

EL TRANSISTOR MOSFET

Universidad de Oviedo

CONTENIDO

1º TRANSISTORES

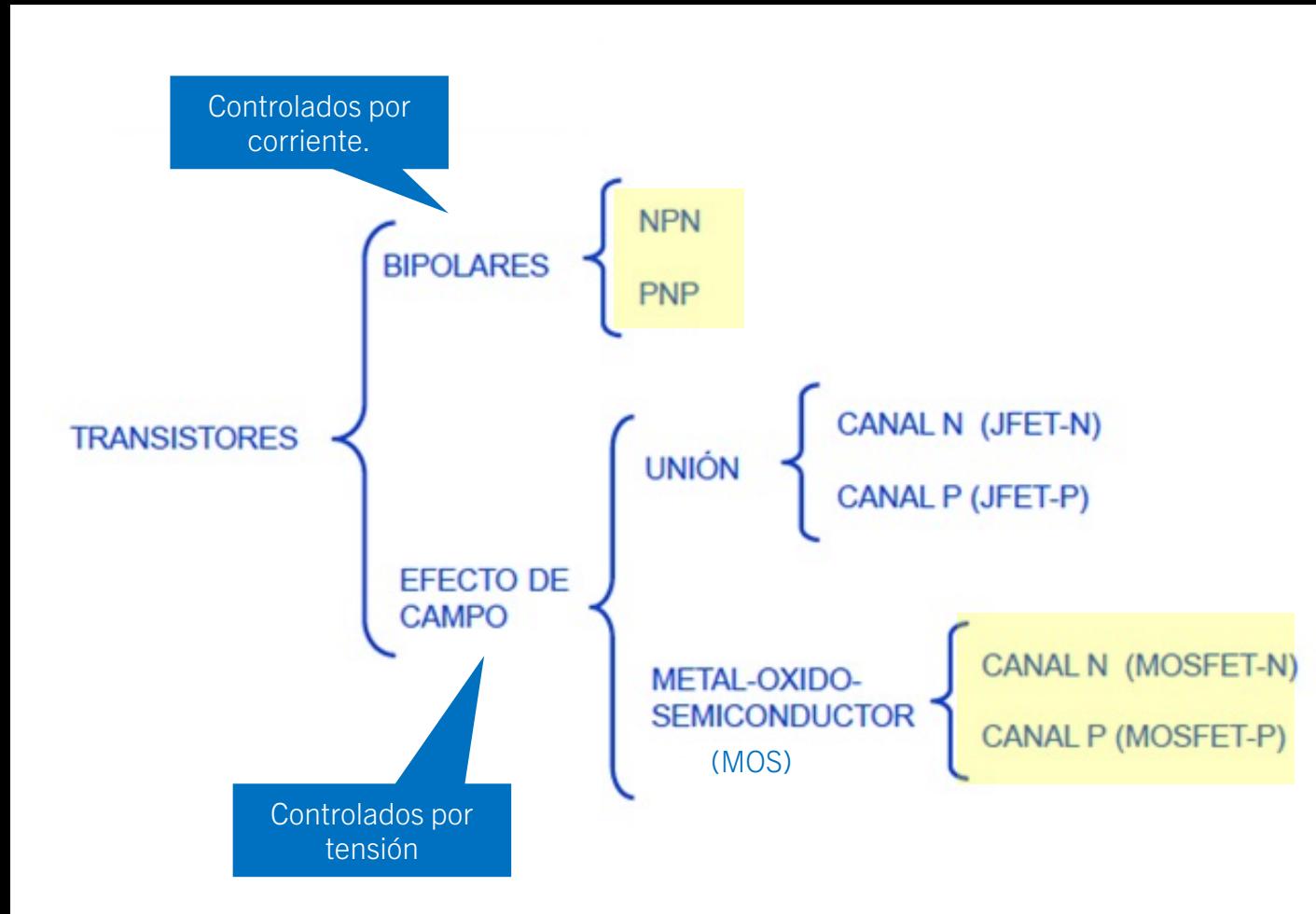
2º ESTRUCTURA DEL MOSFET

3º MODELO DEL MOSFET

4º CIRCUITOS DIGITALES: PUERTAS CMOS

5º TECNOLOGÍAS MODERNAS

TRANSISTORES



JFET: Join Field Effect Transistor

MOSFET: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

TRANSISTORES



Una de las fotografías oficiales (1948) con la que los Laboratorios Bell anunciaron la invención del transistor: John Bardeen (izquierda), William Shockley (centro) y Walter Brattain (derecha). Premio Nobel 1956.



Transistor de puntas de contacto
1947



Historia

CONTENIDO

1º TRANSISTORES

2º ESTRUCTURA DEL MOSFET

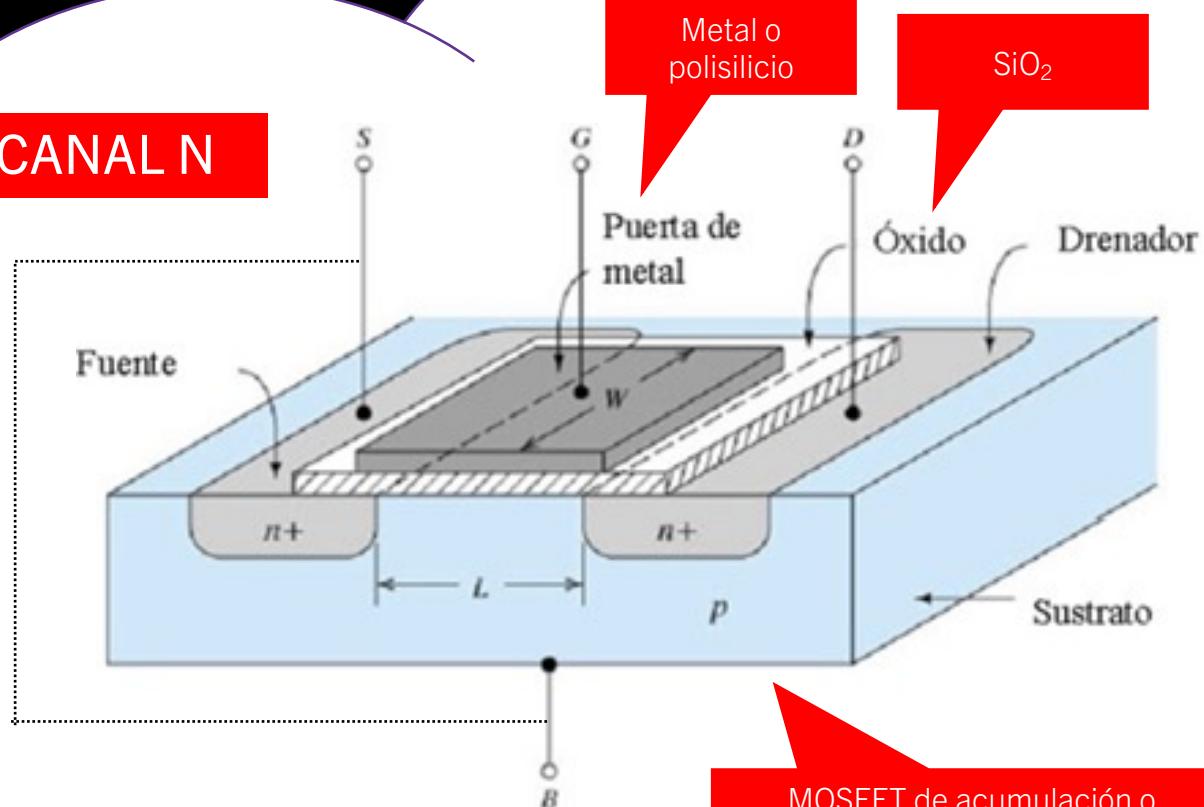
3º MODELO DEL MOSFET

4º CIRCUITOS DIGITALES: PUERTAS CMOS

5º TECNOLOGÍAS MODERNAS

TRANSISTORES MOSFET

CANAL N



MOSFET de acumulación o
enriquecimiento de canal N.
L : longitud del canal
W: ancho del canal

Metal o
polisilicio

SiO₂

Puerta de
metal

Óxido

Drenador

Fuente

W

p

Sustrato

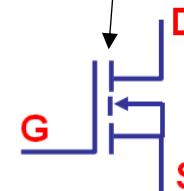
B

S

G

D

canal



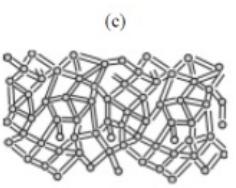
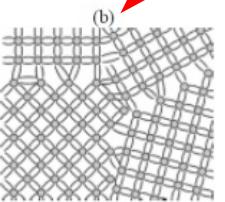
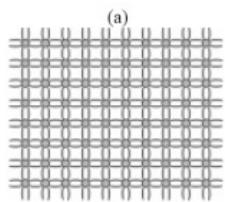
MOSFET de enriquecimiento
(acumulación) de canal N



Fabricación CI

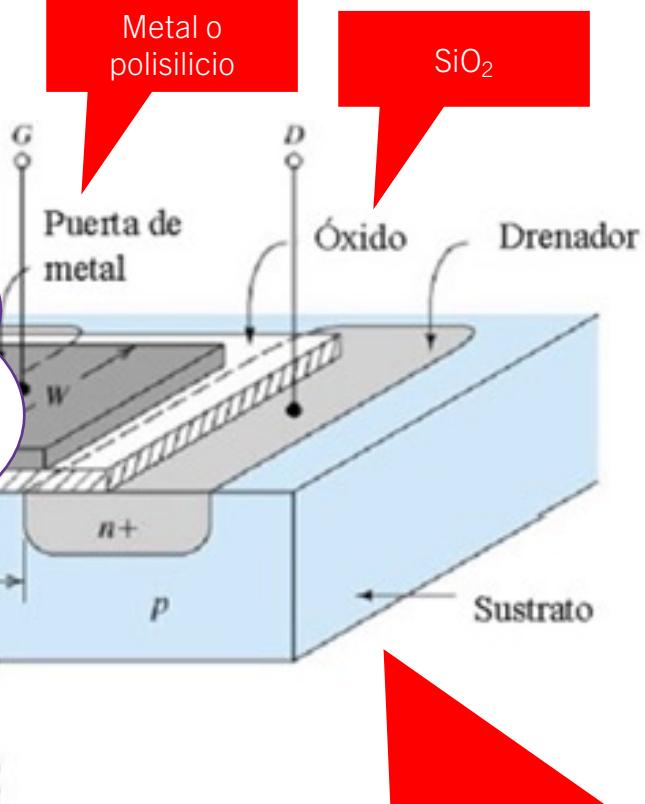
TRANSISTORES MOSFET

CANAL N

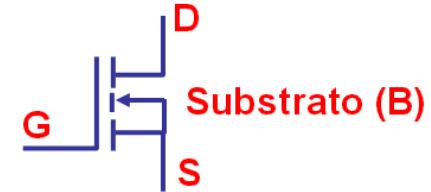


Polisilicio,
dominios de
1um

Esquema de la estructura atómica de Si
(a)monocristalino c-Si, (b) multicristalino mc-Si y (c) amorfico a-Si



MOSFET de acumulación o enriquecimiento de canal N.
L es la longitud del canal y W es el ancho del canal



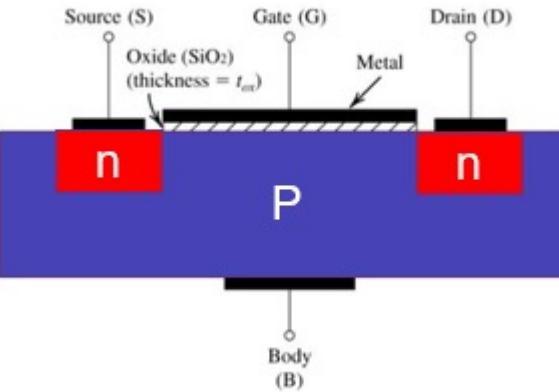
MOSFET de enriquecimiento
(acumulación) de canal N



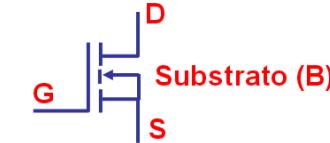
Fabricación CI

TRANSISTORES MOSFET

CANAL N

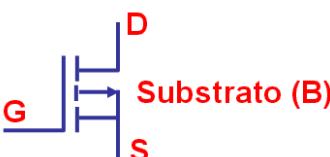
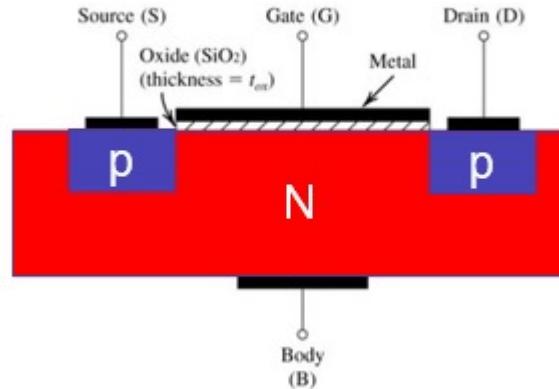


Corte transversal



MOSFET de enriquecimiento
(acumulación) de canal N

CANAL P

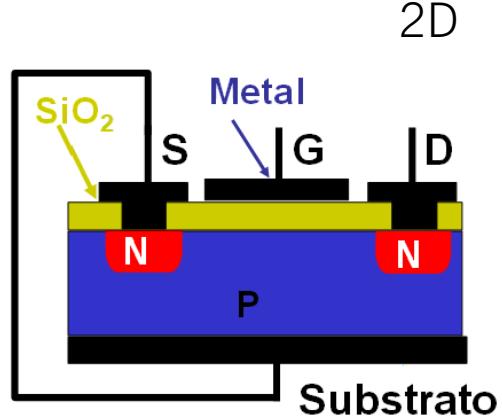


MOSFET de enriquecimiento
(acumulación) de canal P

UN SUBSTRATO TIPO P CON DOS ISLAS TIPO N, DIÓXIDO DE SILICIO (AISLANTE) Y METAL.

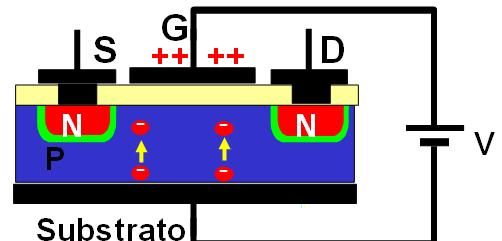
1

TRES TERMINALES:
FUENTE (S), PUERTA
(G) Y DRENADOR (D)



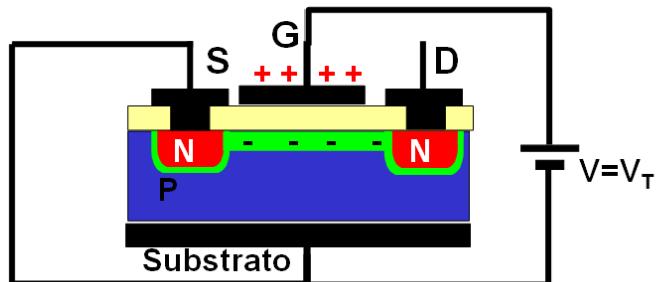
- Al aplicar una tensión positiva a la puerta respecto a la fuente, se inducen cargas negativas en la zona de substrato más cercana al aislante

CANAL N



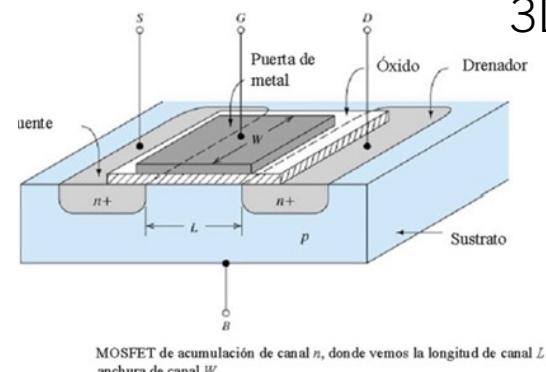
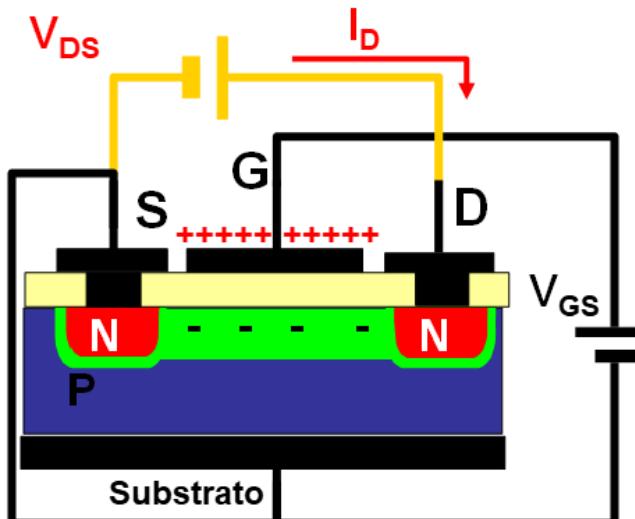
3

Cuando la concentración de los electrones en la capa formada es suficiente para permitir la conducción diremos que empieza la inversión. Se ha creado artificialmente una zona N. La tensión a la que esto ocurre es llamada "tensión umbral" ("threshold voltage"), V_T .



La existencia de canal permite el paso de electrones. Al aplicar una tensión V_{DS} positiva, $V_D > V_S$ se produce un flujo de electrones desde la fuente al drenador (corriente I_D de drenador a fuente).

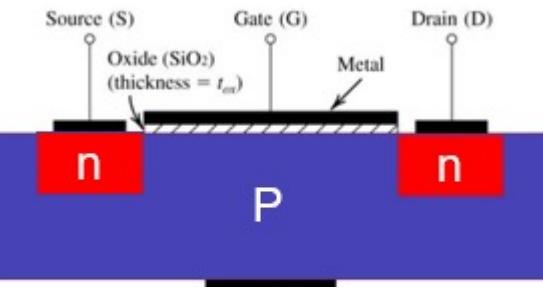
4



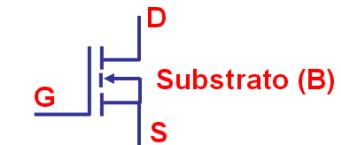
Funcionamiento

RESUMEN

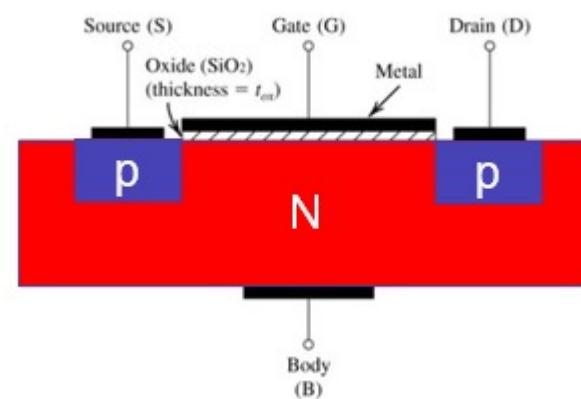
- No existe corriente de puerta al estar aislada del canal. $I_G = 0$.
- Por lo que la corriente $I_D = I_S$; sólo existe una corriente.
- La mínima tensión V_{GS} para que exista canal es V_T .
- Es necesario aplicar una tensión V_{DS} positiva (canal N) para que se produzca la corriente I_D .
- En los transistores de canal P todas las corrientes y tensiones son de **signo contrario**.



