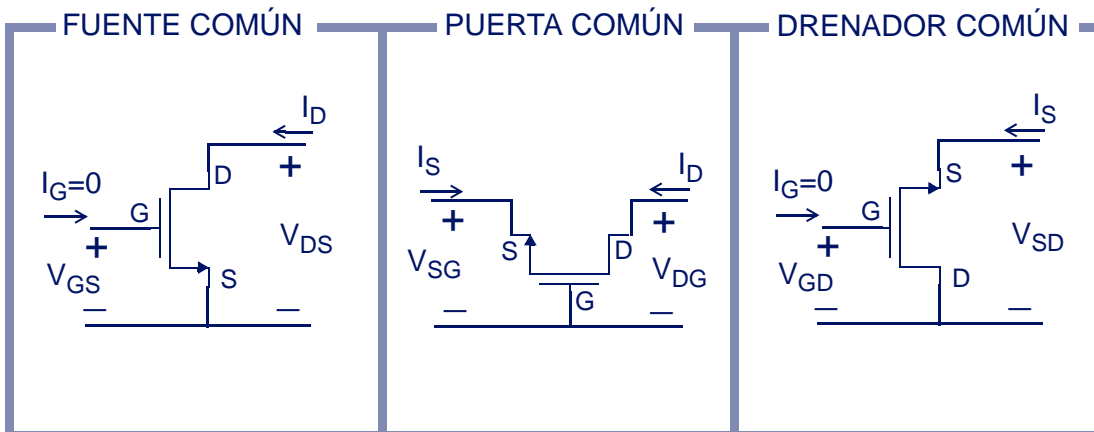
$$I_G, I_D, I_S \quad V_G, V_D, V_S \text{ o bien } \begin{matrix} V_{GS}, V_{DS}, V_{DG} \text{ (NMOS)} \\ V_{GD}, V_{SD}, V_{SG} \text{ (PMOS)} \end{matrix}$$

sólo cuatro variables independientes:

$$\begin{matrix} \text{LKI: } I_G + I_D + I_S = 0 & \text{LKV: } V_G + V_D + V_S = 0 \\ I_G = 0 & I_D + I_S = 0 & \text{LKV: } V_{GS} - V_{DS} + V_{DG} = 0 \text{ (NMOS)} \\ & & \text{LKV: } V_{GD} - V_{SD} + V_{SG} = 0 \text{ (PMOS)} \end{matrix}$$



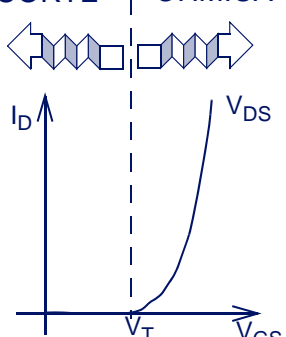
Tres configuraciones:



TRANSISTOR MOS COMO ELEMENTO DE CIRCUITO

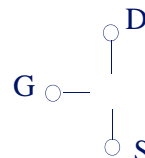
MODELO ESTÁTICO Y CONDICIONES

CORTE | **ÓHMICA Ó SATURACIÓN**



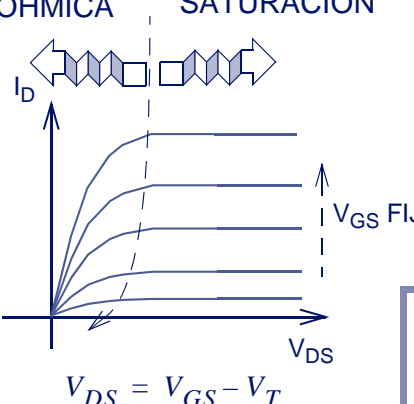
I_D vs V_{GS} graph showing V_T threshold.

CORTE



$V_{GS} \leq V_T$

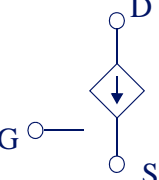
ÓHMICA | **SATURACIÓN**



I_D vs V_{DS} graph with V_{GS} FIJA.

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

SATURACIÓN



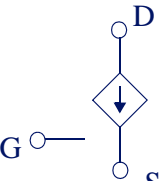
$I_D = \frac{\beta}{2}(V_{GS} - V_T)^2$
si $V_{GS} \geq V_T$
y $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$

ÓHMICA

$V_{DS} \ll V_{GS} - V_T$

$I_D \approx \beta(V_{GS} - V_T)V_{DS} = \frac{V_{DS}}{R}$

ÓHMICA



$I_D = \beta \left[(V_{GS} - V_T)V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$
si $V_{GS} \geq V_T$
y $V_{DS} \leq V_{GS} - V_T$

$R = (\beta(V_{GS} - V_T))^{-1}$

TRANSISTOR MOS COMO ELEMENTO DE CIRCUITO

TABLA RESUMEN DE MODELOS Y CONDICIONES

REGIÓN DE CORTE			
REGIÓN DE SATURACIÓN			
REGIÓN ÓMICA			

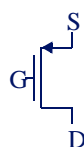
TRANSISTOR DE EMPOBRECIMIENTO

campo eléctrico con $V_{GS} < 0$

no hay canal para $V_{GS} = V_T < 0$

TRANSISTOR DE CANAL P

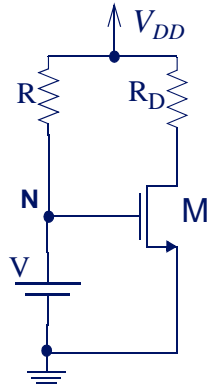
PMOS



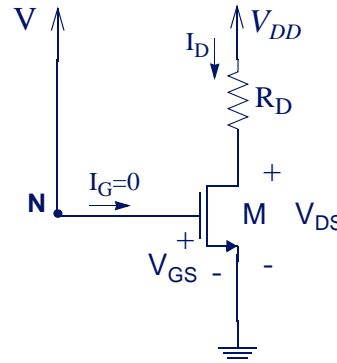
cambia la polaridad de los portadores

TRANSISTOR MOS COMO ELEMENTO DE CIRCUITO

Ejemplo 1: Determinar el valor de las variables de fuente común que determinan el punto de trabajo del transistor.



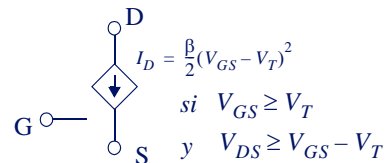
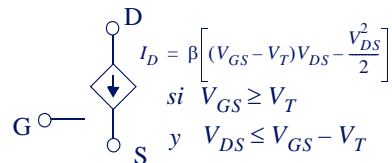
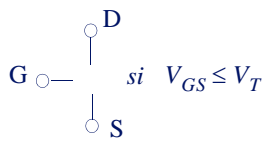
$V_{DD} = 10$ volt.
 $V = 5$ volt.
 $R_D = 22K\Omega$
 $R = 100K\Omega$
 $V_T = 3$ volt.
 $\beta_N = 0,2 \text{ mA/V}^2$



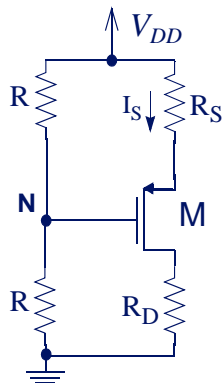
CORTE

ÓMICA

SATURACIÓN



Ejemplo 2: En el circuito se sabe que $I_S = 0,5 \text{ mA}$. Calcular el valor de β_P de M



$V_{DD} = 10$ volt.
 $R_S = 1K\Omega$
 $R_D = 9K\Omega$
 $V_T = 2$ volt.

Es claro que M conduce ($I_S > 0$)
 Y es necesario determinar si lo hace en óhmica o saturación

M1: $V_{DD} = R_S I_S + V_{SG} + \frac{V_{DD}}{2}$

M2: $V_{DD} = R_S I_S + V_{SD} + R_S I_D$

$$\left. \begin{aligned} \text{M1: } V_{SG} &= \frac{V_{DD}}{2} - R_S I_S \\ \text{M2: } V_{SD} &= V_{DD} - (R_S + R_D) I_S \end{aligned} \right\} \begin{aligned} V_{SG} &= 4,5 \geq 0 \\ V_{SD} &= 5 \geq 0 \end{aligned} \rightarrow V_{SD} > V_{SG} - V_T = 2,5$$

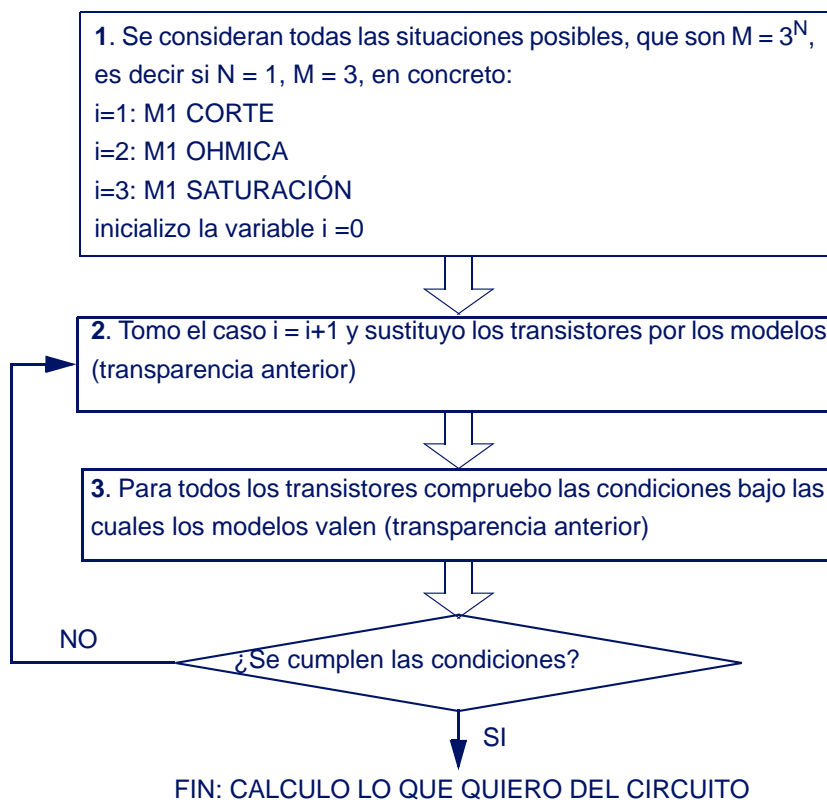
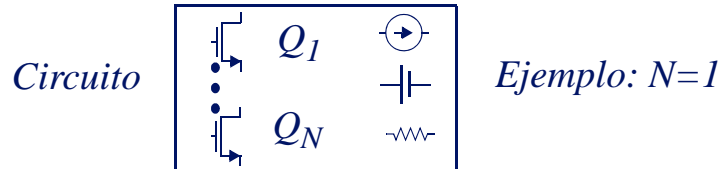
El transistor está en saturación

$$\beta_P = \frac{2I_S}{(V_{SG} - V_T)^2} \quad \beta_P = 0,16 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$$

Ej. 1 Sol. $I_D = 0,38\text{mA}$ $V_{GS} = 5$ volt. $V_{DS} = 1,58\text{volt}$.

TRANSISTOR MOS COMO ELEMENTO DE CIRCUITO

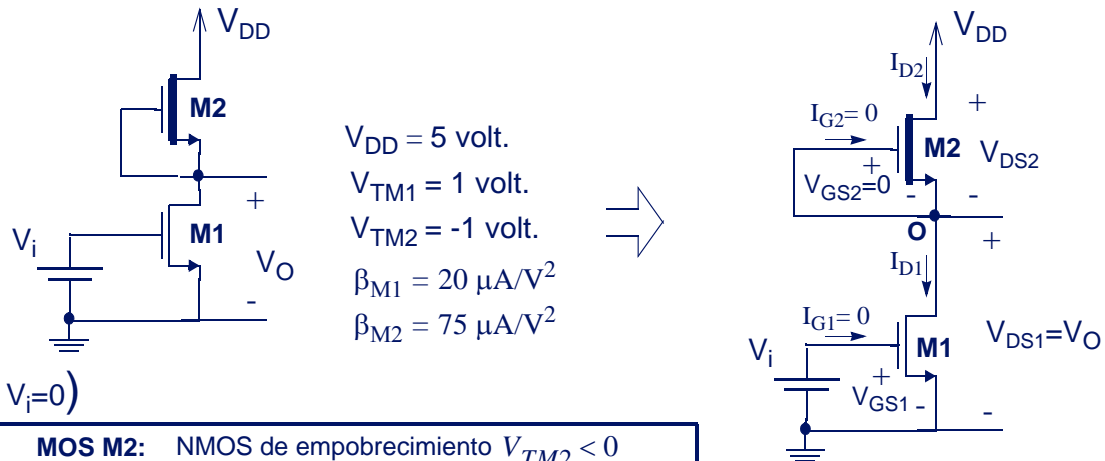
Un algoritmo de Análisis



TRANSISTOR MOS COMO ELEMENTO DE CIRCUITO

16/29

Ej 3: En este circuito, determinar el valor de V_O y el consumo para $V_i=0$ y $V_i=V_{DD}$.



MOS M2: NMOS de empobrecimiento $V_{TM2} < 0$

Como $V_{GS2} = 0 \rightarrow V_{GS2} > V_{TM2} \rightarrow$ M2 siempre conduce

Conducirá en su zona óhmica o en saturación dependiendo de si se verifica que $V_{DS2} \leq -V_{TM2}$ o bien $V_{DS2} \geq -V_{TM2}$

Como $V_{DS2} = V_{DD} - V_O$

M2 conducirá en su zona óhmica siempre que $V_O \geq V_{DD} + V_{TM2}$

M2 conducirá en su zona de saturación siempre que $V_O \leq V_{DD} + V_{TM2}$

MOS M1: NMOS de enriquecimiento $V_{TM1} > 0$

Como $V_{GS1} = V_i = 0 \rightarrow V_{GS1} < V_{TM1} \rightarrow$ M1 está en corte $\rightarrow I_{D1} = 0$

Para el nudo O se tiene $I_{D2} = I_{D1} + I_{G2}$ y dado que $I_{G2} = 0 \rightarrow I_{D2} = I_{D1} = 0$

La situación es tal que M1 está en corte y M2 conduce pero con corriente nula.

¡Esto solo es posible si M2 conduce en óhmica!