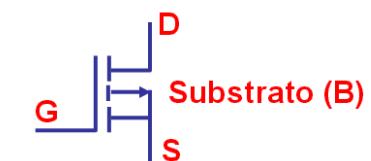
CANAL N



MOSFET de enriquecimiento
(acumulación) de canal N



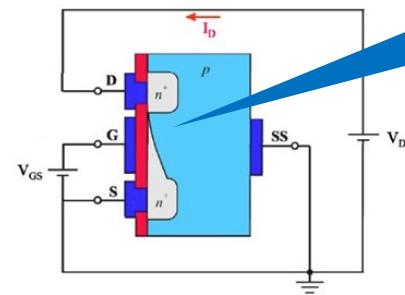
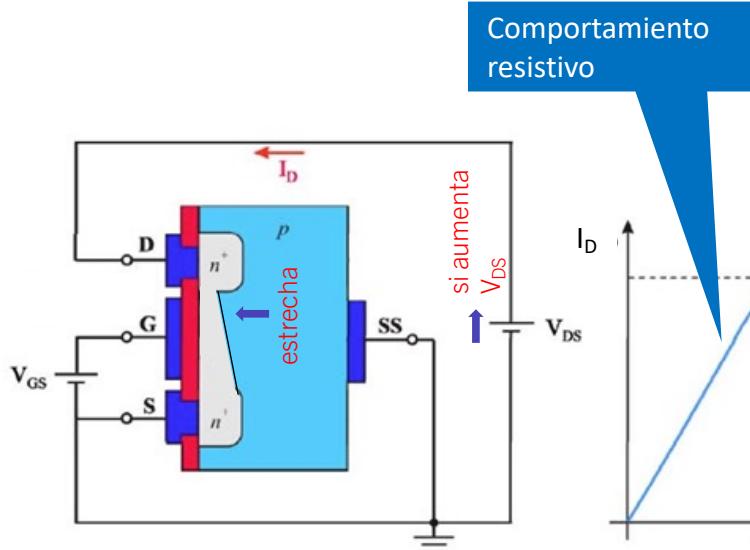
CANAL P



MOSFET de enriquecimiento
(acumulación) de canal P

FÍSICA DEL MOSFET

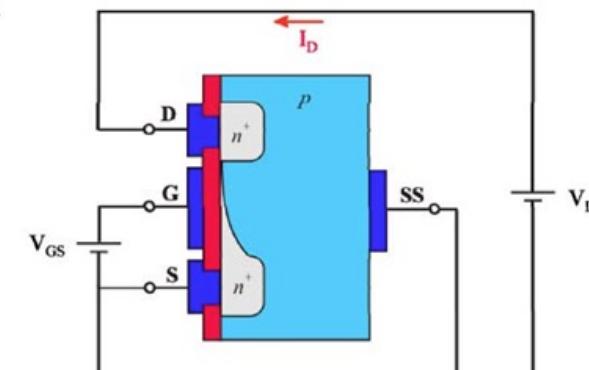
¿Cómo es su característica $V-I$?



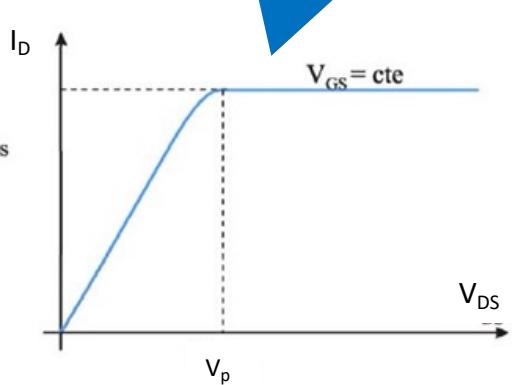
$$V_{DS} = V_{GS} - V_T$$

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

Si $V_{DS} = V_p$, el canal se estrangula en las cercanías del drenador



Si $V_{DS} > V_p$, la corriente se mantiene constante ("independiente" de V_{DS})



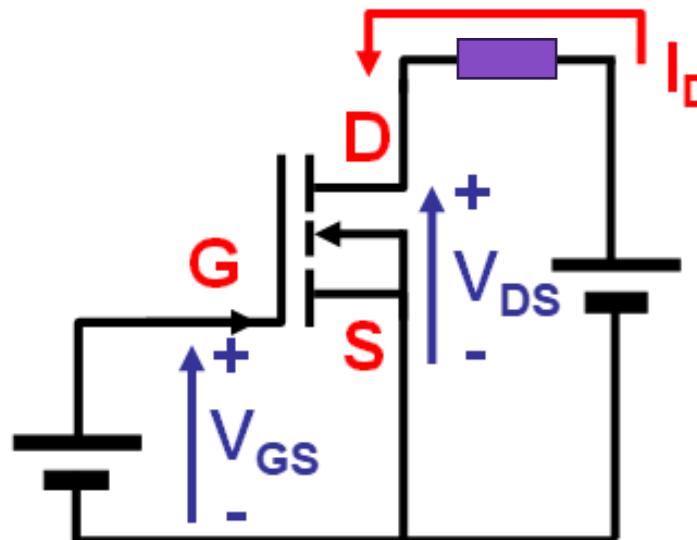
$$V_p$$

V_p : tensión de estrangulamiento del canal (*pinch-off*)

V_T : tensión de *Threshold* o umbral a partir de la cual se produce la inversión y se crea el canal.

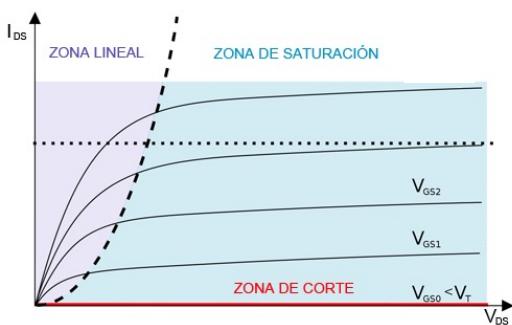
MOSFET CARACTERÍSTICA VI

CANAL N



En la zona plana de las características, el transistor se comporta como una fuente de corriente controlada por tensión

MOSFET EXPRESIONES ANALÍTICAS



Región de corte
 $ID = 0$ para $VGS \leq VT$

Región lineal (Ohmica)
 $ID = K[2(VGS - VT)VDS - VDS^2]$ para $VDS < (VGS - VT)$ y $VGS \geq VT$

$$K = (W/L) KP/2$$

W: ancho del canal

L: longitud del canal

$$KP: \mu_n C_{ox} (50 \mu A/V^2)$$

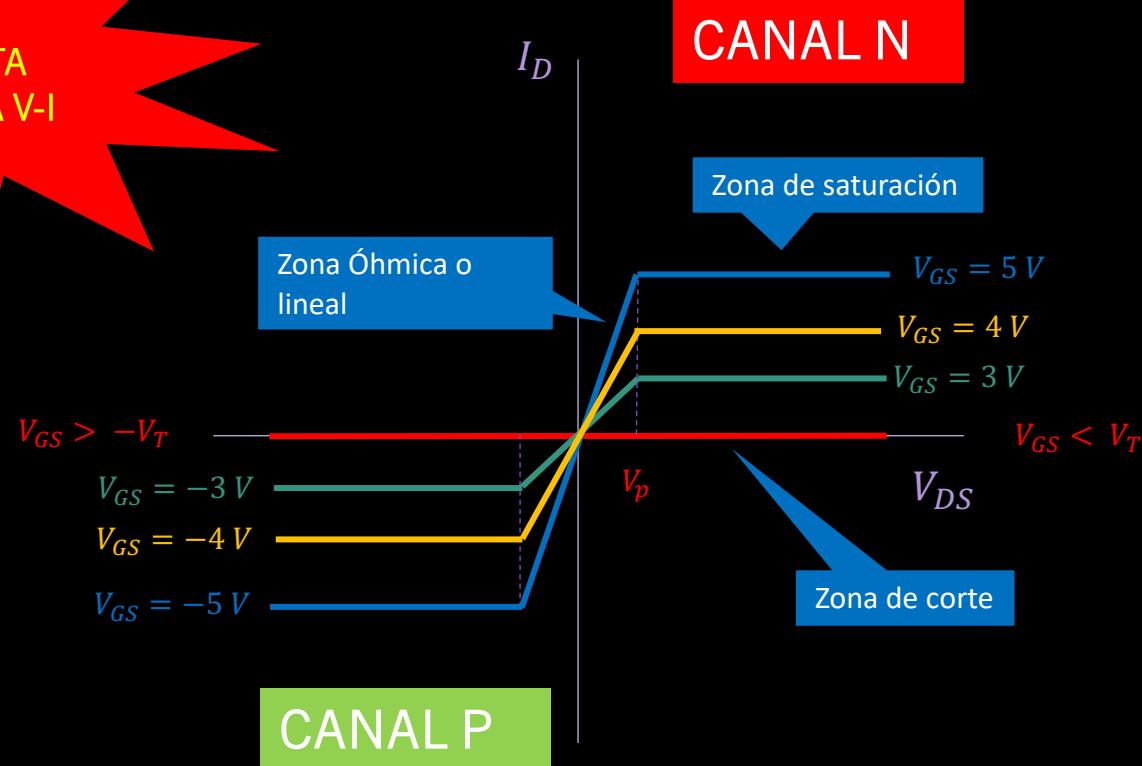
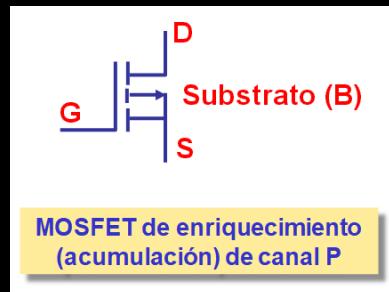
μ_n : Movilidad superficial de los electrones en el canal
 C_{ox} : Capacidad de la puerta por unidad de área

Región de saturación (fuente de corriente)
 $ID = K(VGS - VT)^2$ para $VDS \geq (VGS - VT)$ y $VGS \geq VT$

El límite entre la región resistiva y fuente de corriente es una parábola: $ID = K VDS^2$

No las vamos a utilizar

MOSFET CARACTERÍSTICA V-I IDEAL



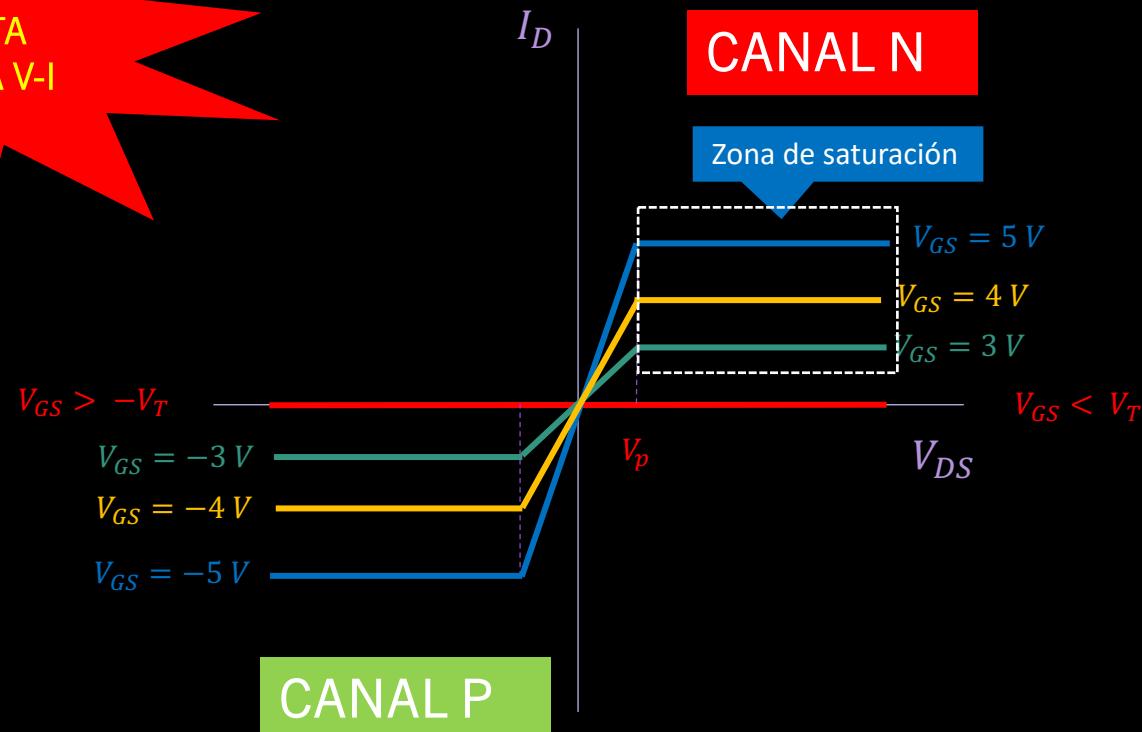
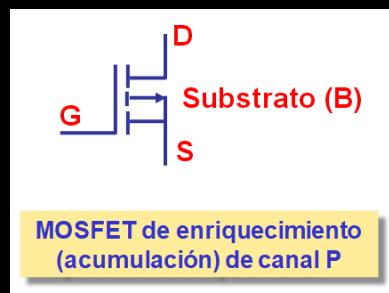
Tensión de pinch-off (o estrangulamiento de canal) separa la zona óhmica (o lineal) de la zona de saturación (fuente de corriente)

V_p

V_T

Tensión umbral

MOSFET CARACTERÍSTICA V-I IDEAL



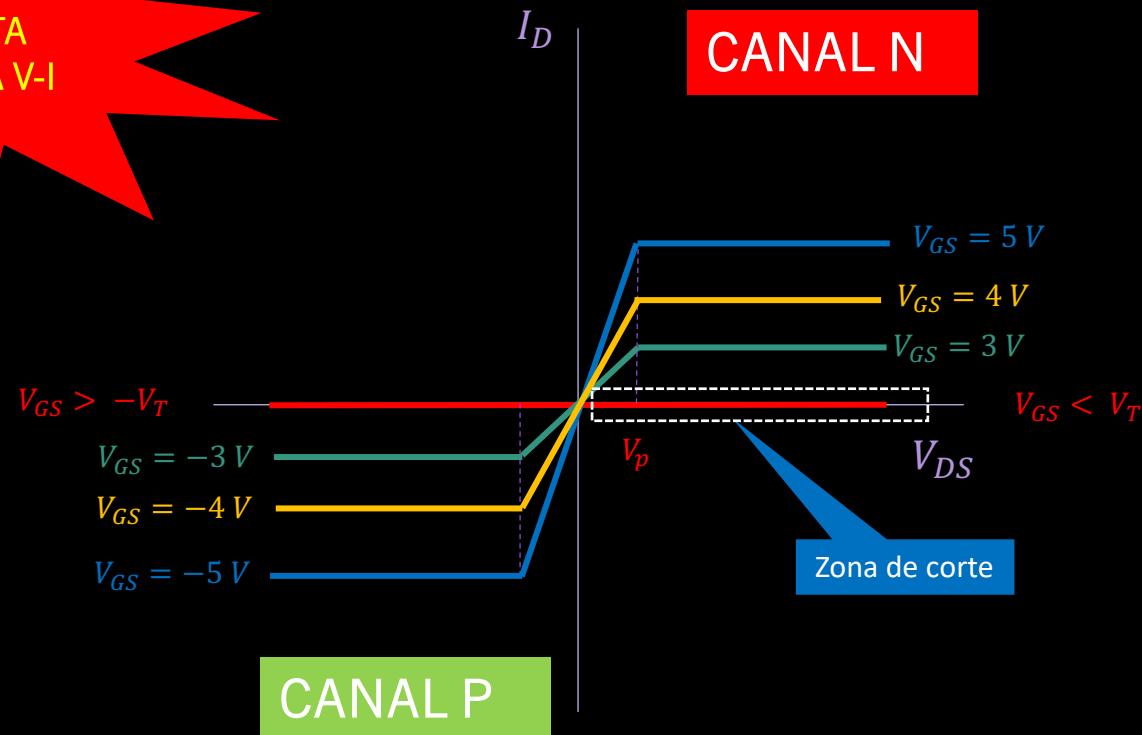
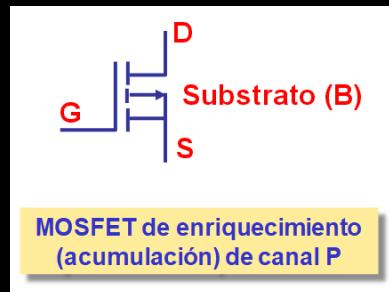
Tensión de pinch-off (o estrangulamiento de canal) separa la zona óhmica (o lineal) de la zona de saturación (fuente de corriente)

V_p

V_T

Tensión umbral

MOSFET CARACTERÍSTICA V-I IDEAL



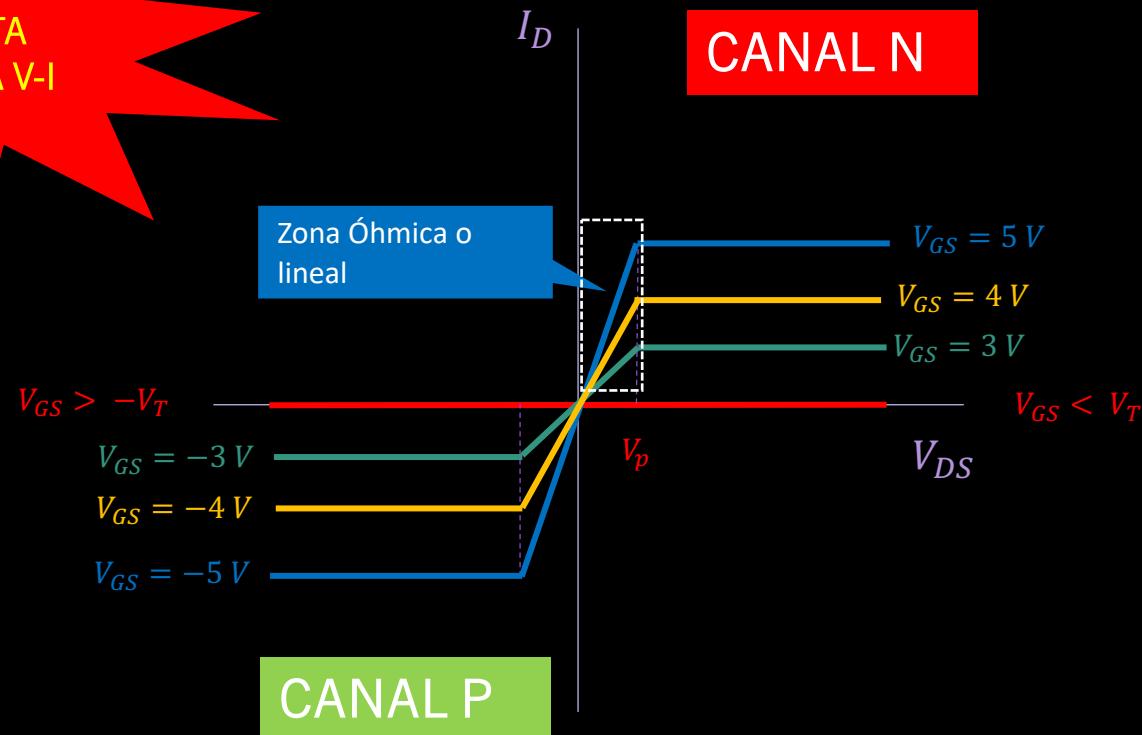
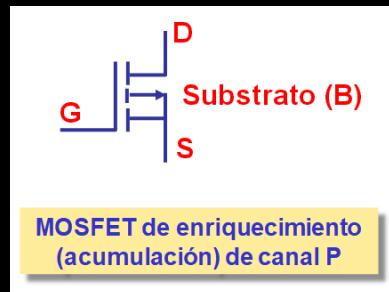
Tensión de pinch-off (o estrangulamiento de canal) separa la zona óhmica (o lineal) de la zona de saturación (fuente de corriente)

V_p

V_T

Tensión umbral

MOSFET CARACTERÍSTICA V-I IDEAL



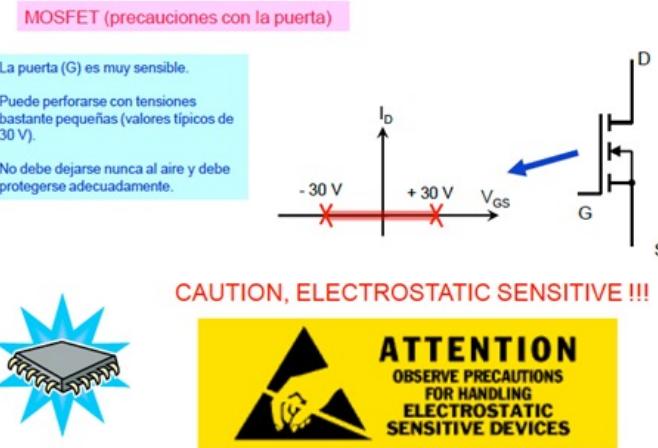
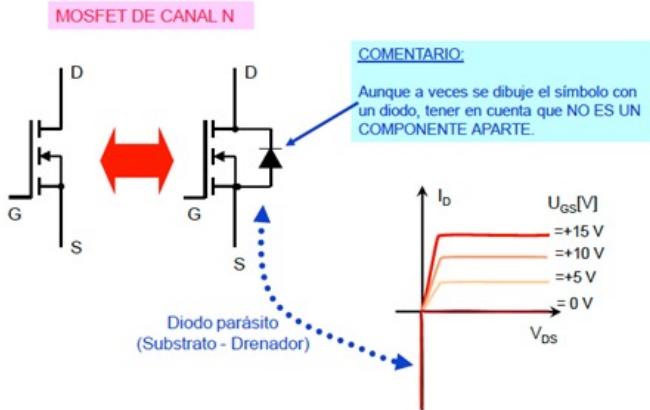
Tensión de pinch-off (o estrangulamiento de canal) separa la zona óhmica (o lineal) de la zona de saturación (fuente de corriente)

V_p

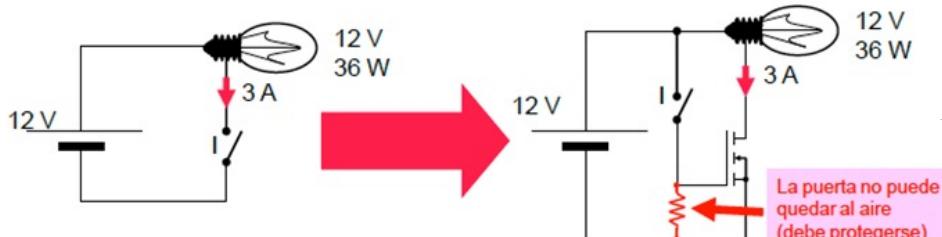
V_T

Tensión umbral

MOSFET OTRAS CONSIDERACIONES



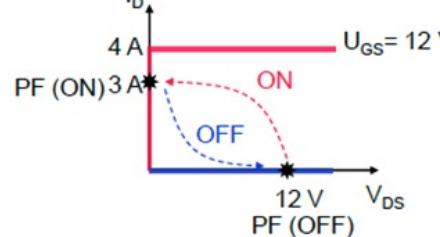
USOS DEL MOSFET - Canal N: Como interruptor



Lo montamos en
prácticas de laboratorio

Sustituimos el interruptor principal por un transistor.