M2 no puede estar en saturación porque en ese caso $I_{D2} = \frac{\beta_{M2}}{2}(V_{GS2} - V_{TM2})^2$

$I_{D2} = \frac{\beta_{M2}}{2}(-V_{TM2})^2 > 0$ por lo que no puede ser $I_{D2} = 0$

Con M2 en zona óhmica $I_{D2} = \beta_{M2} \left[(V_{GS2} - V_{TM2})V_{DS2} - \frac{V_{DS2}^2}{2} \right] = 0$

$\left[(-V_{TM2})(V_{DD} - V_O) - \frac{(V_{DD} - V_O)^2}{2} \right] = 0 \quad \left| \quad V_O = \begin{cases} V_{DD} + 2V_{TM2} & \text{En óhmica} \\ V_{DD} & \end{cases} \quad V_O \geq V_{DD} + V_{TM2}$

$$V_O^2 - 2(V_{DD} + V_{TM2})V_O + (V_{DD}^2 + 2V_{DD}V_{TM2}) = 0$$

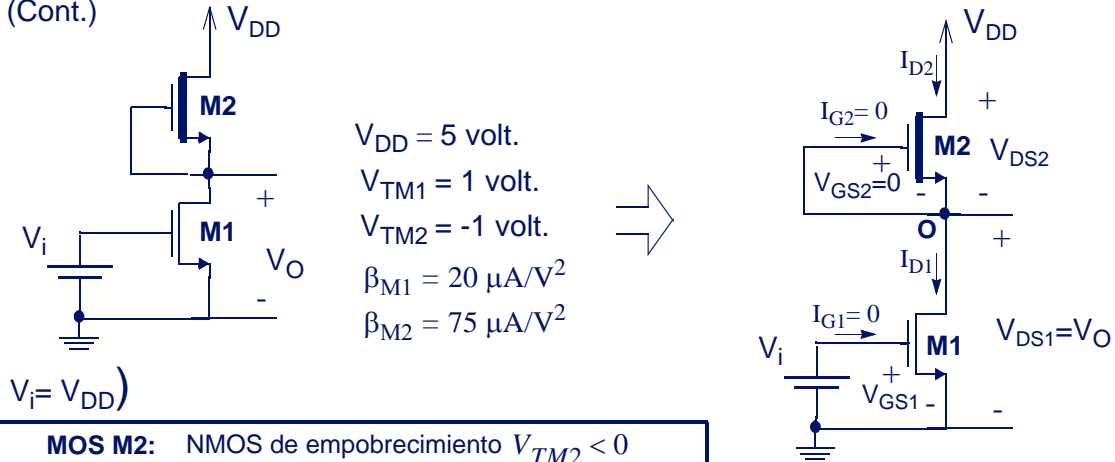
SOLUCIÓN

$$V_O = V_{DD} \quad P_{V_{DD}} = 0$$

17/29

TRANSISTOR MOS COMO ELEMENTO DE CIRCUITO

Ej 3: En este circuito, determinar el valor de V_O y el consumo para $V_i=0$ y $V_i=V_{DD}$.
(Cont.)



$V_i = V_{DD}$)

MOS M2: NMOS de empobrecimiento $V_{TM2} < 0$

Como $V_{GS2} = 0 \rightarrow V_{GS2} > V_{TM2} \rightarrow$ M2 siempre conduce

M2 conducirá en su zona óhmica siempre que $V_O \geq V_{DD} + V_{TM2}$

M2 conducirá en su zona de saturación siempre que $V_O \leq V_{DD} + V_{TM2}$

MOS M1: NMOS de enriquecimiento $V_{TM1} > 0$

Como $V_{GS1} = V_i = V_{DD} \rightarrow V_{GS1} > V_{TM1} \rightarrow$ M1 conduce

Conducirá en su zona óhmica o en saturación dependiendo de si se verifica que

$$V_{DS1} \leq V_{GS1} - V_{TM1} \quad \text{o bien} \quad V_{DS1} \geq V_{GS1} - V_{TM1}$$

Como $V_{DS1} = V_O$

M1 conducirá en su zona óhmica siempre que $V_O \leq V_{DD} - V_{TM1}$

M1 conducirá en su zona de saturación siempre que $V_O \geq V_{DD} - V_{TM1}$

La situación es tal que tanto M1 como M2 conducen,

pero hay que determinar en qué zona lo hace cada uno de ellos

Se tienen cuatro posibilidades:

- | | | |
|----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| a) M1 óhmica - M2 óhmica | $V_O \leq V_{DD} - V_{TM1}$ | $V_O \geq V_{DD} + V_{TM2}$ |
| b) M1 óhmica - M2 saturación | $V_O \leq V_{DD} - V_{TM1}$ | $V_O \leq V_{DD} + V_{TM2}$ |
| c) M1 saturación - M2 óhmica | $V_O \geq V_{DD} - V_{TM1}$ | $V_O \geq V_{DD} + V_{TM2}$ |
| d) M1 saturación - M2 saturación | $V_O \geq V_{DD} - V_{TM1}$ | $V_O \leq V_{DD} + V_{TM2}$ |

En cualquier caso para el nudo O se tiene $I_{D2} = I_{D1} + I_{G2}$

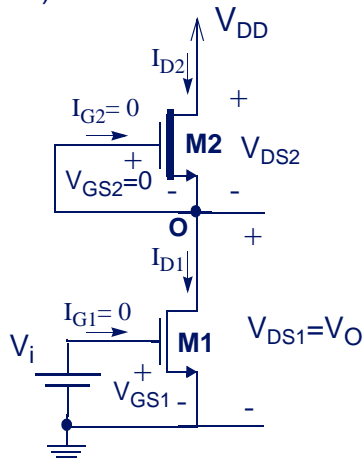
y dado que $I_{G2} = 0 \rightarrow I_{D2} = I_{D1}$

Por lo tanto hay que estudiar esta igualdad en cada uno de los cuatro casos

y ver cuál de ellos se verifica

TRANSISTOR MOS COMO ELEMENTO DE CIRCUITO 18/29

Ej 3: En este circuito, determinar el valor de V_O y el consumo para $V_i=0$ y $V_i=V_{DD}$.
(Cont.)



$$V_{DD} = 5 \text{ volt. } V_{TM1} = 1 \text{ volt. } V_{TM2} = -1 \text{ volt.}$$

$$\beta_{M1} = 20 \mu\text{A/V}^2 \quad \beta_{M2} = 75 \mu\text{A/V}^2$$

$V_i = V_{DD}$) (Continuación)

b) M1 óhmica - M2 saturación

$$\left. \begin{aligned} V_O &\leq V_{DD} - V_{TM1} \\ V_O &\leq V_{DD} + V_{TM2} \end{aligned} \right\} \rightarrow V_O \leq 4V$$

Analizamos $I_{D1(ohm)} = I_{D2(sat)}$

$$\beta_{M1} \left[(V_{GS1} - V_{TM1})V_{DS1} - \frac{V_{DS1}^2}{2} \right] = \frac{\beta_{M2}}{2} (V_{GS2} - V_{TM2})^2$$

$$\beta_{M1} \left[(V_{DD} - V_{TM1})V_O - \frac{V_O^2}{2} \right] = \frac{\beta_{M2}}{2} (-V_{TM2})^2$$

$$\frac{\beta_{M1}}{2} [2(V_{DD} - V_{TM1})V_O - V_O^2] = \frac{\beta_{M2}}{2} (-V_{TM2})^2$$

$$V_O^2 - 2(V_{DD} - V_{TM1})V_O + \frac{\beta_{M2}}{\beta_{M1}} V_{TM2}^2 = 0$$

Sustituyendo valores numéricos

$$V_O^2 - 8V_O + 3,75 = 0 \rightarrow V_O = \begin{cases} 7,5V \\ 0,5V \end{cases}$$

Dado que se ha de cumplir $V_O \leq 4V$ la solución válida es $V_O = 0,5V$

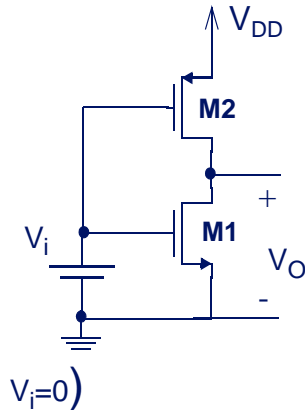
Para el cálculo de la potencia se tiene

$$\left. \begin{aligned} P_{V_{DD}} &= V_{DD} \cdot I_{D2(sat)} \\ I_{D2(sat)} &= \frac{\beta_{M2}}{2} (-V_{TM2})^2 = 37,5 \mu\text{A} \end{aligned} \right\} \rightarrow P_{V_{DD}} = 0,1775 \text{ mW}$$

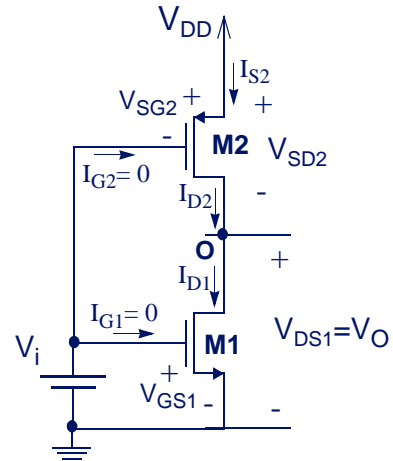
TRANSISTOR MOS COMO ELEMENTO DE CIRCUITO

19/29

Ej 4: En este circuito, determinar el valor de V_O y el consumo para $V_i=0$ y $V_i=V_{DD}$.



$$\begin{aligned} V_{DD} &= 5 \text{ volt.} \\ V_{TM1} &= 1 \text{ volt.} \\ V_{TM2} &= 1 \text{ volt.} \\ \beta_{M1} &= 20 \mu\text{A/V}^2 \\ \beta_{M2} &= 75 \mu\text{A/V}^2 \end{aligned}$$



MOS M2: PMOS de enriquecimiento $V_{TM2} > 0$

Como $V_{SG2} = V_{DD} - V_i = V_{DD} \rightarrow V_{SG2} > V_{TM2} \rightarrow$ M2 conduce

Conducirá en su zona óhmica o en saturación dependiendo de cual sea la relación

$$V_{SD2} \leq V_{DD} - V_{TM2} \quad \text{o bien} \quad V_{SD2} \geq V_{DD} - V_{TM2}$$

Como $V_{SD2} = V_{DD} - V_O$

M2 conducirá en su zona óhmica siempre que $V_O \geq V_{TM2}$

M2 conducirá en su zona de saturación siempre que $V_O \leq V_{TM2}$

MOS M1: NMOS de enriquecimiento $V_{TM1} > 0$

Como $V_{GS1} = V_i = 0 \rightarrow V_{GS1} < V_{TM1} \rightarrow$ M1 está en corte $\rightarrow I_{D1} = 0$

Para el nudo O se tiene $I_{D2} = I_{D1}$ y dado que $I_{D1} = 0 \rightarrow I_{D2} = 0$

La situación es tal que M1 está en corte y M2 conduce pero con corriente nula.

¡Esto solo es posible si M2 conduce en óhmica!

M2 no puede estar en saturación por que en ese caso $I_{D2} = \frac{\beta_{M2}}{2}(V_{SG2} - V_{TM2})^2$

$$I_{D2} = \frac{\beta_{M2}}{2}(V_{DD} - V_{TM2})^2 > 0 \quad \text{por lo que no puede ser} \quad I_{D2} = 0$$

Con M2 en zona óhmica $I_{D2} = \beta_{M2} \left[(V_{SG2} - V_{TM2})V_{SD2} - \frac{V_{SD2}^2}{2} \right] = 0$

$$\left[(V_{DD} - V_{TM2})(V_{DD} - V_O) - \frac{(V_{DD} - V_O)^2}{2} \right] = 0 \quad V_O \leq \begin{cases} -(V_{DD} - 2V_{TM2}) \\ V_{DD} \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{En óhmica} \\ V_O \geq V_{TM2} \end{array}$$

$$(V_{DD} - V_O) \cdot ((V_{DD} - 2V_{TM2}) + V_O) = 0$$

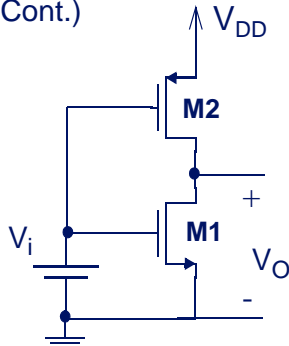
SOLUCIÓN

$$V_O = V_{DD} \quad P_{V_{DD}} = 0$$

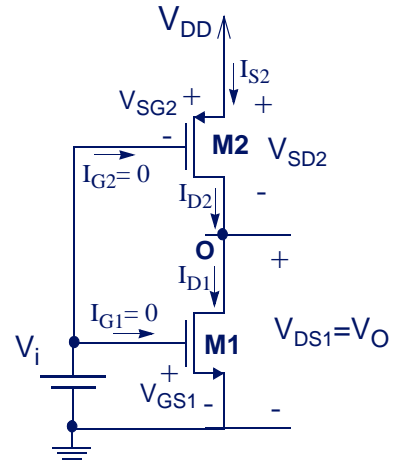
TRANSISTOR MOS COMO ELEMENTO DE CIRCUITO

20/29

Ej 4: En este circuito, determinar el valor de V_O y el consumo para $V_i=0$ y $V_i=V_{DD}$.
(Cont.)



$V_{DD} = 5 \text{ volt.}$
 $V_{TM1} = 1 \text{ volt.}$
 $V_{TM2} = 1 \text{ volt.}$
 $\beta_{M1} = 20 \mu\text{A/V}^2$
 $\beta_{M2} = 75 \mu\text{A/V}^2$



$V_i=V_{DD}$)

MOS M2: PMOS de enriquecimiento $V_{TM2} > 0$

Como $V_{SG2} = V_{DD} - V_i = 0 \rightarrow V_{SG2} < V_{TM2} \rightarrow$ M2 está en corte $\rightarrow I_{D2} = 0$

MOS M1: NMOS de enriquecimiento $V_{TM1} > 0$

Como $V_{GS1} = V_i = V_{DD} \rightarrow V_{GS1} > V_{TM1} \rightarrow$ M1 conduce

Conducirá en su zona ómica o en saturación dependiendo de cual sea la relación

$$V_{DS1} \leq V_{DD} - V_{TM1} \quad \text{o bien} \quad V_{DS1} \geq V_{DD} - V_{TM1}$$

Como $V_{DS1} = V_O$

M1 conducirá en su zona ómica siempre que $V_O \leq V_{DD} - V_{TM1}$

M1 conducirá en su zona de saturación siempre que $V_O \geq V_{DD} - V_{TM1}$

Para el nudo O se tiene $I_{D2} = I_{D1}$ y dado que $I_{D2} = 0 \rightarrow I_{D1} = 0$

La situación es tal que M2 está en corte y M1 conduce pero con corriente nula.

¡Esto solo es posible si M1 conduce en ómica!