!!! LA CORRIENTE DE PUERTA ES NULA
(MUY PEQUEÑA) !!!



CONTENIDO

1º TRANSISTORES

2º ESTRUCTURA DEL MOSFET

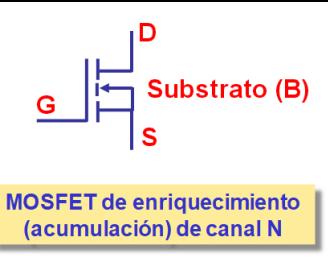
3º **MODELO DEL MOSFET**

4º CIRCUITOS DIGITALES: PUERTAS CMOS

5º TECNOLOGÍAS MODERNAS

MOSFET CARACTERÍSTICA VI IDEAL

CANAL N



R_{DS} es la inversa de la pendiente de la recta verde.
Por ejemplo:
Si $V_{GS} = 3 \text{ V}$ $R_{DS} = V_p / 1 \text{ A}$
Si $V_{GS} = 4 \text{ V}$ $R_{DS} = V_p / 2 \text{ A}$
Si $V_{GS} = 5 \text{ V}$ $R_{DS} = V_p / 3 \text{ A}$

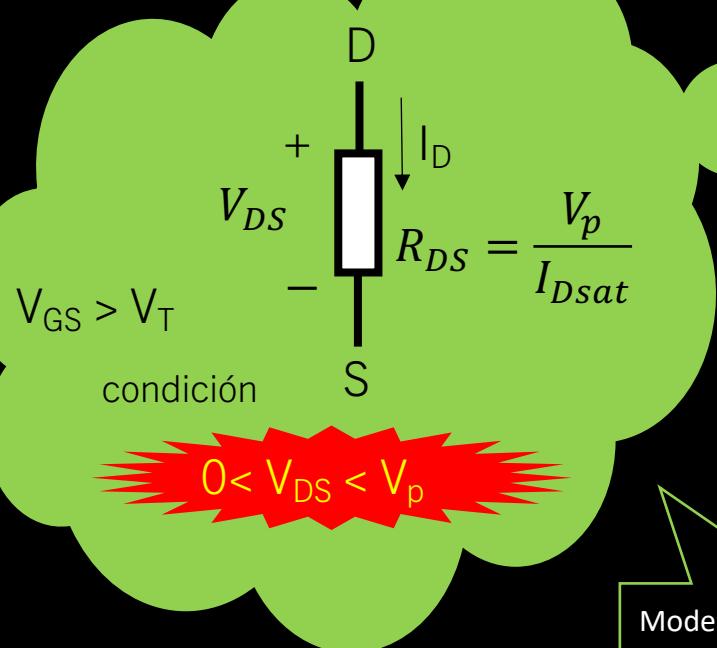
$I_D [\text{A}]$

Modelo Zona de saturación
(fuente de corriente)

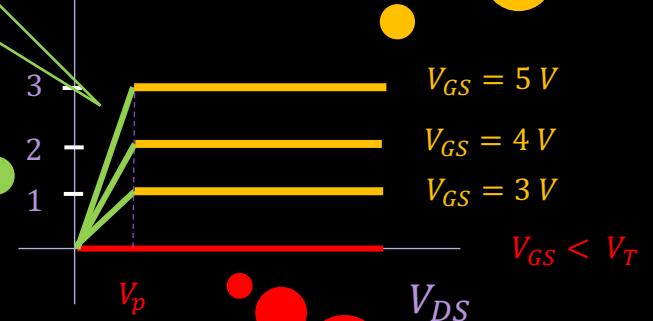
$V_{GS} > V_T$

condición

$V_{DS} > V_p$



Modelo Zona Óhmica o lineal



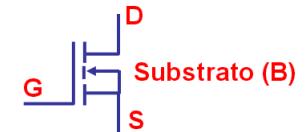
V_T tensión umbral (Threshold)

V_p tensión que separa zona Ohmica de zona de saturación (pinch-off)



Modelo Zona de corte

Análisis de circuitos con MOSFET

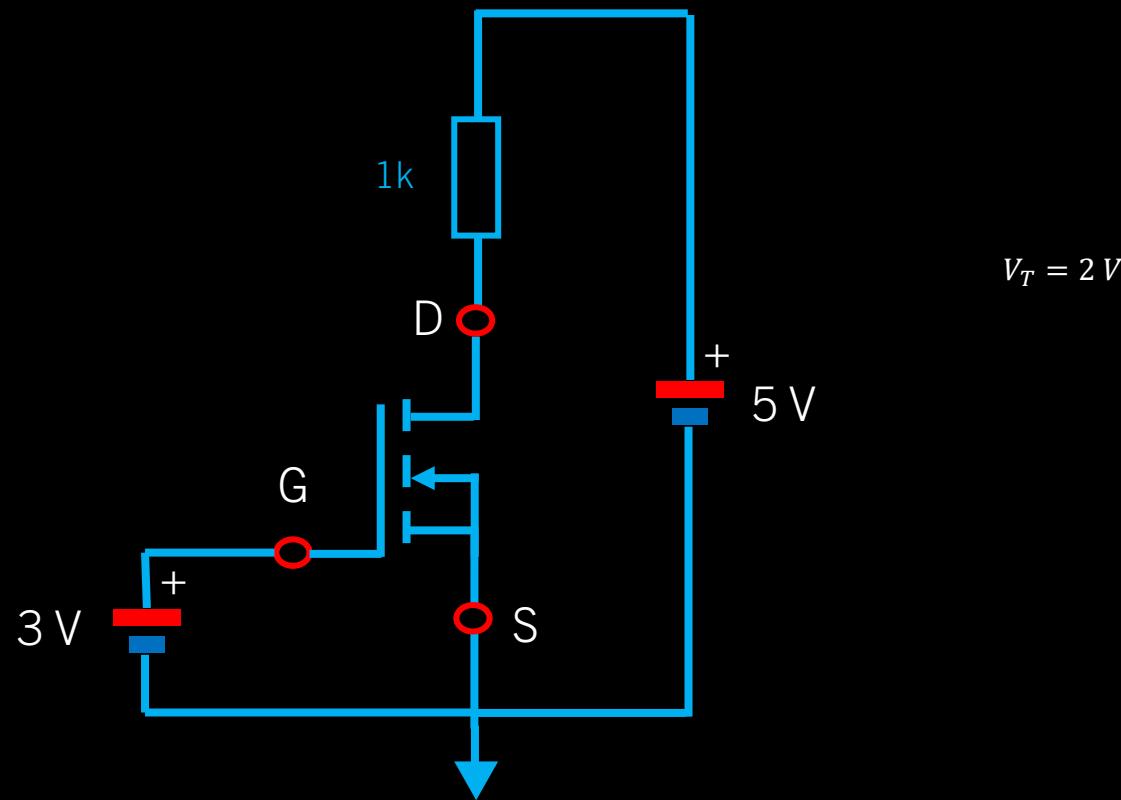
MOSFET de enriquecimiento
(acumulación) de canal N

- Calculamos la tensión V_{GS} . Considerar que la corriente por la puerta es nula.
- Si $V_{GS} < V_T$ el MOSFET está al corte, si no, elegimos entre zona óhmica o saturación.
- Sustituimos el MOSFET por el modelo correspondiente a nuestra elección y resolvemos el circuito resultante.
- Comprobamos que no existan contradicciones.

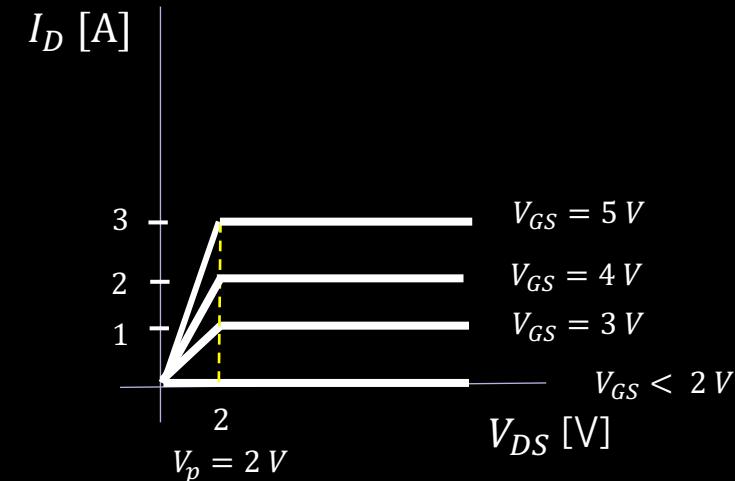
MOSFET

Ejemplo 1

Determine el punto de operación del MOSFET

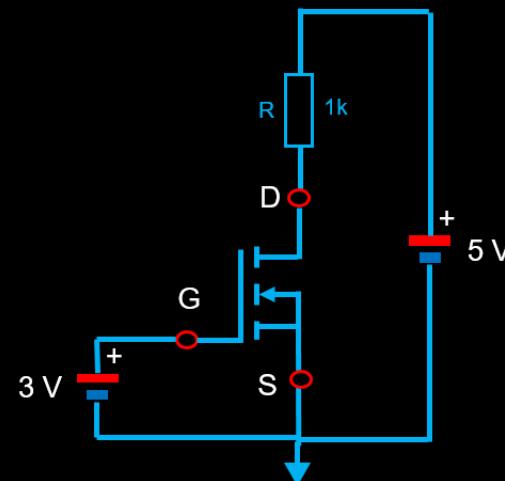


$$V_T = 2 V$$



MOSFET

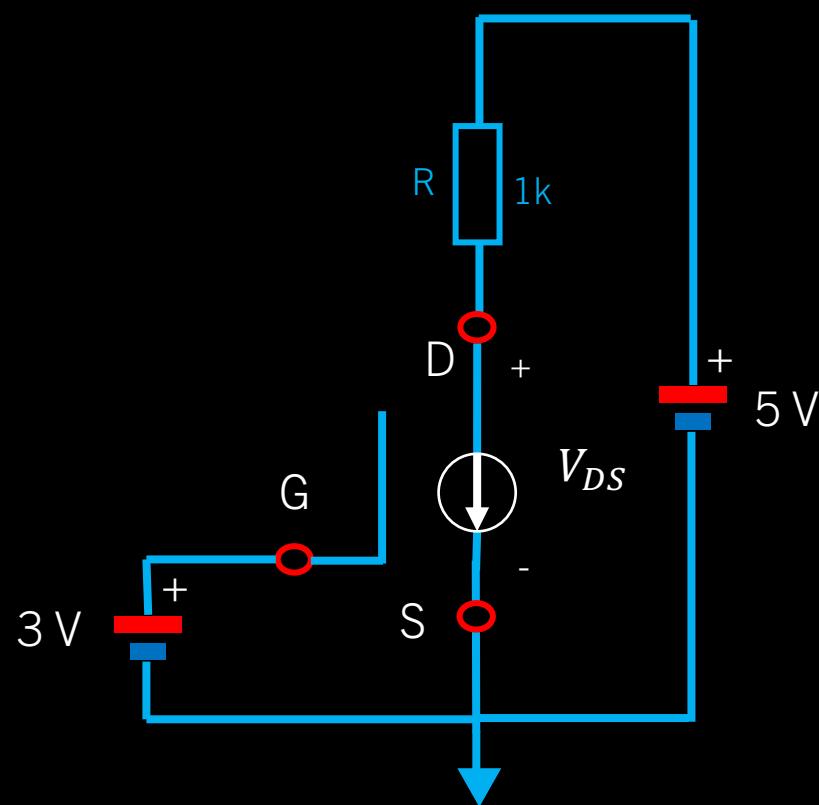
Ejemplo 1



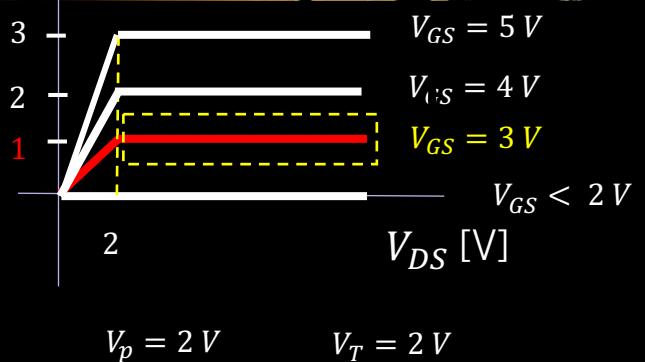
1º $V_{GS} = 3 \text{ V}$ mayor que V_T (2 V) luego puede estar en zona óhmica o en zona de saturación

2º Formulamos como hipótesis que está en zona de saturación con $I_D = 1 \text{ A}$ según la gráfica.

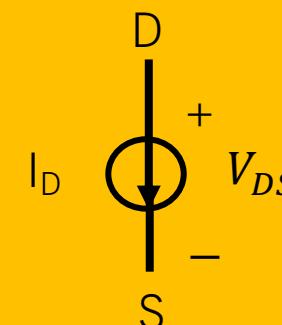
3º Sustituimos el MOSFET por su modelo en la zona de saturación, una fuente de corriente.



$I_D [\text{A}]$



$$V_p = 2 \text{ V} \quad V_T = 2 \text{ V}$$

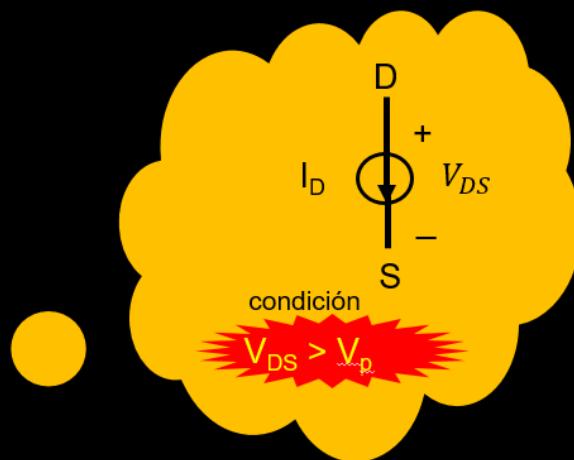
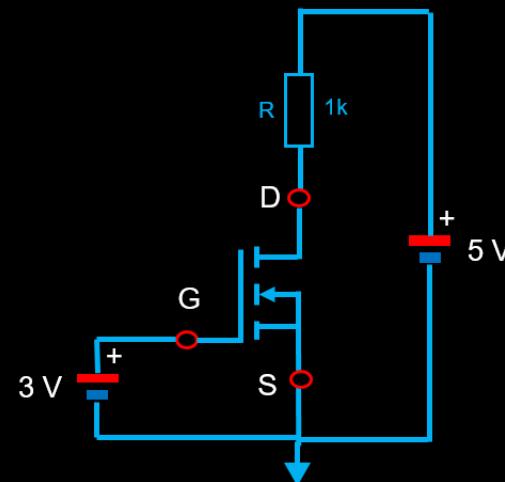


condición

$$V_{DS} > V_p$$

MOSFET

Ejemplo 1

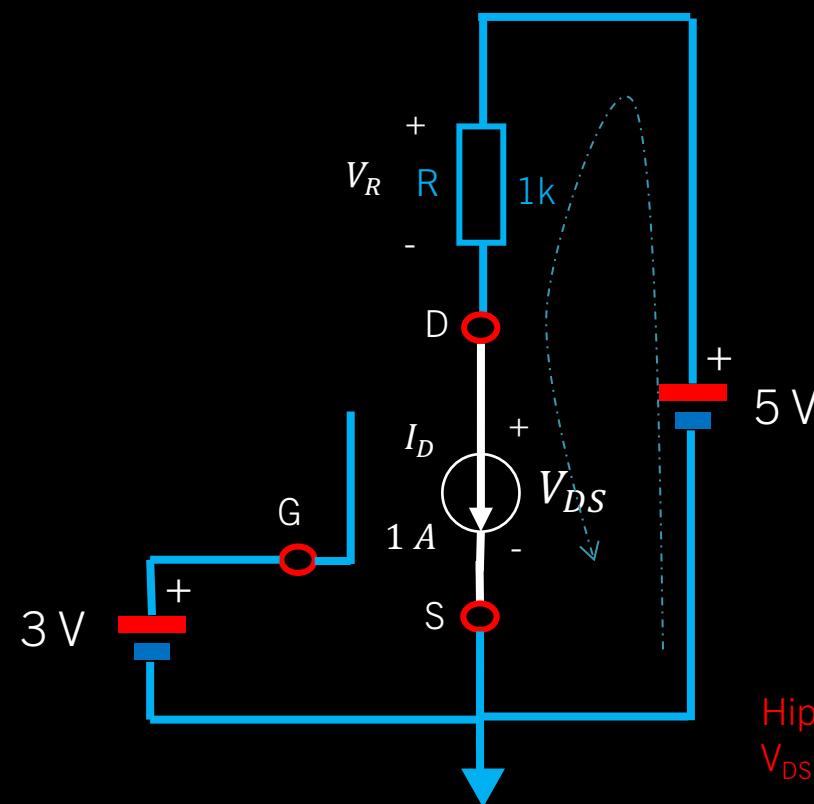


no se cumple la condición

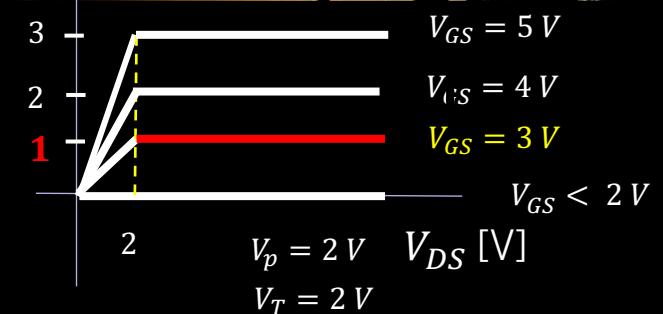
1º $V_{GS} = 3 \text{ V}$ mayor que V_T (2 V) luego puede estar en zona óhmica o en zona de saturación

2º Formulamos como hipótesis que está en zona de saturación con $I_D = 1 \text{ A}$ según la gráfica (recta roja).

3º Sustituimos el MOSFET por su modelo en la zona de saturación, una fuente de corriente (1 A).