M1 no puede estar en saturación por que en ese caso $I_{D1} = \frac{\beta_{M1}}{2}(V_{GS1} - V_{TM1})^2$

$$I_{D1} = \frac{\beta_{M1}}{2}(V_{DD} - V_{TM1})^2 > 0 \quad \text{por lo que no puede ser } I_{D1} = 0$$

Con M1 en zona ómica $I_{D1} = \beta_{M1} \left[(V_{GS1} - V_{TM1})V_{DS1} - \frac{V_{DS1}^2}{2} \right] = 0$

$$\left[(V_{DD} - V_{TM2})V_O - \frac{V_O^2}{2} \right] = 0$$

$$V_O \cdot (2(V_{DD} - V_{TM1}) - V_O) = 0$$

$$V_O \begin{cases} \rightarrow 2(V_{DD} - V_{TM1}) \\ \rightarrow 0 \end{cases}$$

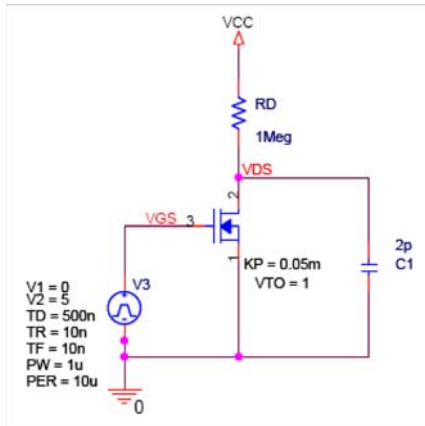
En ómica
 $V_O \leq V_{DD} - V_{TM1}$

SOLUCIÓN

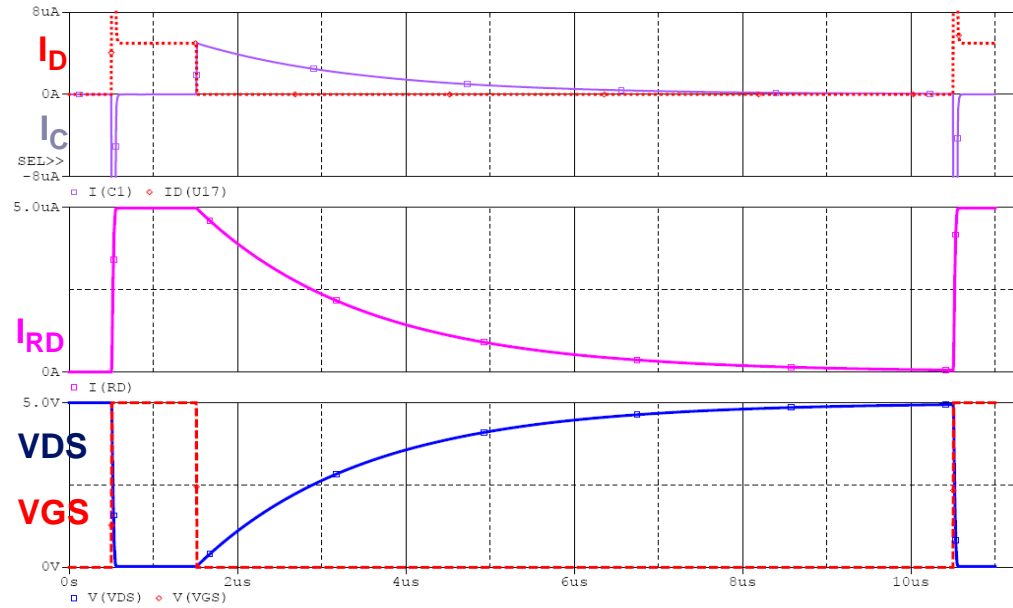
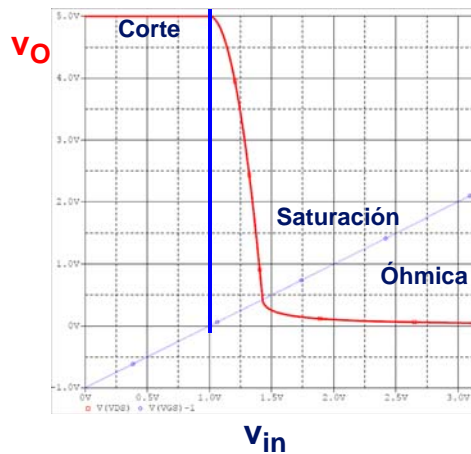
$$V_O = 0 \quad P_{V_{DD}} = 0$$

COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL TRANSISTOR MOSFET: NMOS EN CONMUTACIÓN

- Respuesta a un pulso



Característica de Transferencia



C1 modela las capacidades parásitas del transistor NMOS vistas desde el terminal de drenador

- Transición corte - óhmica

- **Tiempo de propagación de alto a bajo:** C1, que está cargado inicialmente, se descarga a través una fuente de corriente: El transistor NMOS, inicialmente en Saturación y finalmente en Óhmica (resistencia pequeña)

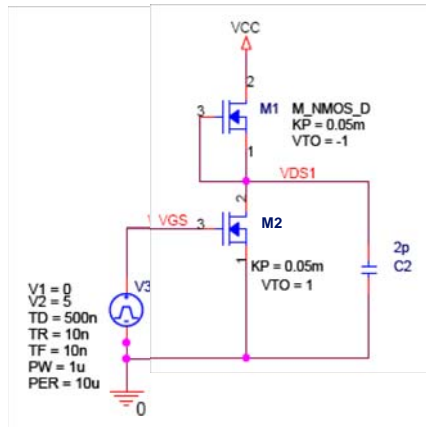
- Transición óhmica - corte

- **Tiempo de propagación de bajo a alto:** C1, que está descargado inicialmente, se carga a través de la resistencia de drenador R_D (resistencia más elevada)

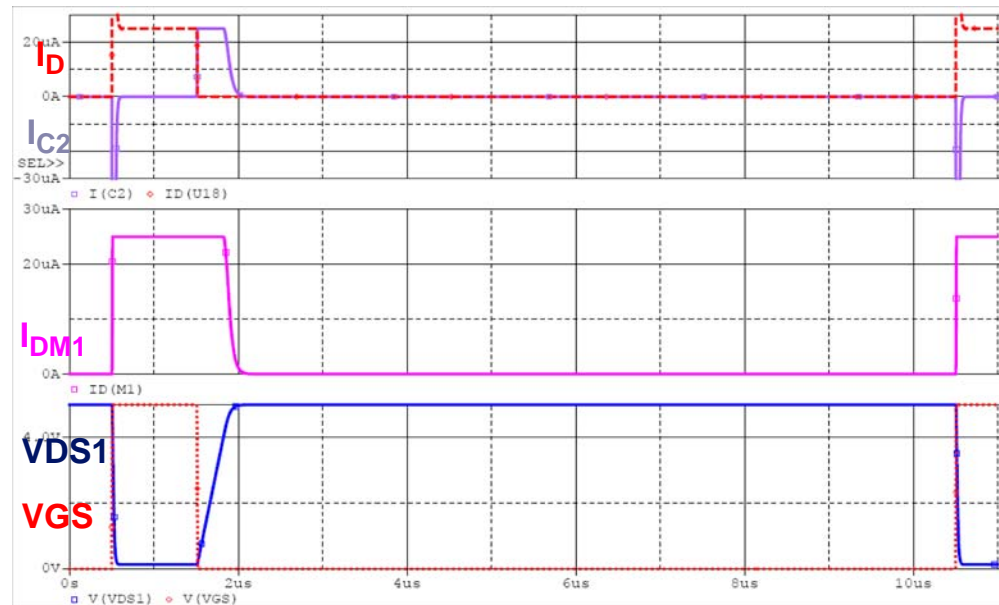
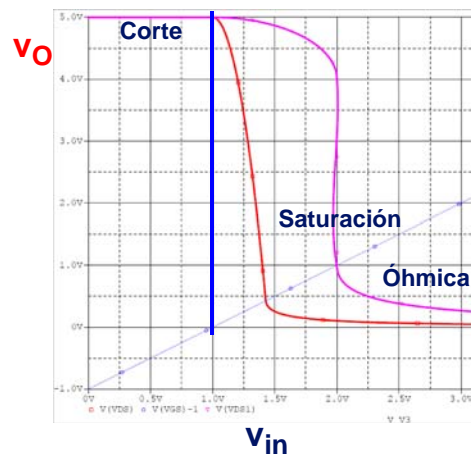
Hay consumo de potencia estático y dinámico

COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL TRANSISTOR MOSFET: NMOS EN CONMUTACIÓN

- Respuesta a un pulso



Característica de Transferencia



C2 modela las capacidades parásitas de ambos TNMOS vistas desde el terminal de salida

- Transición corte - óhmica

- **Tiempo de propagación de alto a bajo:** C2, que está cargado inicialmente, se descarga a través una fuente de corriente: El transistor M2, inicialmente en Saturación y finalmente en Óhmica (resistencia pequeña)

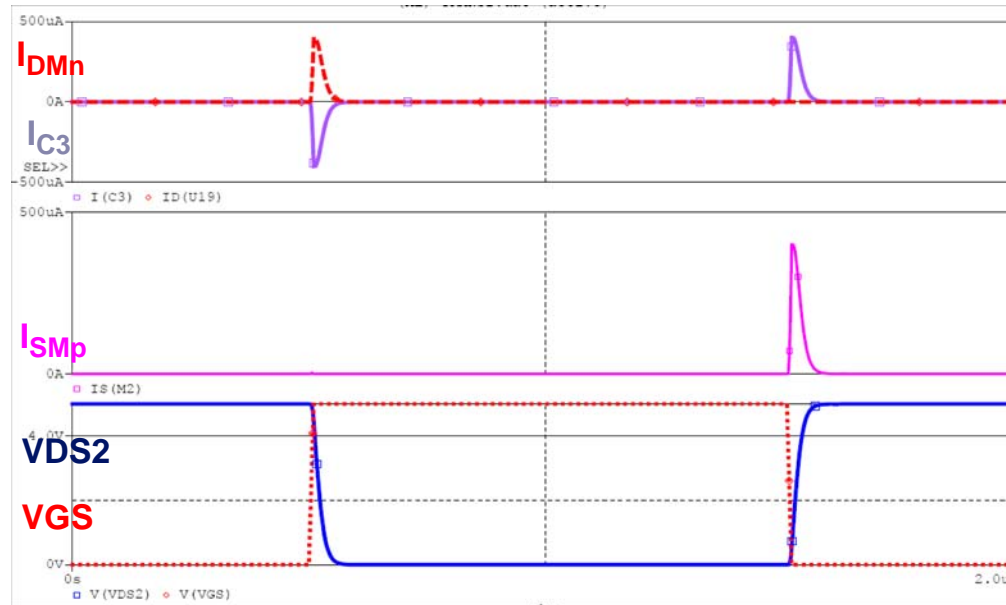
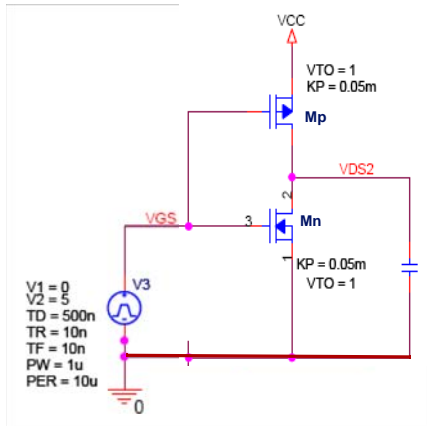
- Transición óhmica - corte

- **Tiempo de propagación de bajo a alto:** C2, que está descargado inicialmente, se carga a través de una fuente de corriente: El transistor M1, que trabaja siempre en Saturación.

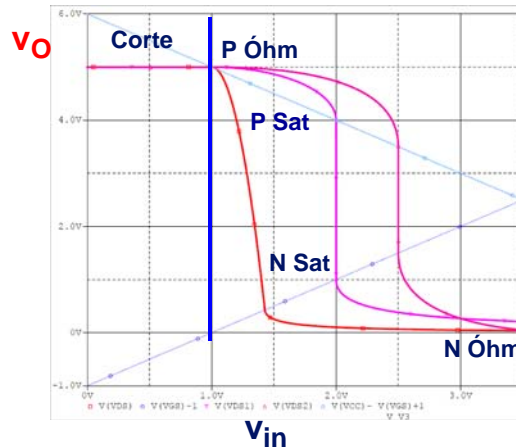
Hay consumo de potencia estático y dinámico

COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL TRANSISTOR MOSFET: CMOS EN CONMUTACIÓN

- Respuesta a un pulso



Característica de Transferencia



C3 modela las capacidades parásitas de ambos TMOS vistas desde el terminal de salida

- Transición corte - óhmica

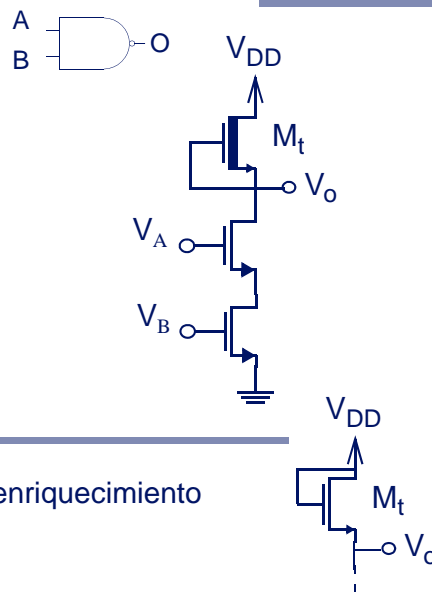
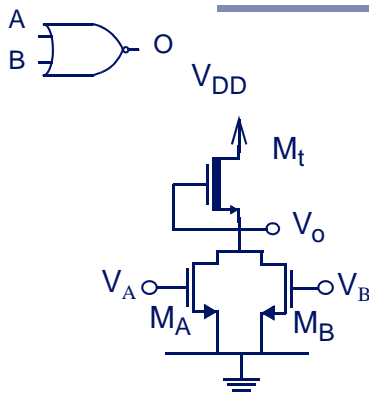
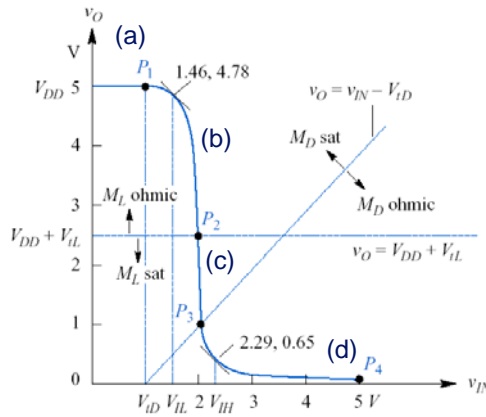
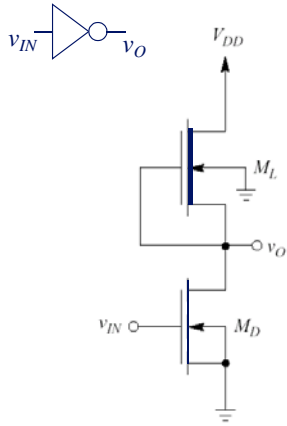
- Tiempo de propagación de alto a bajo: C3, que está cargado inicialmente, se descarga a través una fuente de corriente: El transistor Mn, inicialmente en Saturación y finalmente en Óhmica (resistencia pequeña)

- Transición óhmica - corte

- Tiempo de propagación de bajo a alto: C3, que está descargado inicialmente, se carga a través de una fuente de corriente: El transistor Mp, inicialmente en Saturación, y finalmente en Óhmica.

Sólo hay consumo de potencia en las transiciones: consumo dinámico

Familia lógica NMOS



M_t puede ser de enriquecimiento

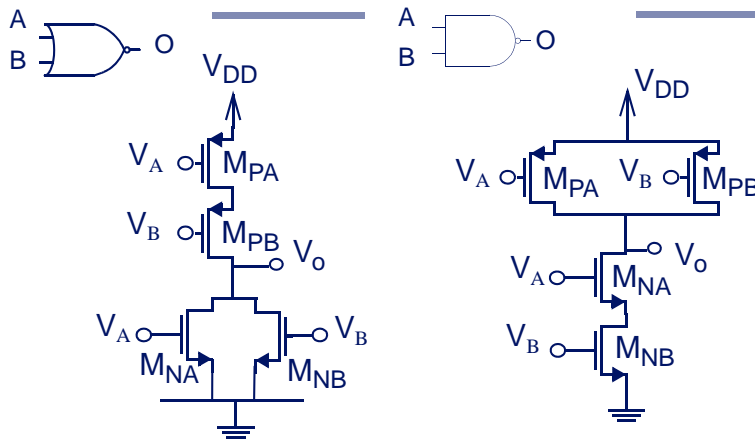
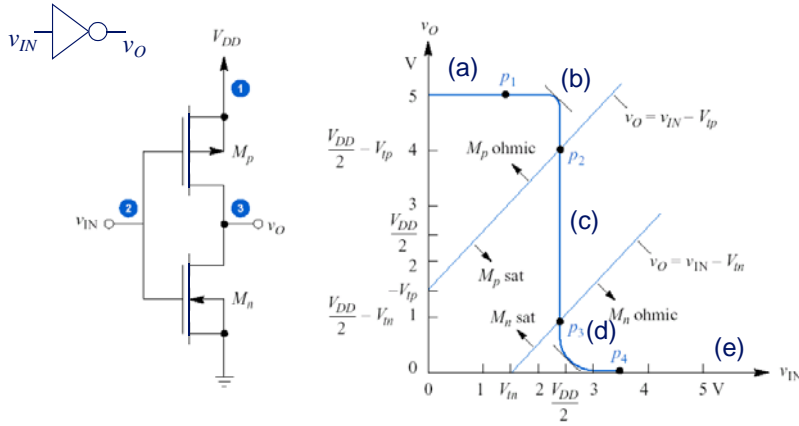
Calidad:

- ◆ Fan-out: cuantas más puertas, más retraso
- ◆ Margen de ruido: 1.3V
- ◆ Retraso: 10ns
- ◆ Consumo: 0.312mW (crece con la frecuencia)



Se utiliza para hacer circuitos grandes en un chip

Familia lógica CMOS



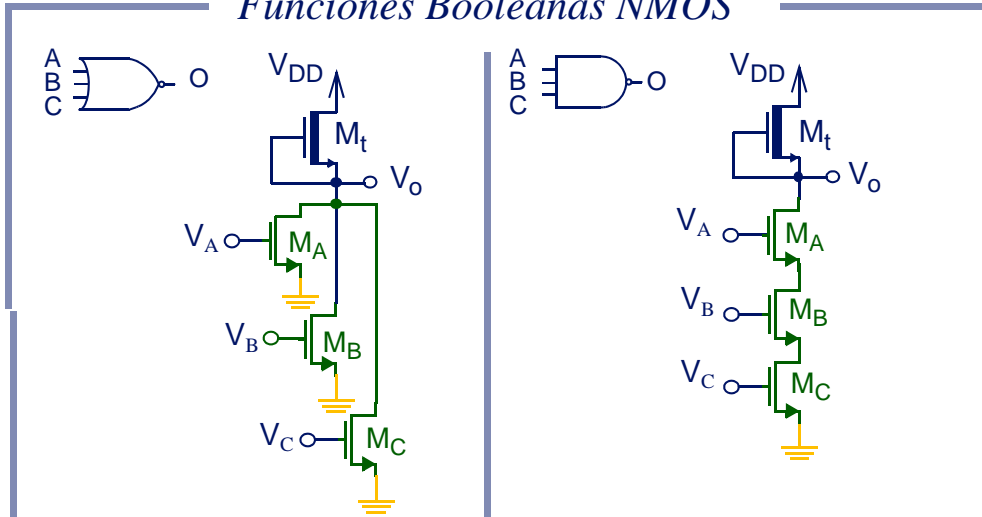
Calidad:

- ◆ Fan-out: cuantas más puertas, más retraso
- ◆ Margen de ruido: 2.25V
- ◆ Retraso: 8ns

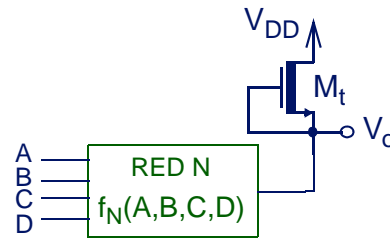
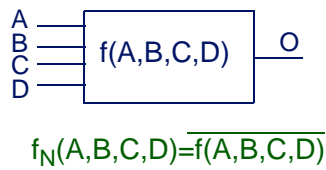
Comparación TTL/MOS en cuanto a consumo:

$V_{cc}=5V, C_L=50pF$	100kHz	5 MHz	100MHz
Consumo 74LS00 (TTL)	3 mW	3.5 mW	5 mW
Consumo 74HC00 (CMOS)	0.250 mW	3.5 mW	150 mW