$I_D [\text{A}]$



LTK

$$-5 + V_R + V_{DS} = 0$$

$$-5 + I_D R + V_{DS} = 0$$

$$-5 + 1000 + V_{DS} = 0$$

$$I_D = 1 \text{ A}$$

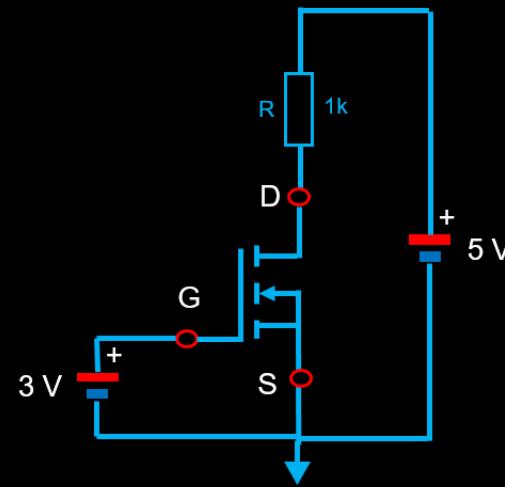
$$R = 1000 \Omega$$

$$V_{DS} = -995 \text{ V}$$

Contradicción

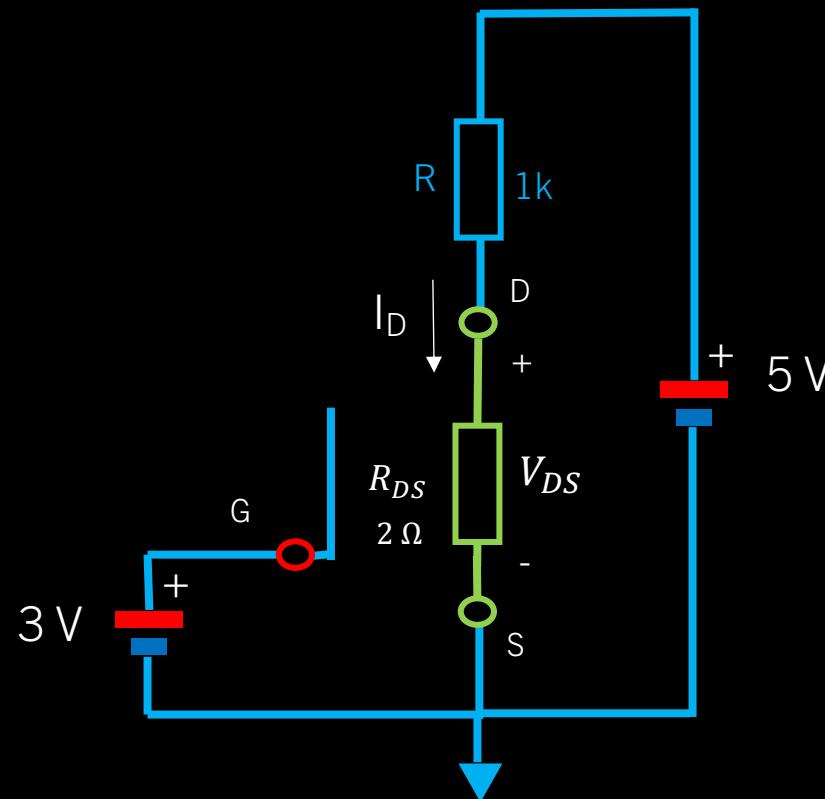
MOSFET

Ejemplo 1



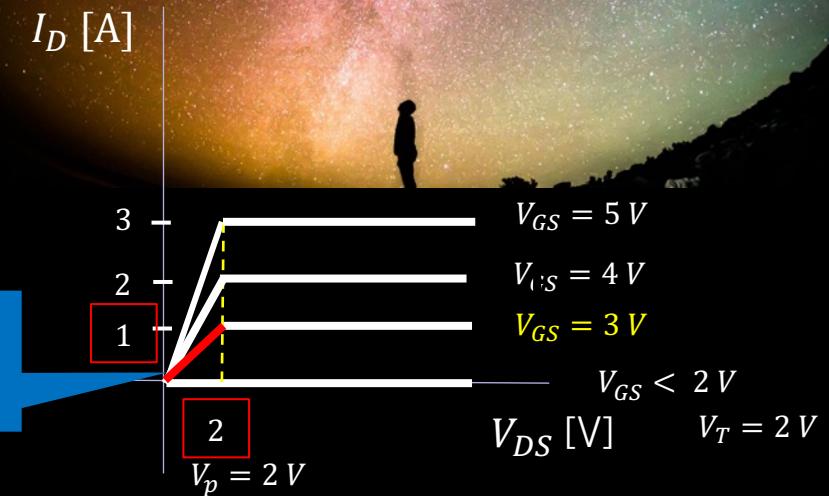
Formulamos como hipótesis que está en zona óhmica.

Sustituimos el MOSFET por su modelo en la zona óhmica: una resistencia.



La resistencia R_{DS} es la inversa de la pendiente

$$R_{DS} = \frac{2 \text{ V}}{1 \text{ A}} = 2 \Omega$$



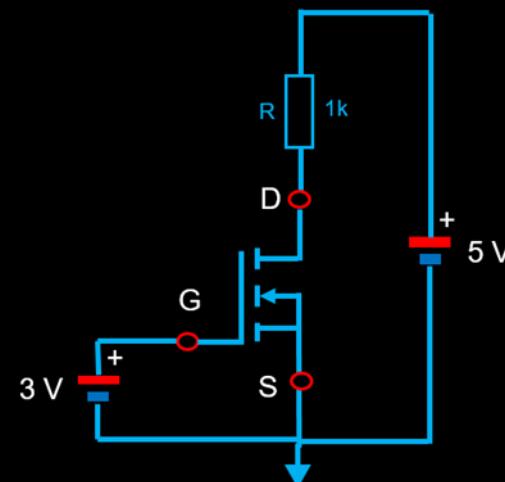
Circuit model of a MOSFET in ohmic region. The drain (D) is connected to a voltage source V_{DS} through a resistor R_{DS} with value $\frac{V_p}{I_{DSat}}$. The source (S) is grounded. Current I_D flows through the resistor.

condición

$$0 < V_{DS} < V_p$$

MOSFET

Ejemplo 1

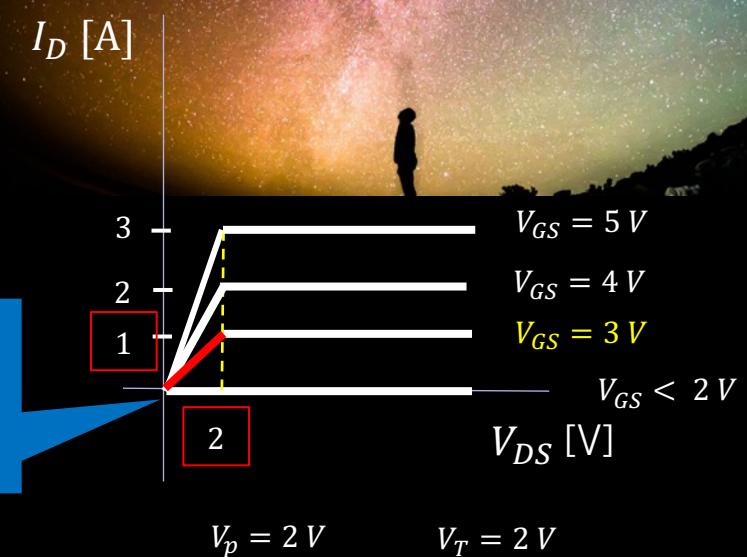


Formulamos como hipótesis que está en zona óhmica.

Sustituimos el MOSFET por su modelo en la zona óhmica, una resistencia.

$$R_{DS} = \frac{2V}{1A} = 2\Omega$$

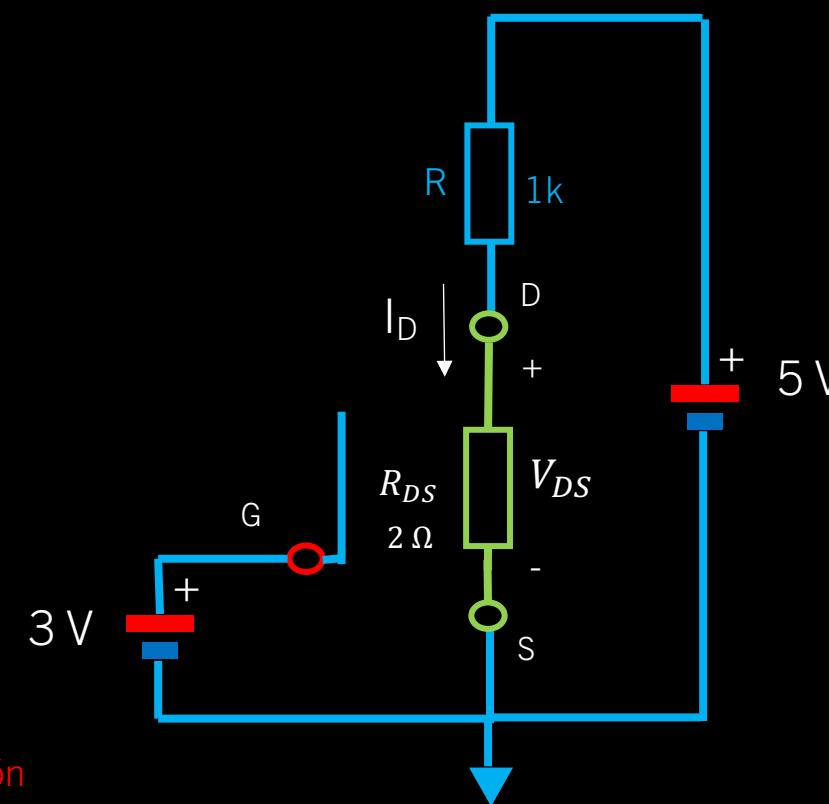
La resistencia R_{DS} es la inversa de la pendiente (de la recta roja).



condición

$$0 < V_{DS} < V_p$$

Solución correcta, se cumple la condición



Divisor de tensión

$$V_{DS} = 5V \frac{2\Omega}{2\Omega + 1000\Omega} = 9,98 mV$$

$$I_D = \frac{5V}{2\Omega + 1000\Omega} = 4,99 mA$$

Solución

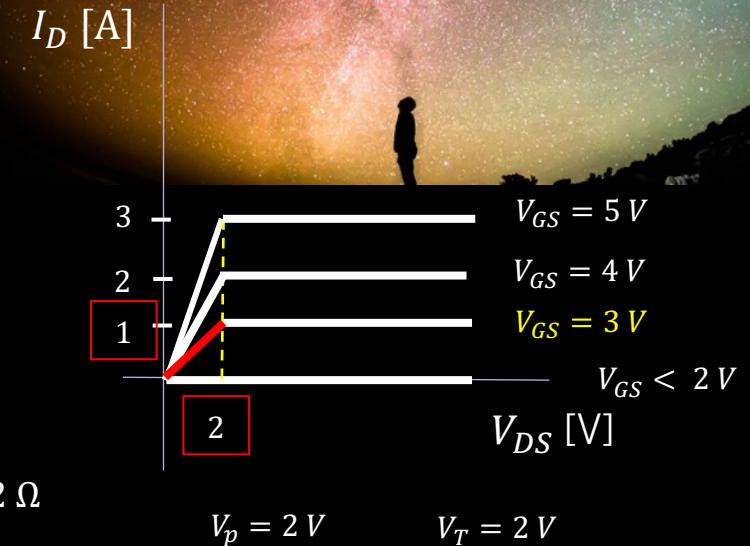
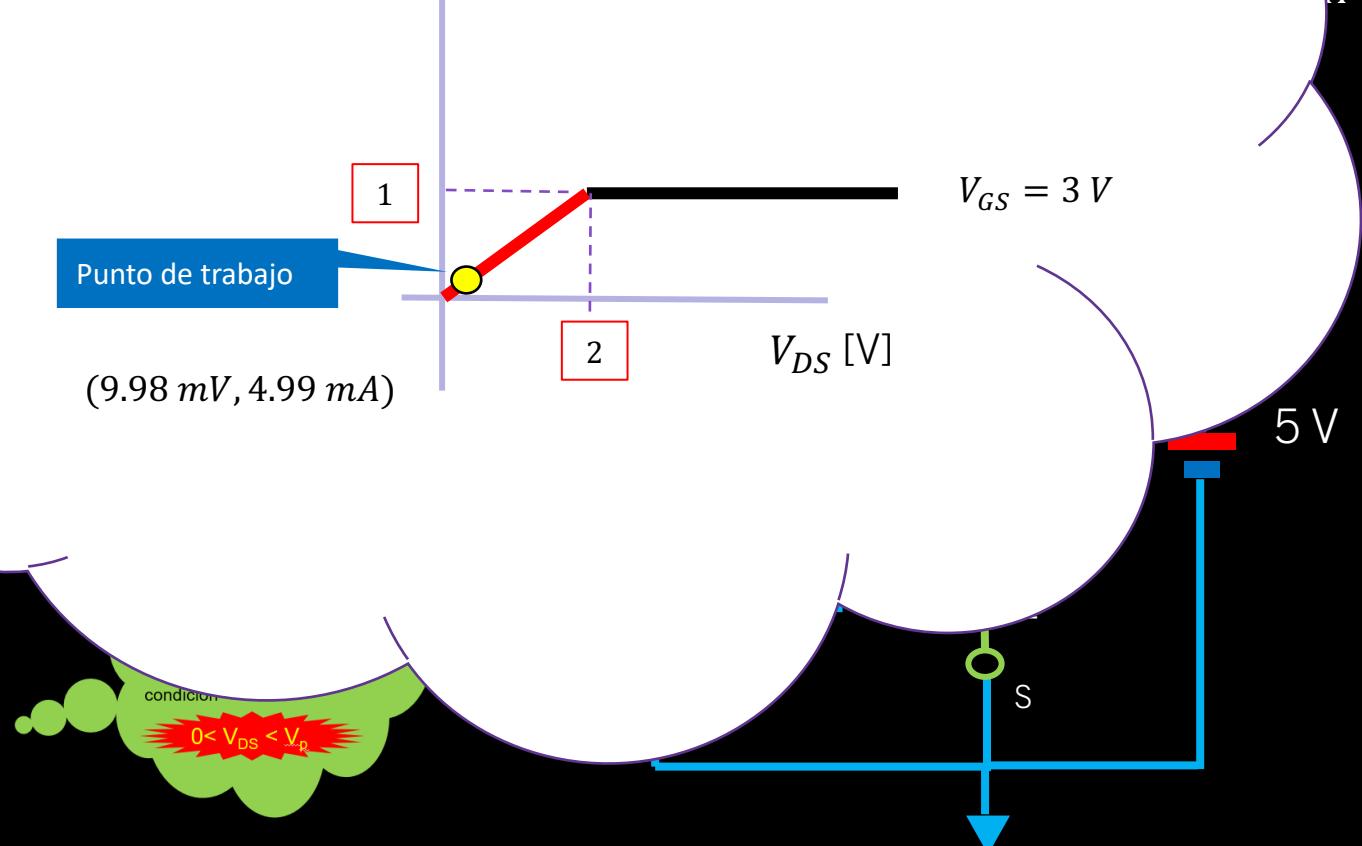
$$\begin{cases} V_{DS} = 9,98 mV \\ I_D = 4,99 mA \end{cases}$$

MOSFET

Ejemplo 1

Formulamos como hipótesis que está en zona óhmica.

Sustituimos el MOSFET por su modelo en la zona



Divisor de tensión

$$V_{DS} = 5 V \frac{2 \Omega}{2 \Omega + 1000 \Omega} = 9,98 \text{ mV}$$

$$I_D = \frac{5 V}{2 \Omega + 1000 \Omega} = 4,99 \text{ mA}$$

Solución

$$\begin{cases} V_{DS} = 9,98 \text{ mV} \\ I_D = 4,99 \text{ mA} \end{cases}$$

CONTENIDO

1º TRANSISTORES

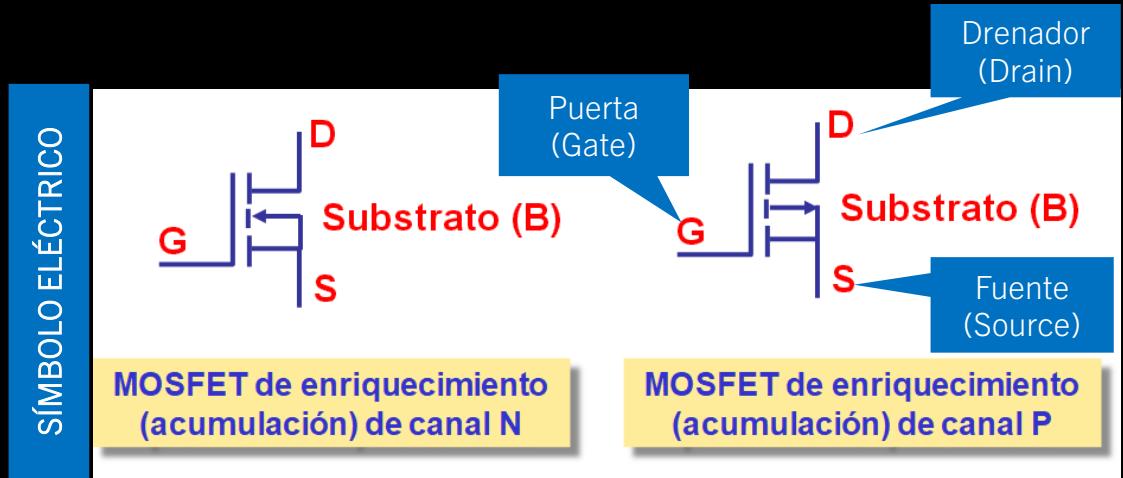
2º ESTRUCTURA DEL MOSFET

3º MODELO DEL MOSFET

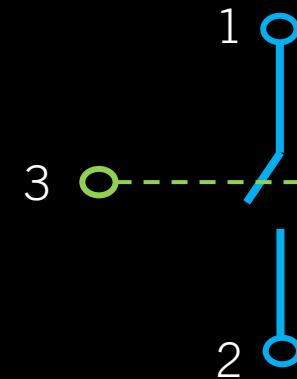
4º CIRCUITOS DIGITALES: PUERTAS CMOS

5º TECNOLOGÍAS MODERNAS

TRANSISTORES



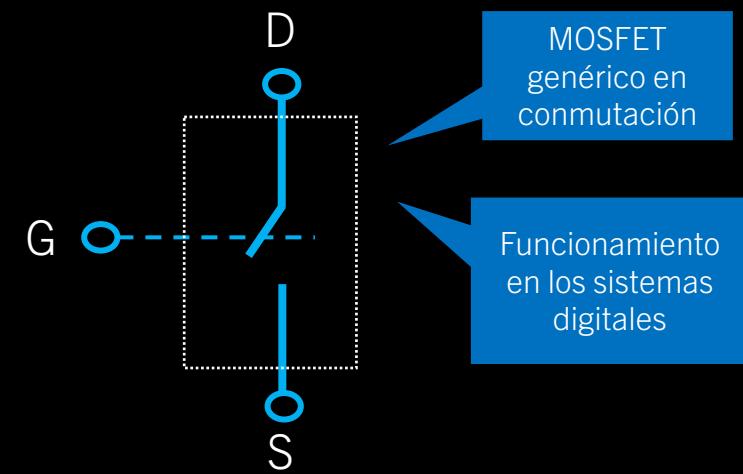
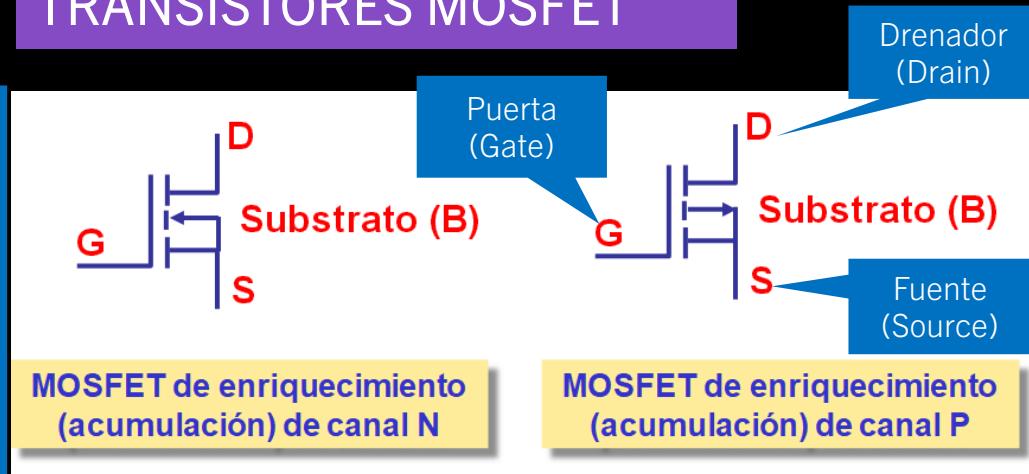
FUNCIONAMIENTO EN SISTEMAS DIGITALES



- Dispositivo de 3 terminales (uno de control)
- Funcionamiento en conmutación: una tensión por el terminal de control, 3, abre/cierra el interruptor entre los terminales 1 y 2.

TRANSISTORES MOSFET

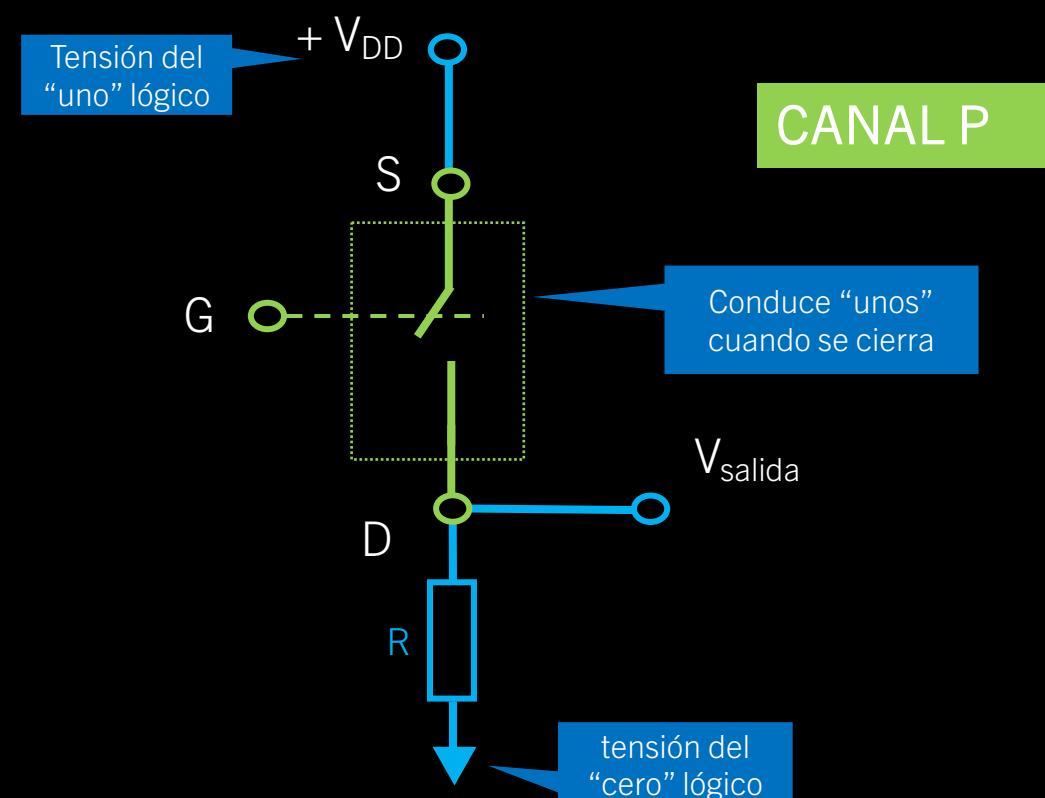
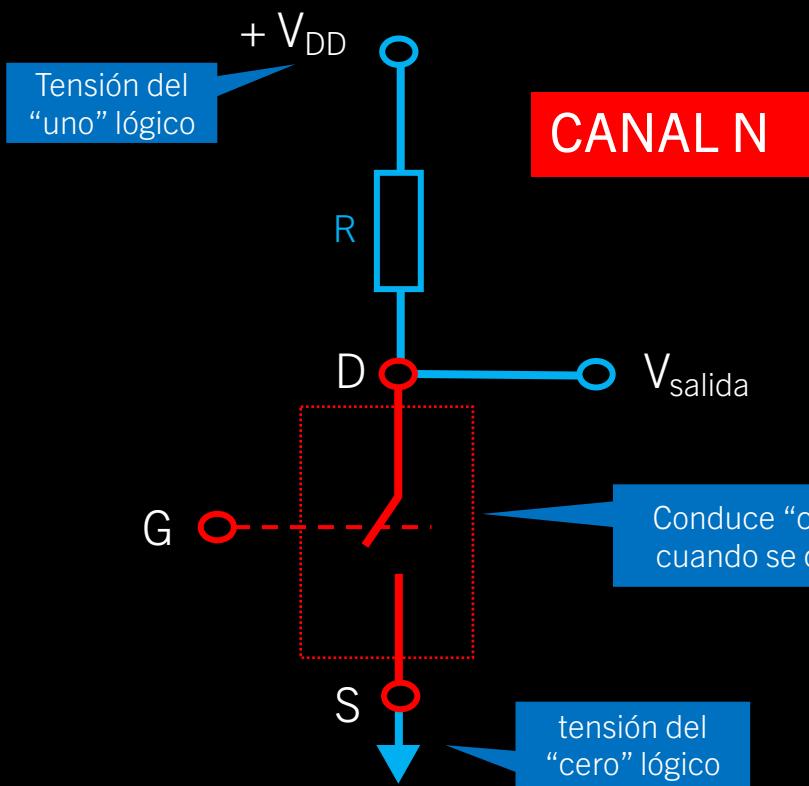
SÍMBOLO ELÉCTRICO



Niveles de tensión representan los bits

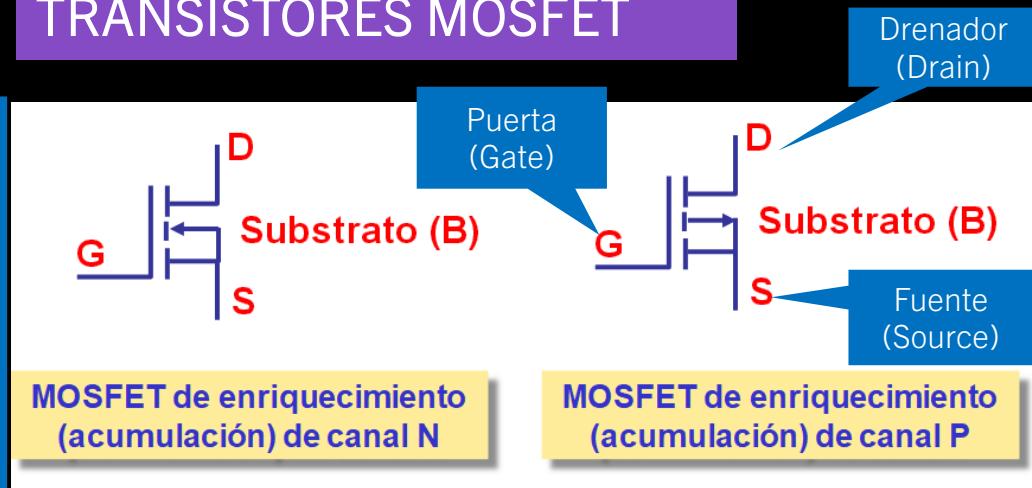
$0\text{V} \rightarrow \text{"cero" lógico}$
 $+V_{DD} \rightarrow \text{"uno" lógico}$

$V_{DD} = 15\text{ V}, 5\text{ V}, 3.3\text{ V}, 1.2\text{ V}, \dots$



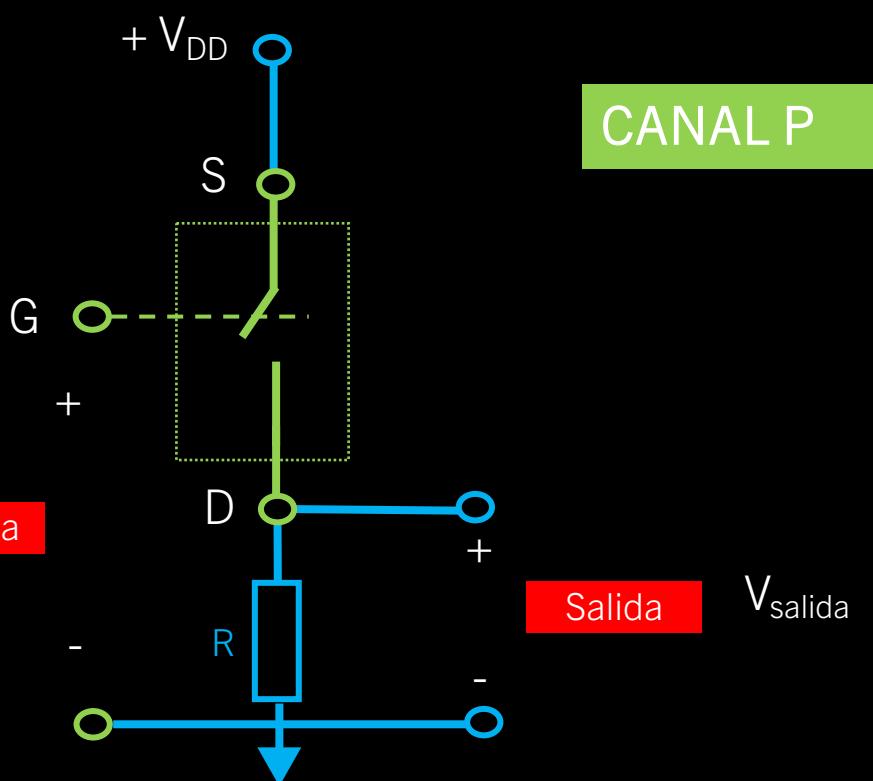
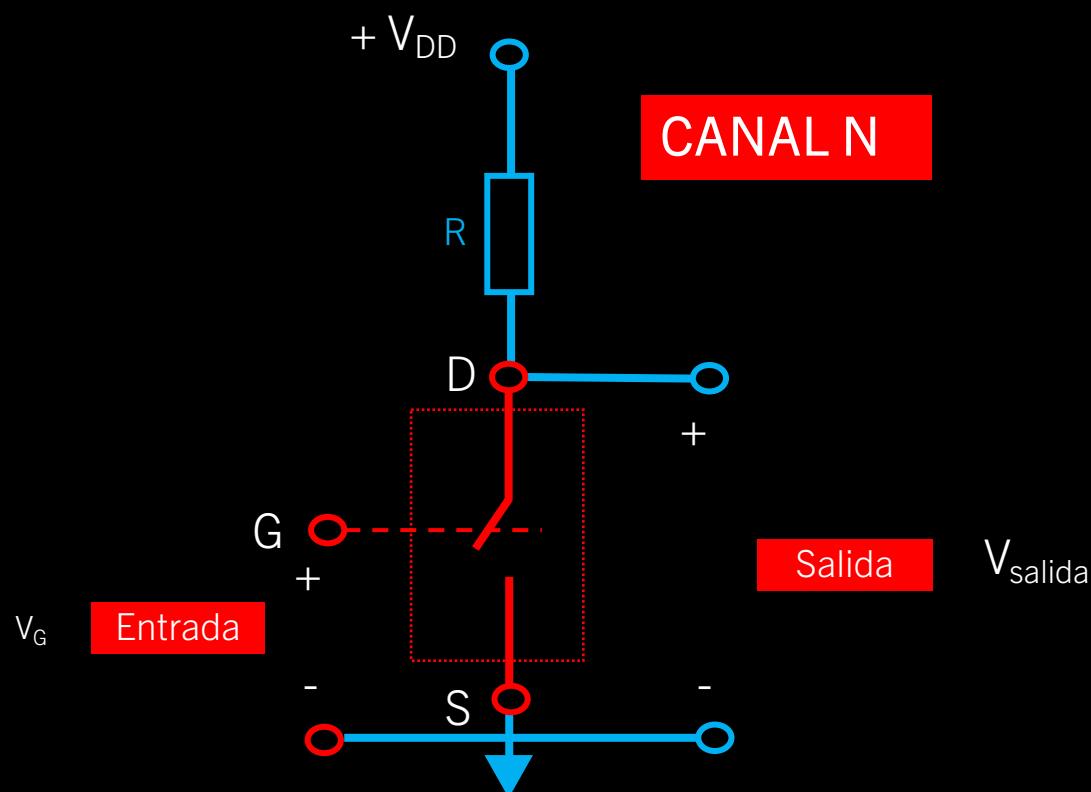
TRANSISTORES MOSFET

SÍMBOLO ELÉCTRICO

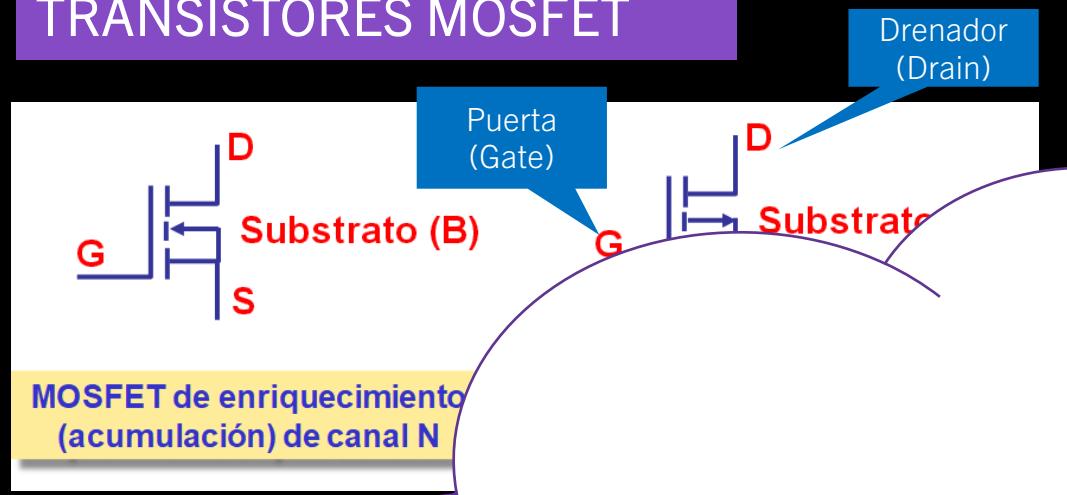


ENTRADA/SALIDA

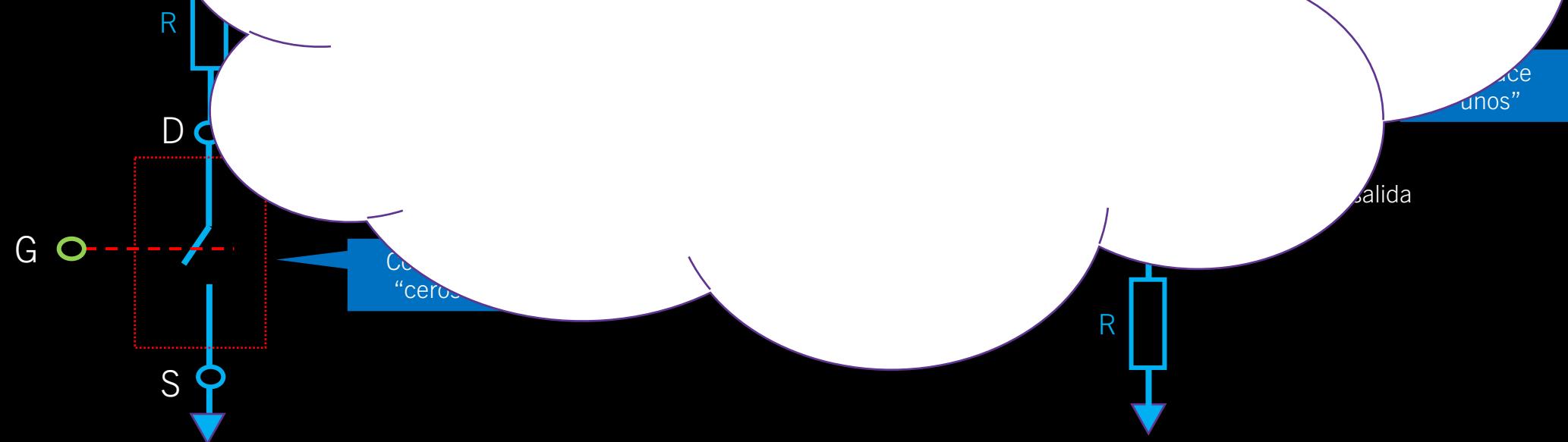
ENTRADA: V_G respecto a referencia
SALIDA: V_D respecto a referencia



TRANSISTORES MOSFET



¿Cómo se controla?

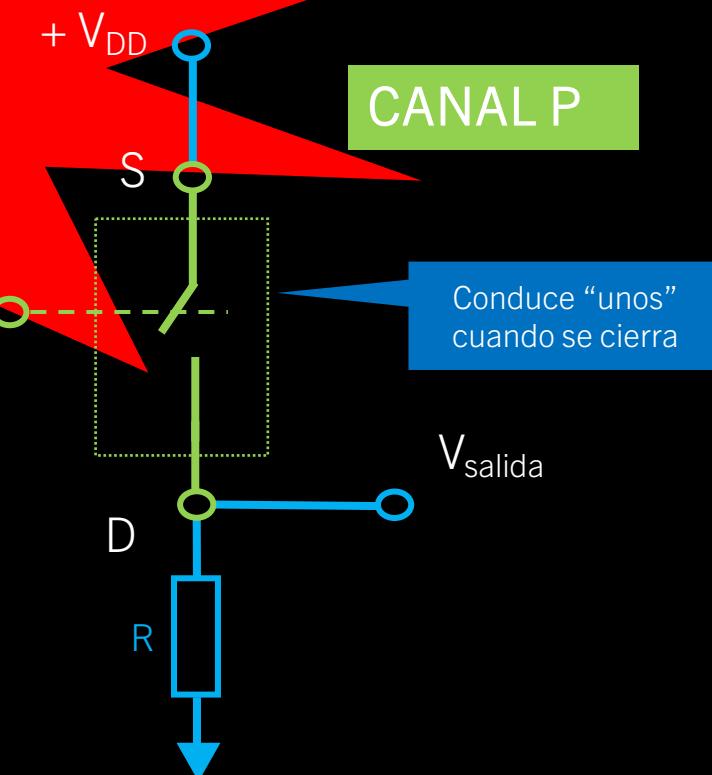
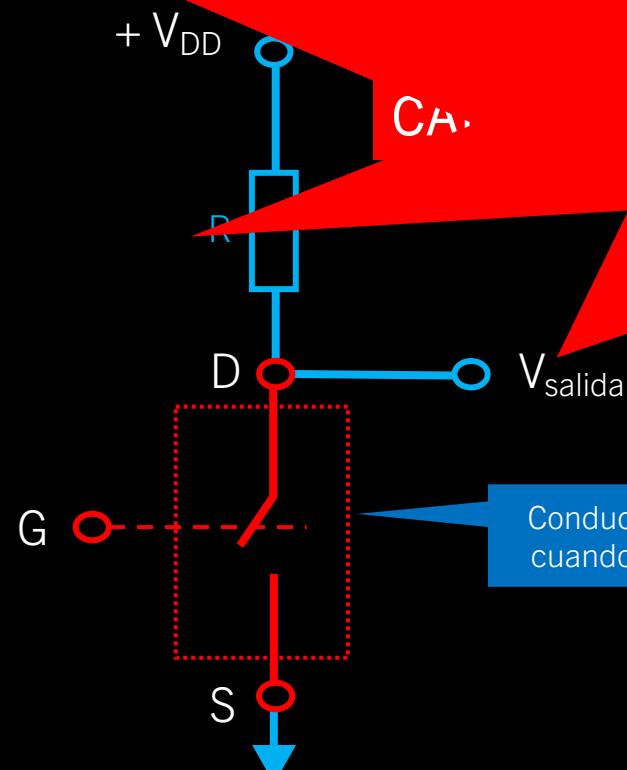