Funciones Booleanas NMOS

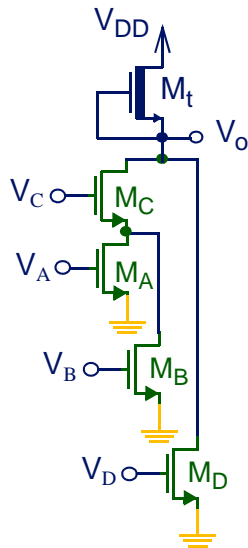


Estructura básica NMOS



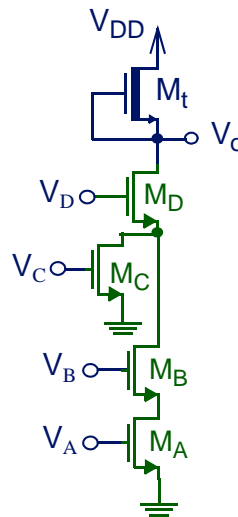
Ejemplos de funciones NMOS

$f(A, B, C, D) = \overline{(A + B)C + D}$



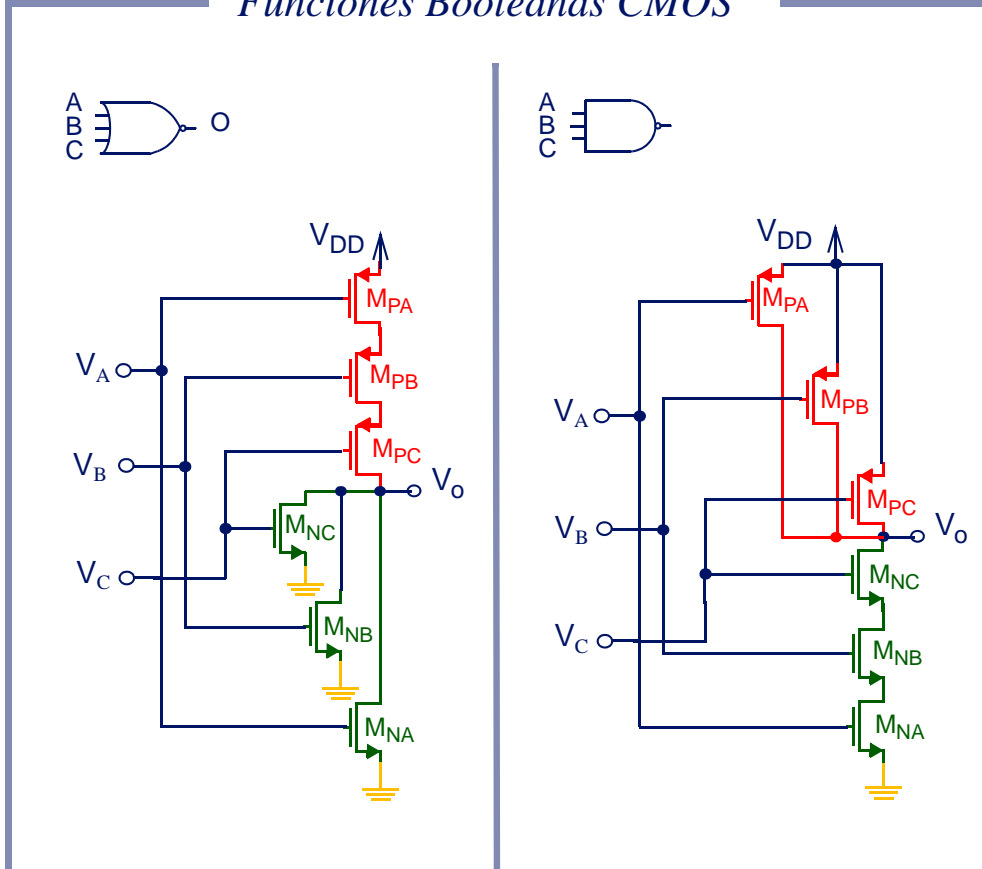
$f_N(A, B, C, D) = (A + B)C + D$

$f(A, B, C, D) = \overline{(AB + C)D}$



$f_N(A, B, C, D) = (AB + C)D$

Funciones Booleanas CMOS

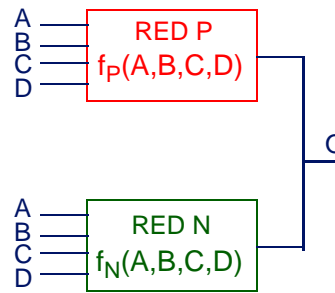


Estructura básica CMOS

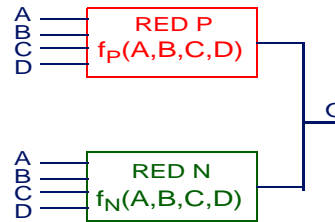


$$f_P(A,B,C,D) = f(\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}, \bar{D})$$

$$f_N(A,B,C,D) = \overline{f(A,B,C,D)}$$



Funciones Booleanas CMOS



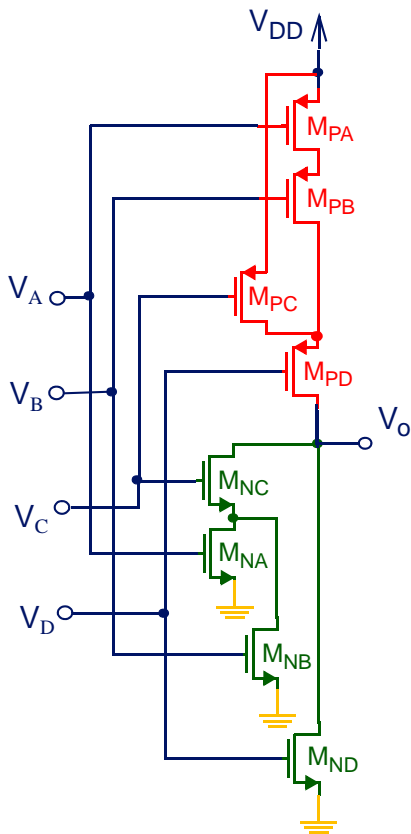
Ejemplos de funciones CMOS

$$f(A, B, C, D) = \overline{(A + B)C + D}$$

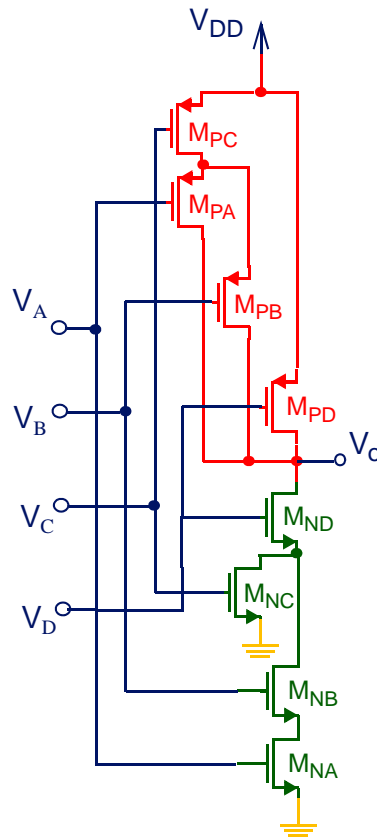
$$f(A, B, C, D) = \overline{(AB + C)D}$$

$$f_p(\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}, \bar{D}) = \overline{(\bar{A} + \bar{B})\bar{C} + \bar{D}} = (AB + C)D$$

$$f_p(\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}, \bar{D}) = \overline{(\bar{A}\bar{B} + \bar{C})\bar{D}} = (A + B)C + D$$



$$f_n(A, B, C, D) = (A + B)C + D$$

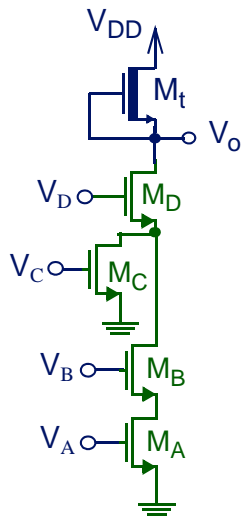


$$f_n(A, B, C, D) = (AB + C)D$$

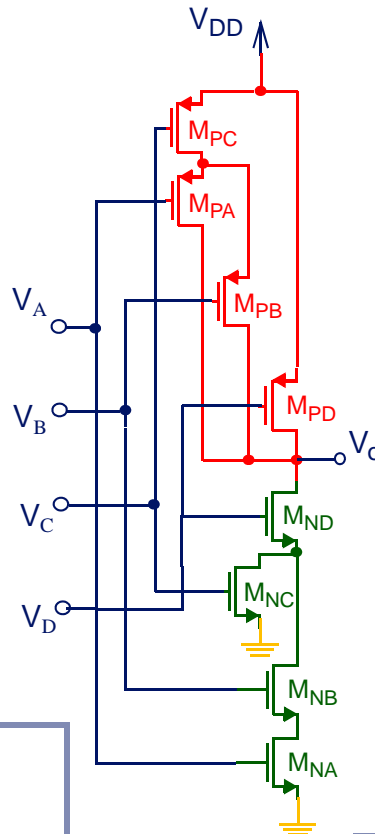
Comparación entre implementaciones

Ejemplo: Función $f(A, B, C, D) = \overline{(AB + C)D}$

Función Booleana NMOS
(5 transistores)



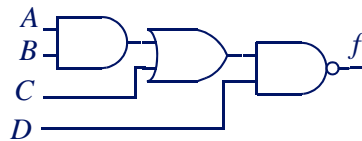
Función Booleana CMOS
(8 transistores)



Circuito lógico con puertas lógicas diversas:

NMOS (13 transistores)
CMOS (16 transistores)

$$f(A, B, C, D) = \overline{(AB + C)D}$$



Circuito lógico con puertas lógicas NAND:

NMOS (12 transistores)
CMOS (16 transistores)

$$f(A, B, C, D) = \overline{\overline{\overline{ABD}} \cdot \overline{\overline{CD}}}$$