TRANSISTORES MOSFET

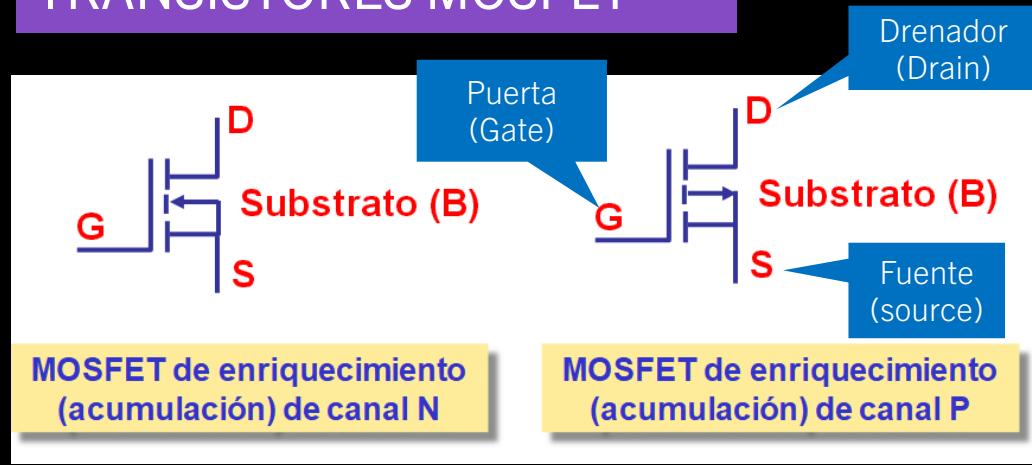


El interruptor se controla por la tensión de puerta-fuente

$$V_{GS} = V_G - V_S$$



TRANSISTORES MOSFET



El interruptor se controla por la tensión de puerta-fuente
 $V_{GS} = V_G - V_S$

+ V_{DD}

CANAL N

R

D V_{salida}

V_G
Entrada

V_{GS}

Control

Tensión V_{GS}

S está a referencia de 0 V

+ V_{DD}

CANAL P

V_{GS}

-

S

G

+

+

-

D

R

Entrada

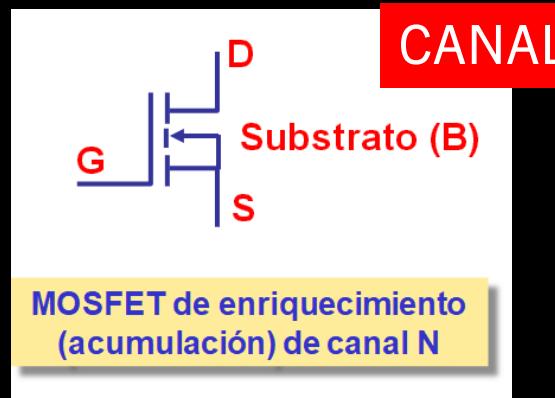
V_G

V_{salida}

referencia de 0 V

S está a + V_{cc}

TRANSISTORES MOSFET

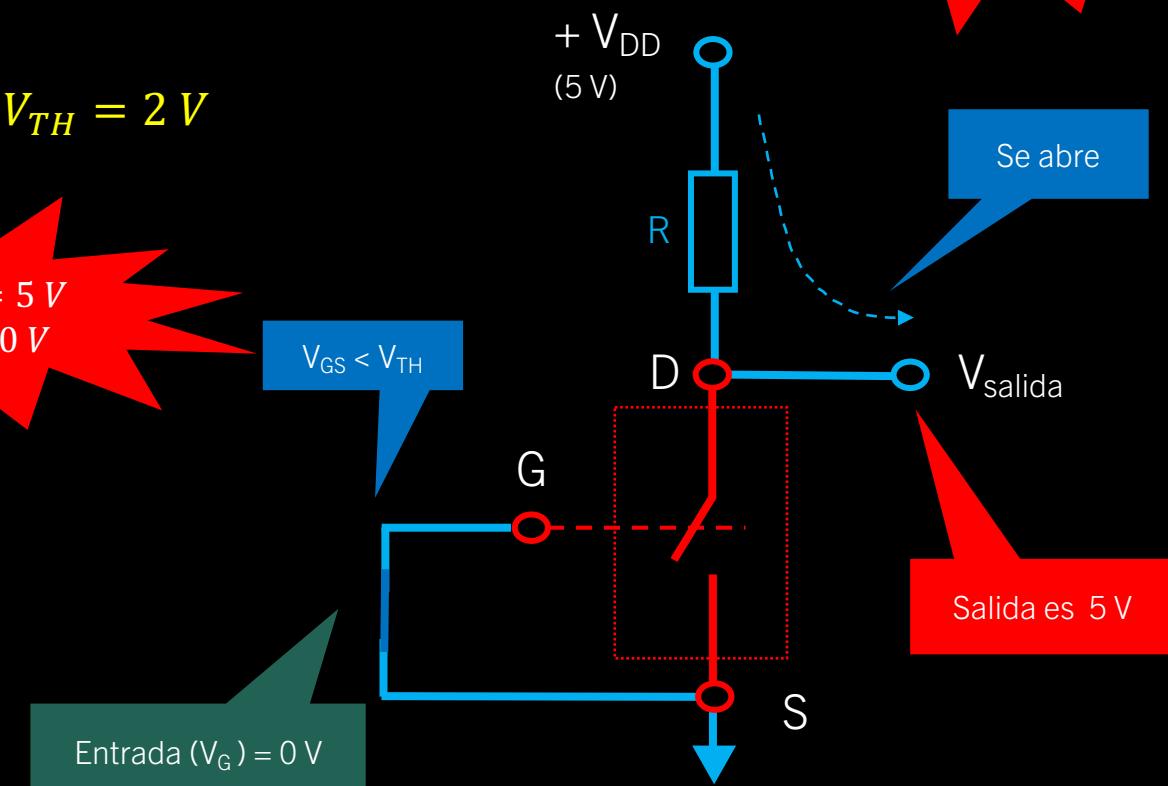
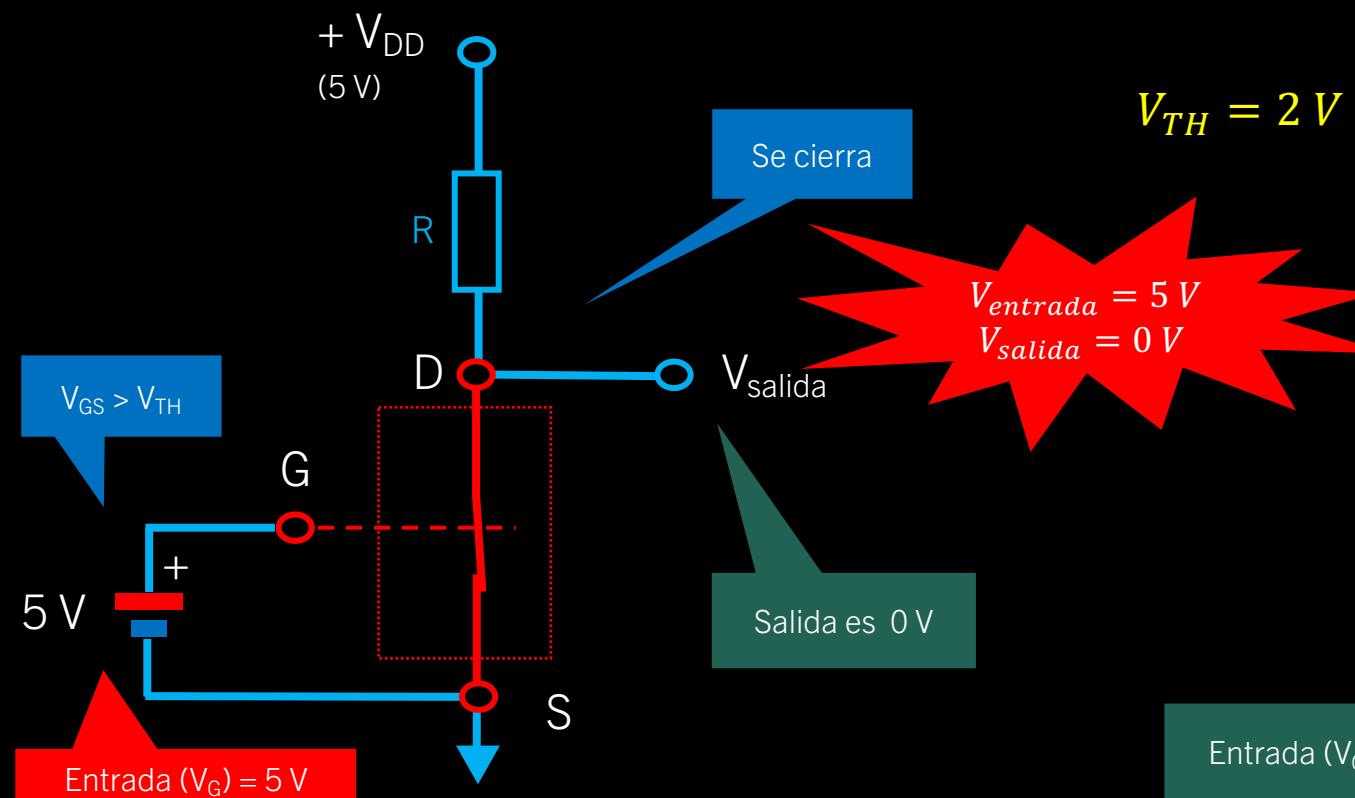


Funcionamiento

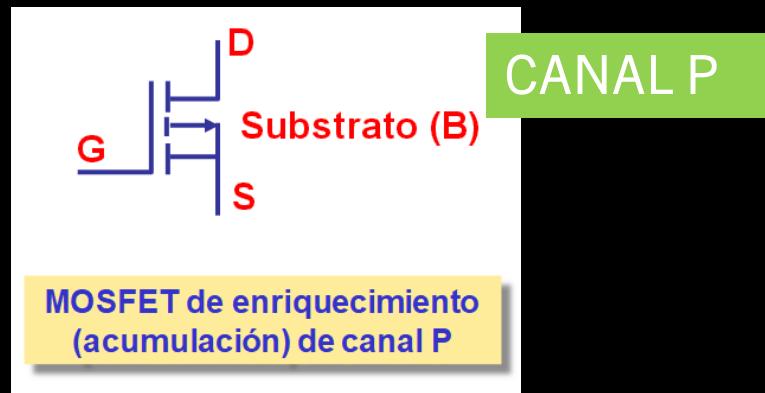
If $V_{GS} > V_{TH}$ then “se cierra”
else “se abre”

V_{TH} tensión umbral que
depende del N-MOSFET

$$V_{TH} = 1 \text{ V}, 2 \text{ V}, \dots$$



TRANSISTORES MOSFET

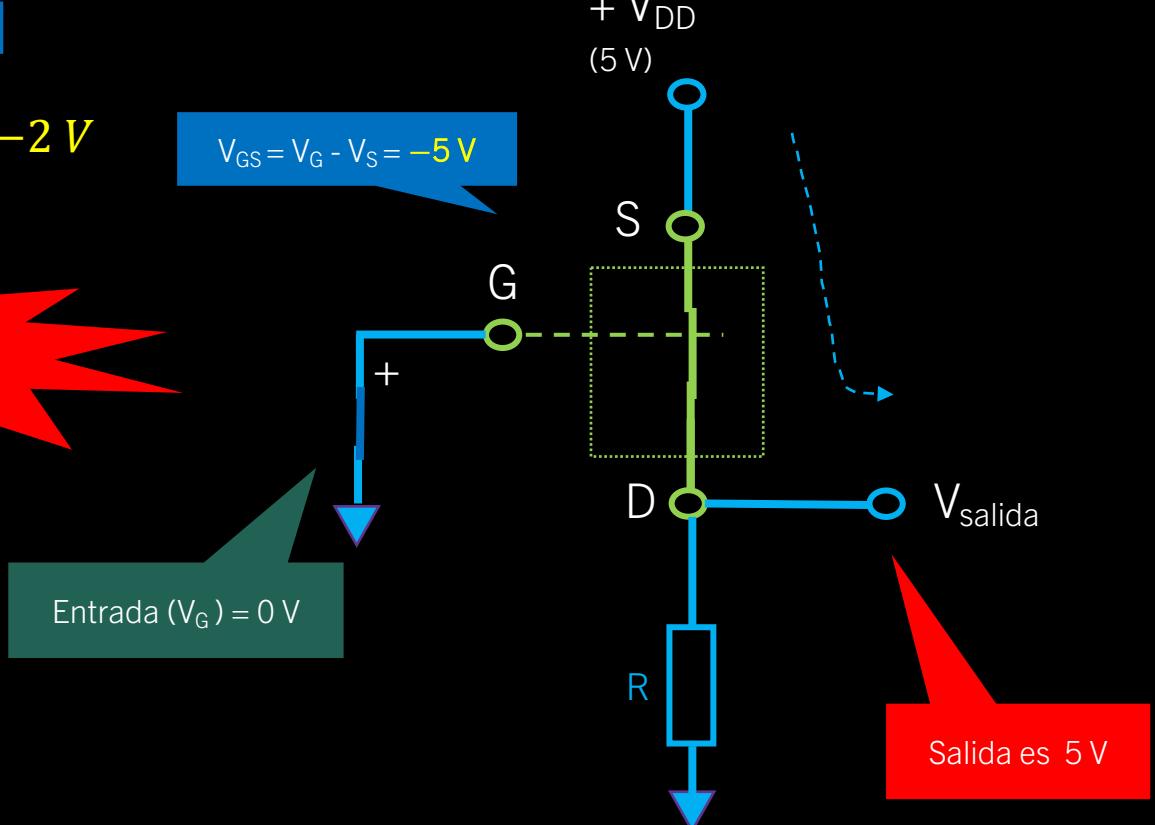
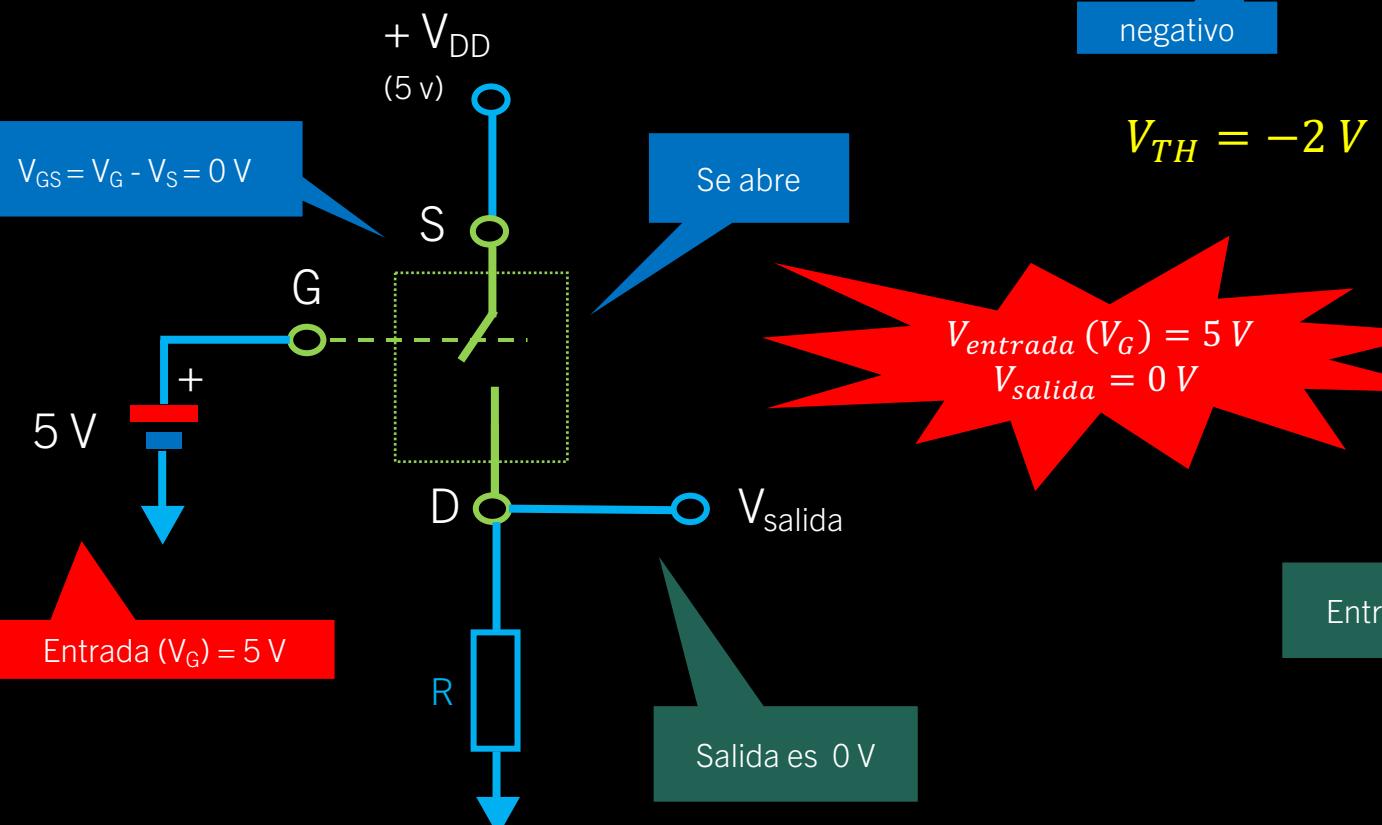


Funcionamiento

If $V_{GS} < V_{TH}$ then “se cierra”
else “se abre”

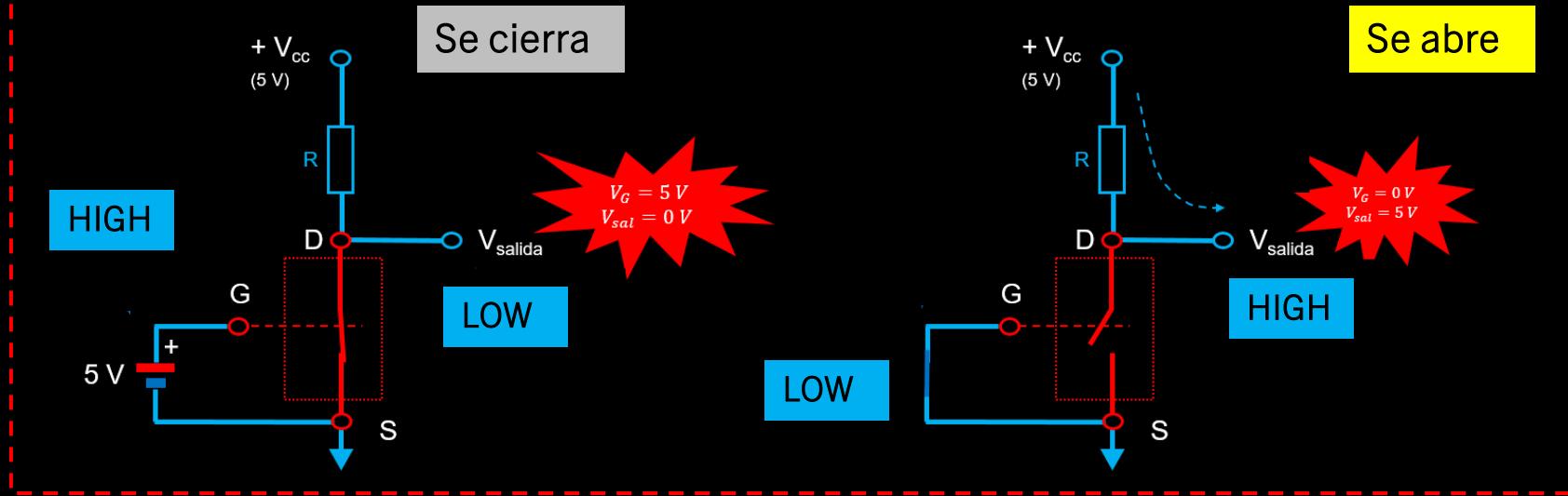
V_{TH} tensión umbral que depende del P-MOSFET
 $V_{TH} = -1V, -2V, \dots$

$V_{entrada} = 0V$
 $V_{salida} = 5V$

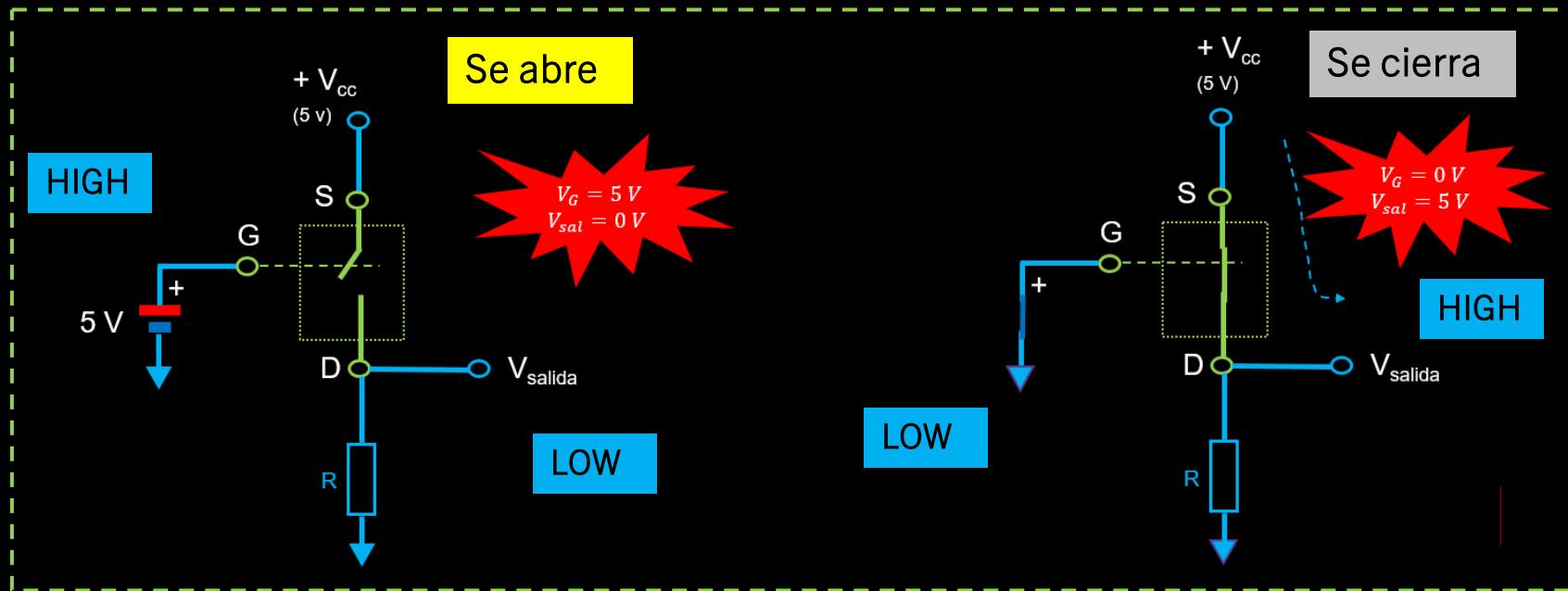


TRANSISTORES MOSFET

CANAL N



CANAL P



TRANSISTORES MOSFET

CANAL N

+ V_{cc}
(5 V)

Se cierra

HIGH

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

-

G

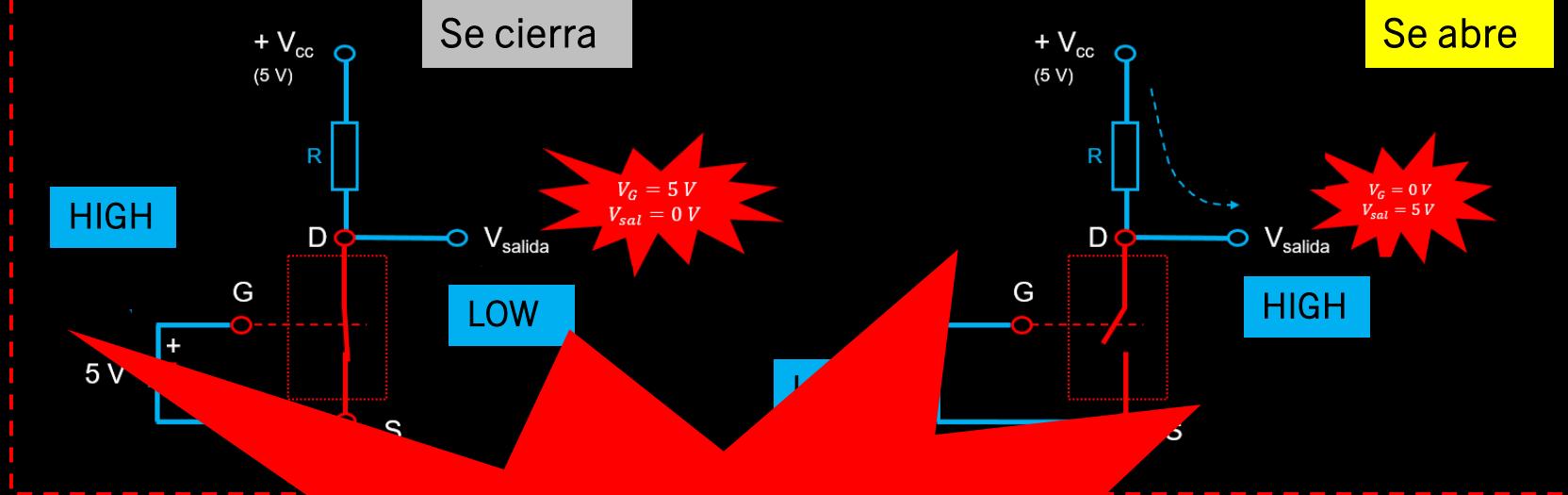
-

G

-

TRANSISTORES MOSFET

CANAL N



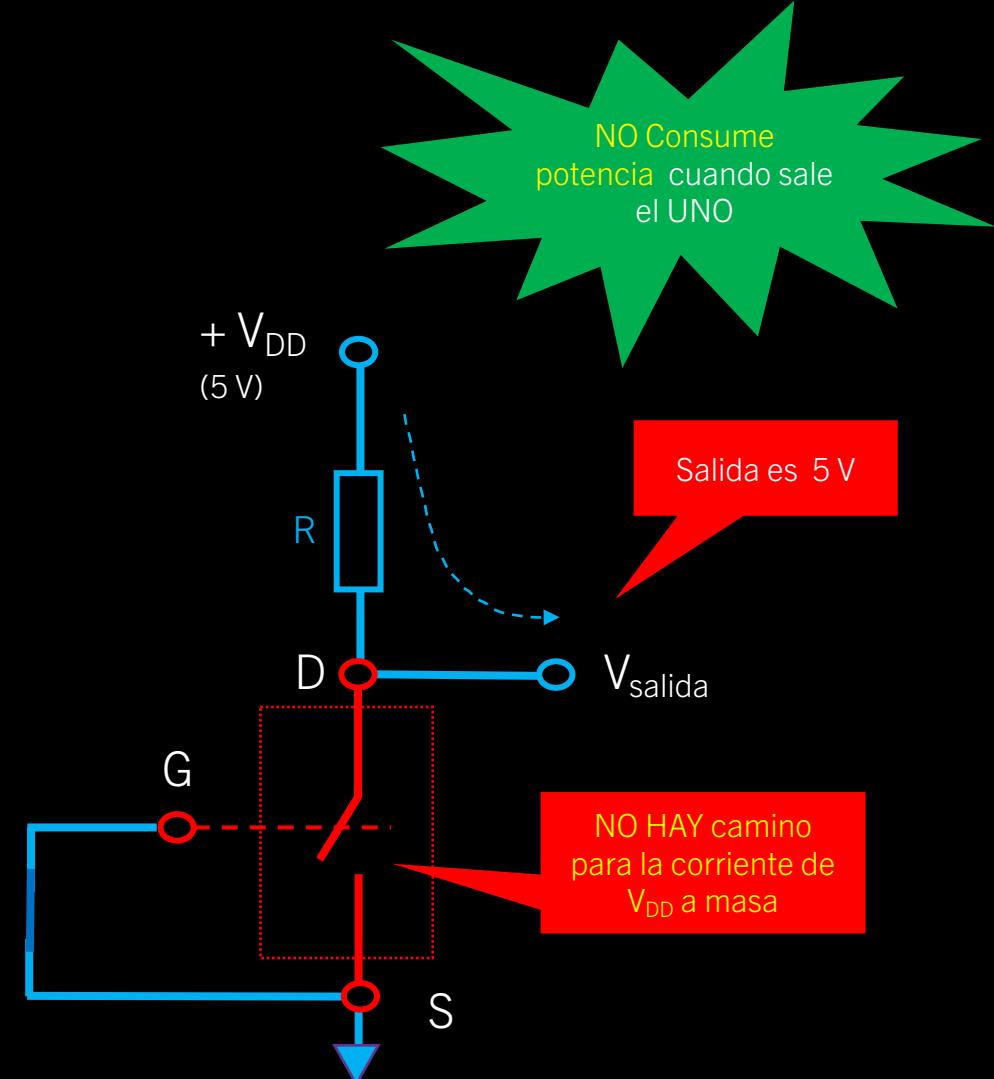
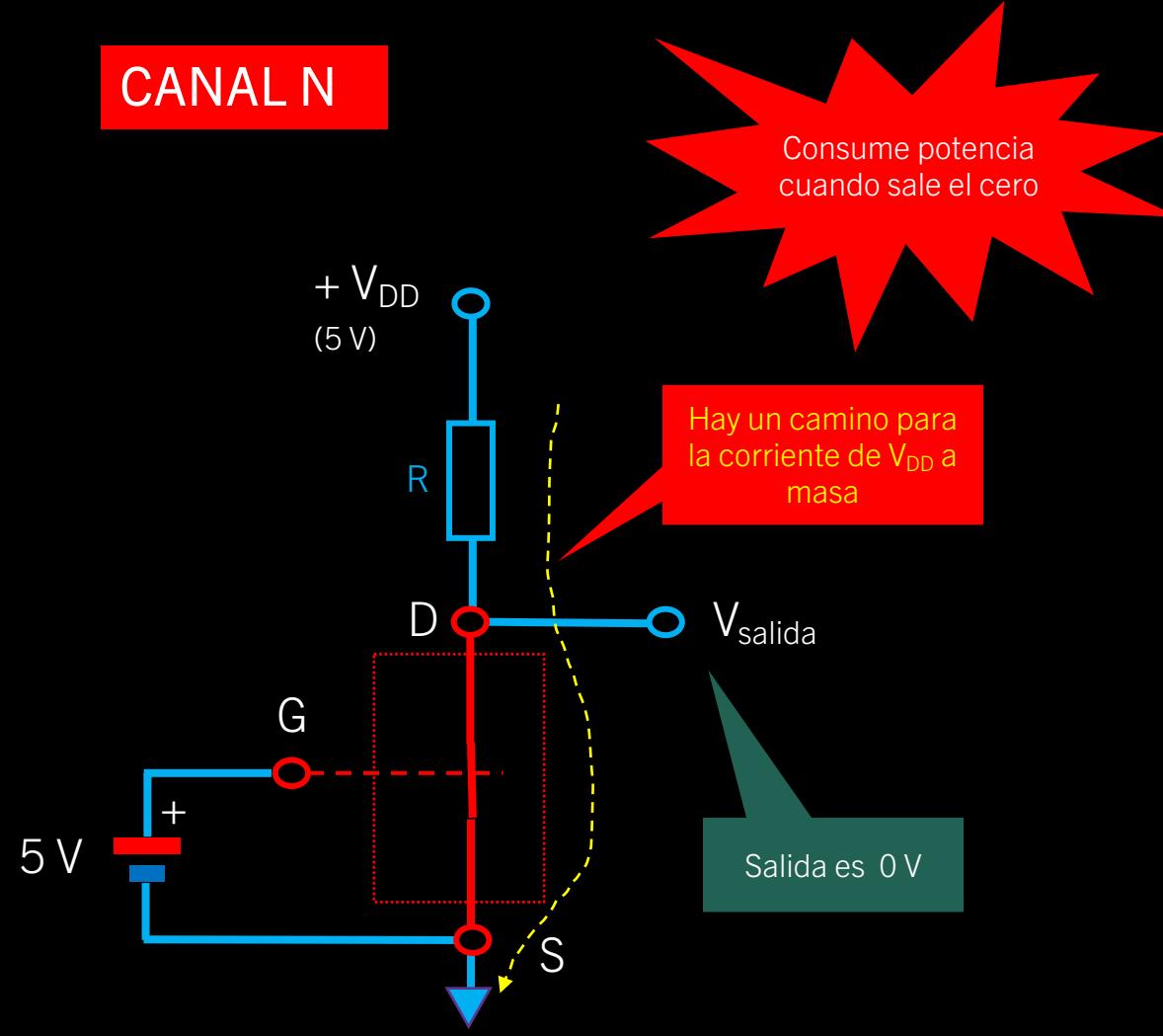
CANAL N

TIENE ALGUNOS PROBLEMAS
relacionados con el consumo ...



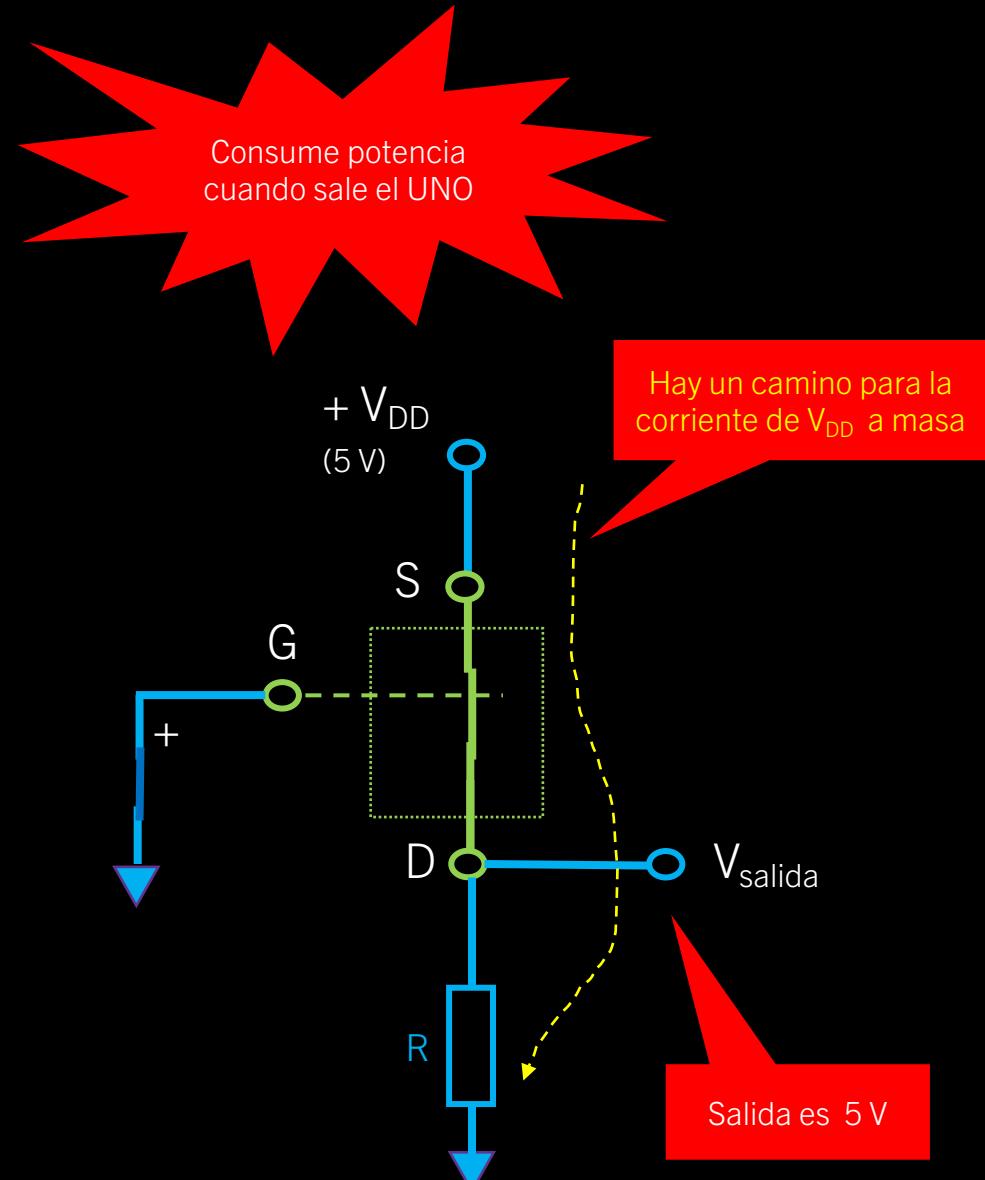
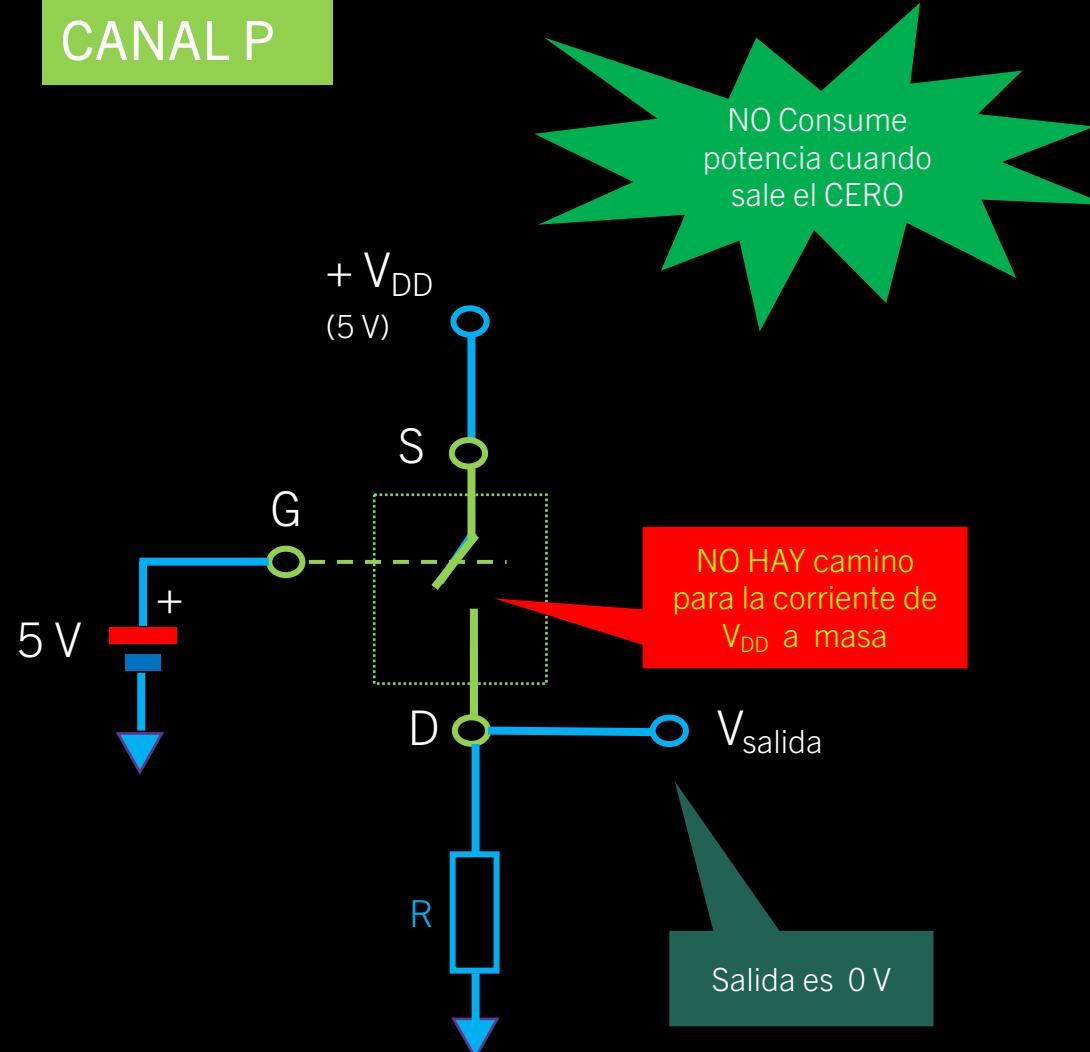
TRANSISTORES MOSFET

CANAL N

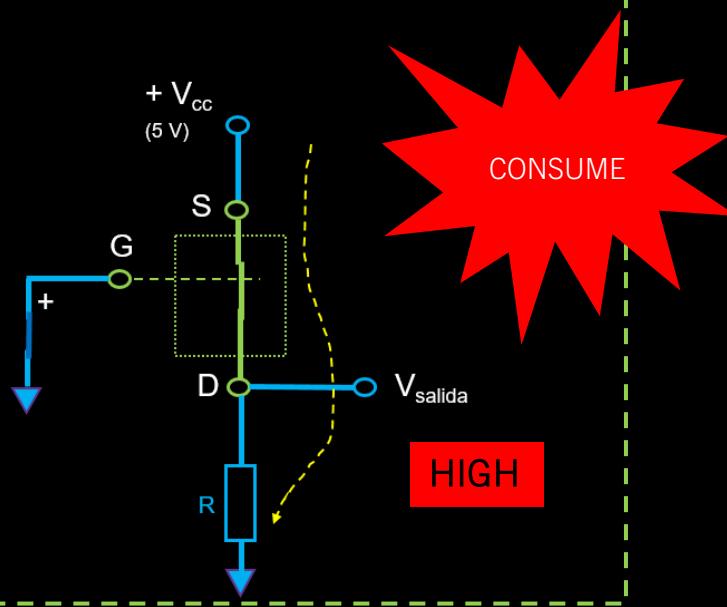
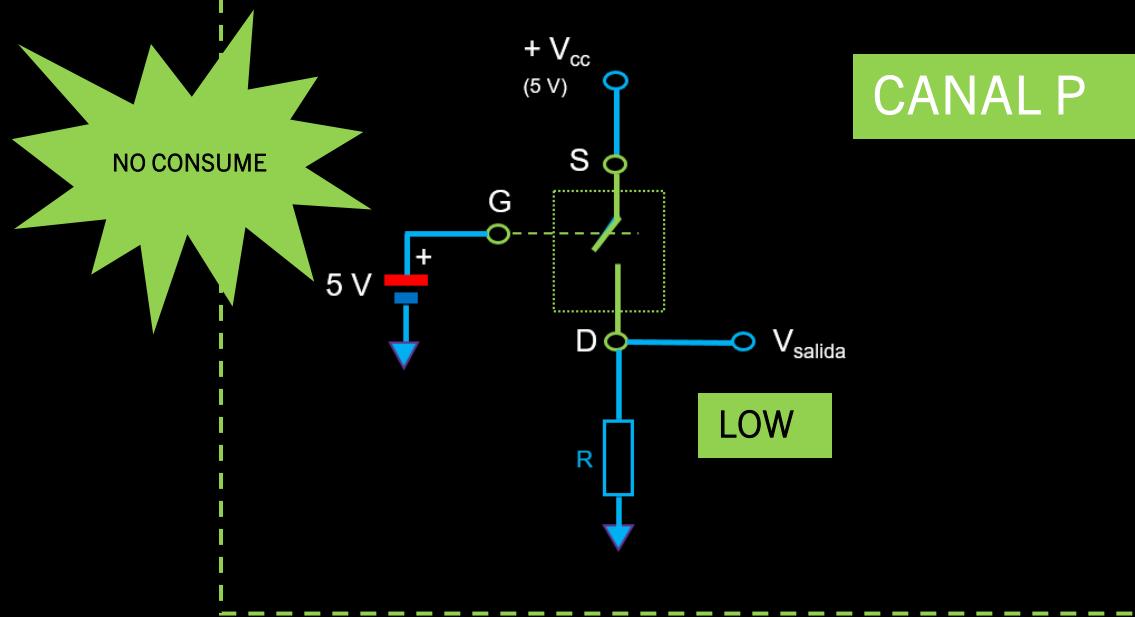
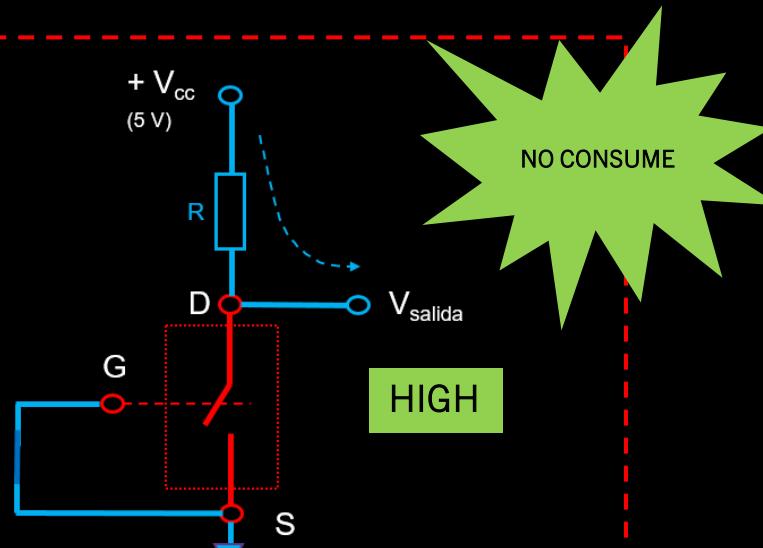
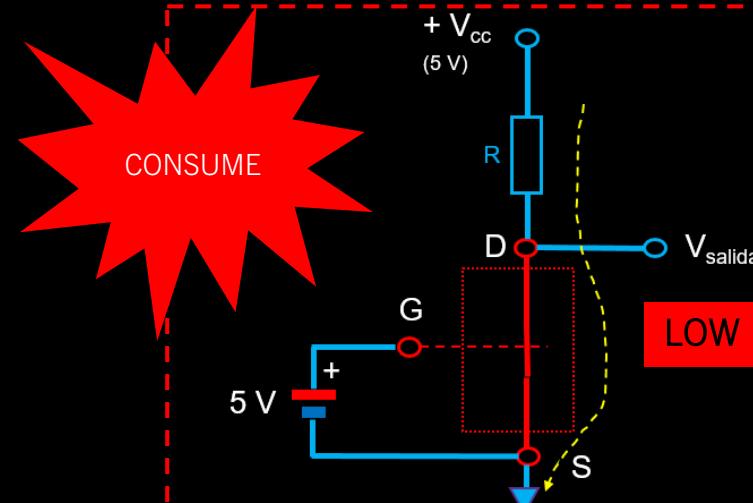


TRANSISTORES MOSFET

CANAL P

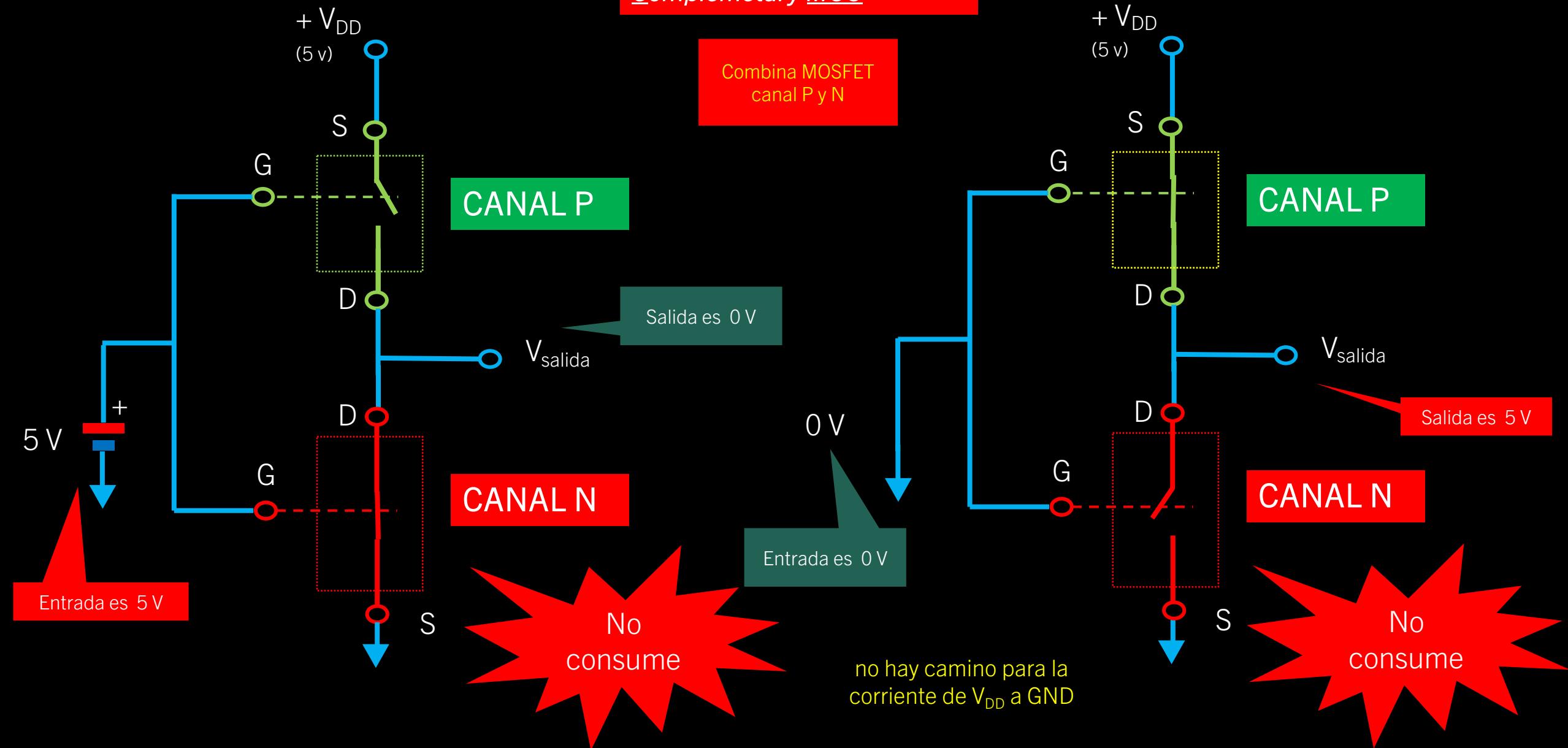


TRANSISTORES MOSFET



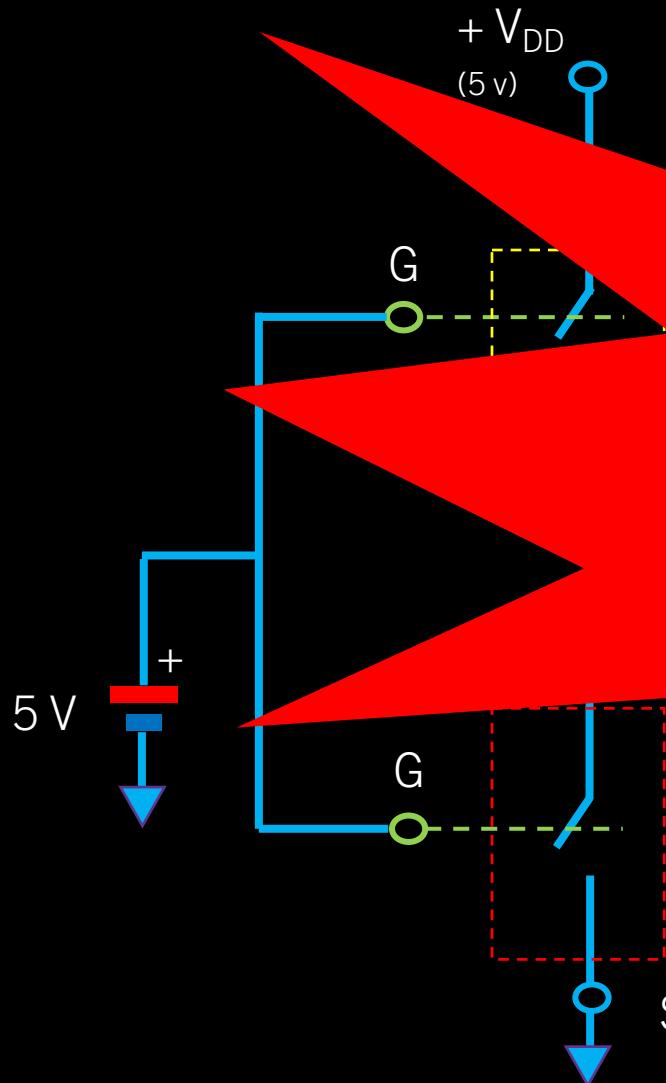
TRANSISTORES MOSFET

LÓGICA CMOS *Complementary MOS*

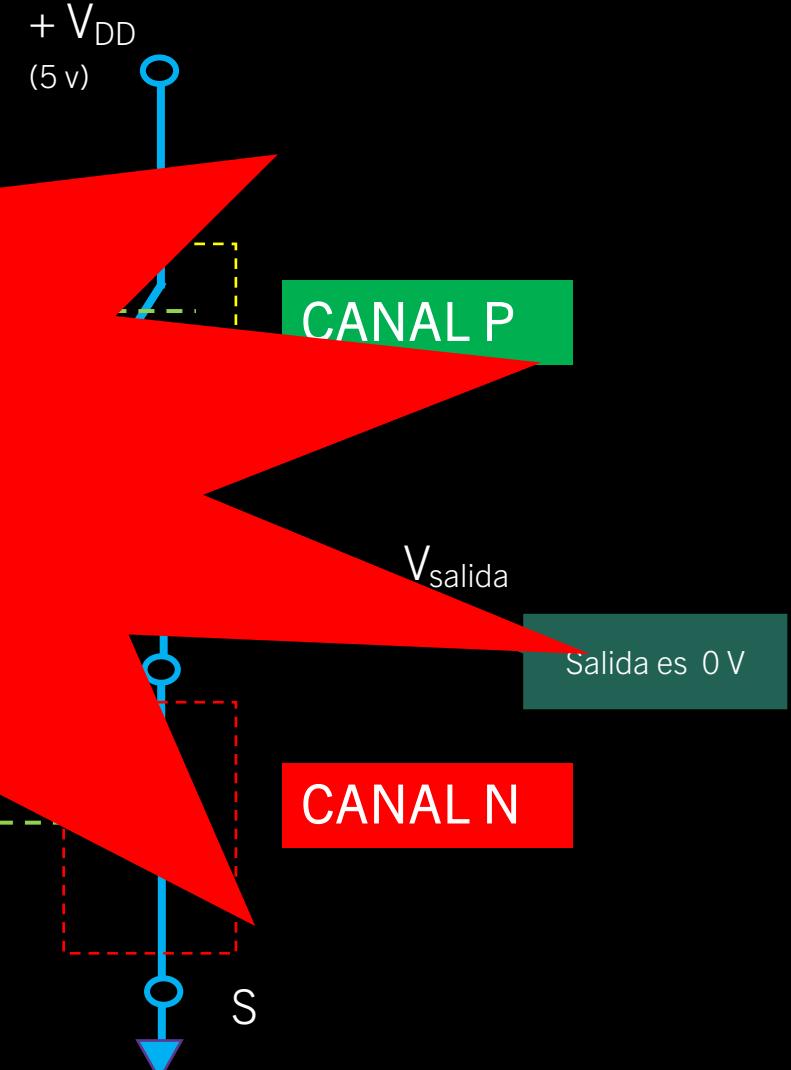


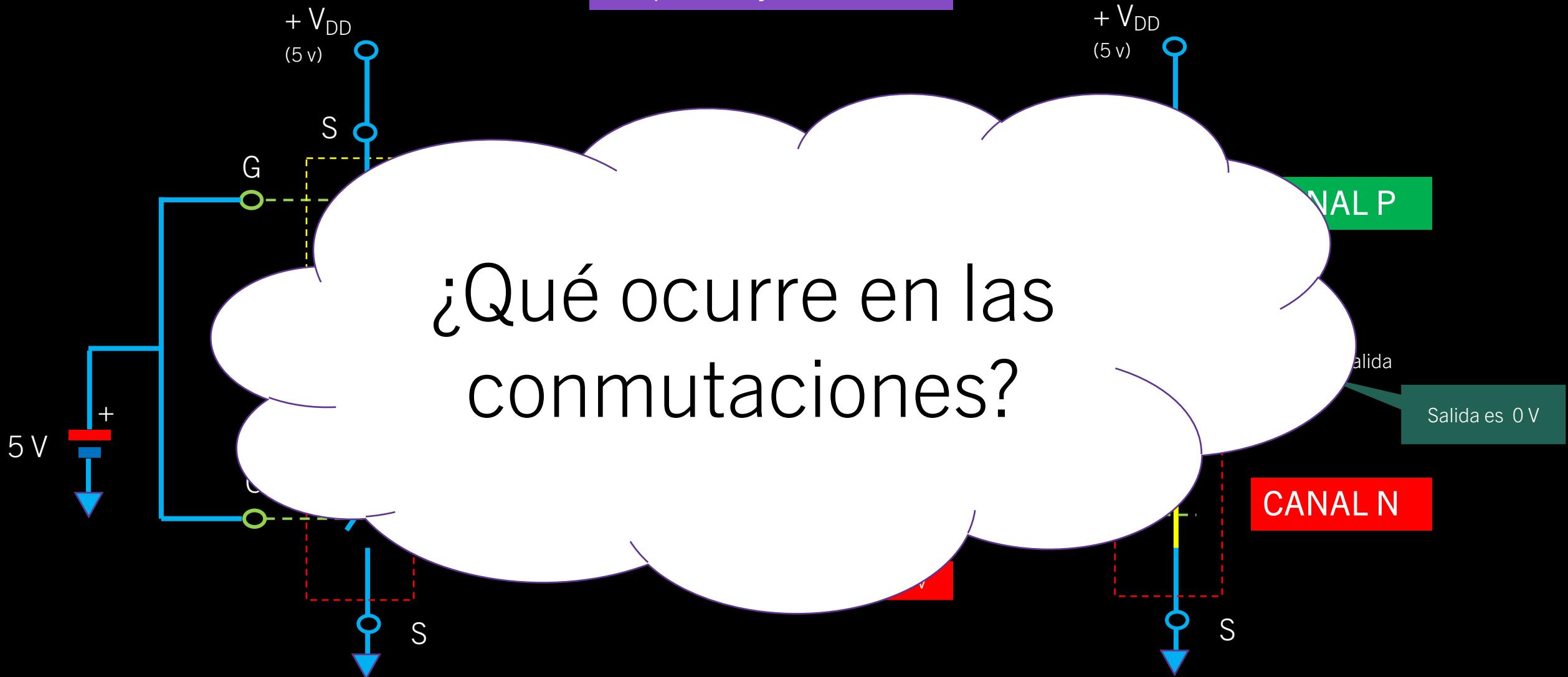
TRANSISTORES MOSFET

LOGICA CMOS *Complementary MOS*



¡ NO CONSUME !
... EN CONDICIONES ESTÁTICAS



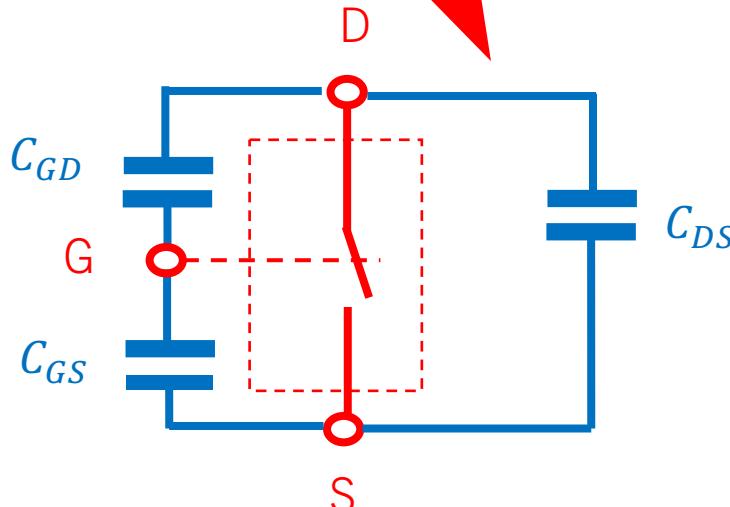


TRANSISTORES MOSFET

LOGICA CMOS *Complementary MOS*

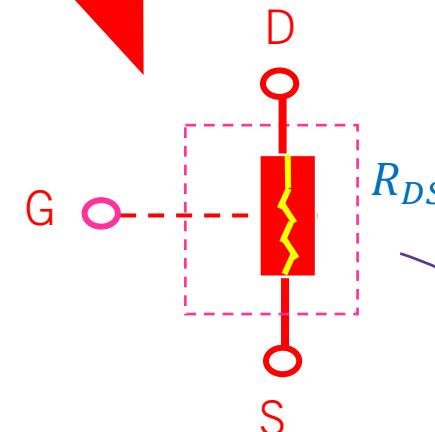
+ V_{cc}
(5 v)

El MOSFET tiene capacidades parásitas



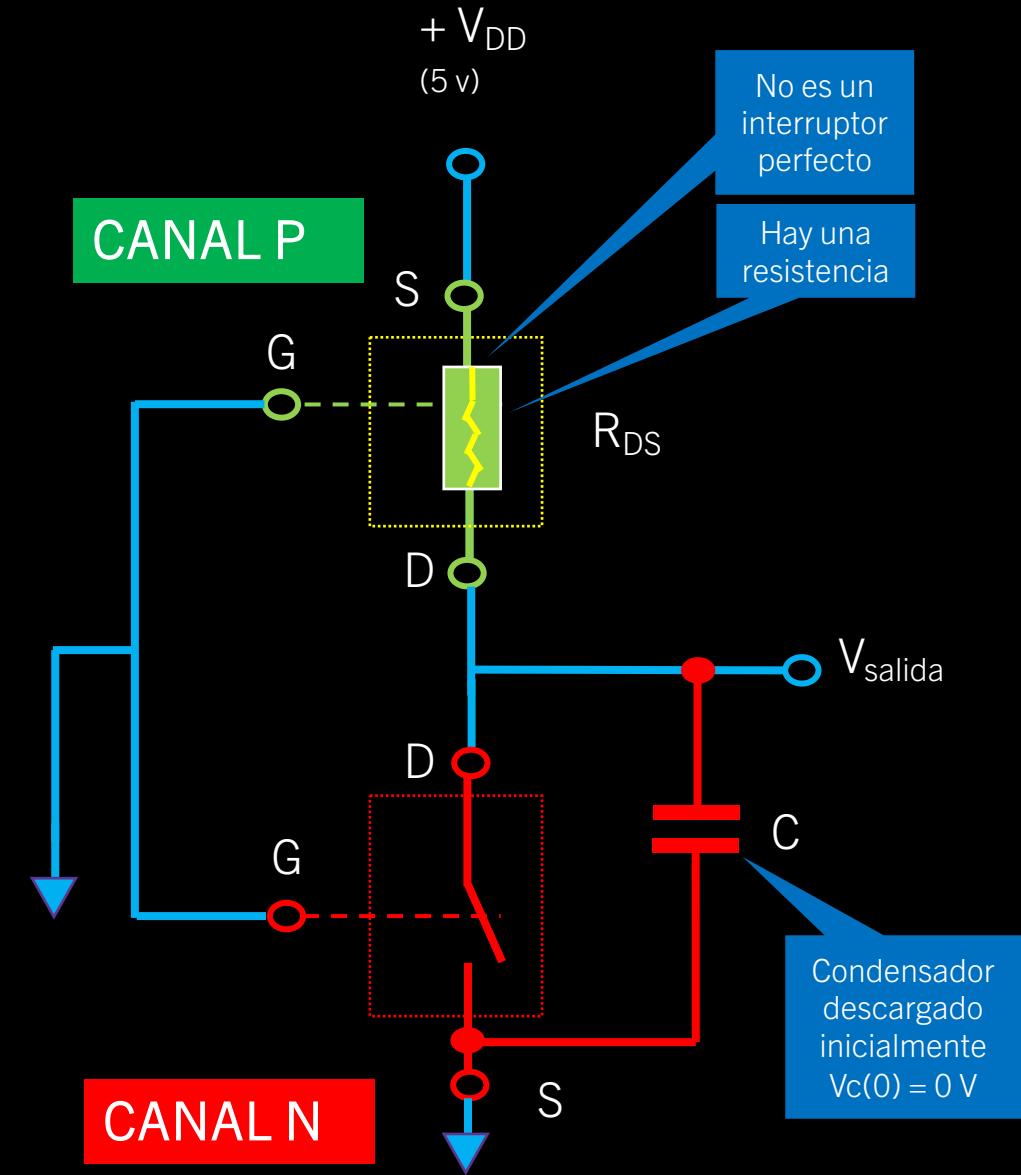
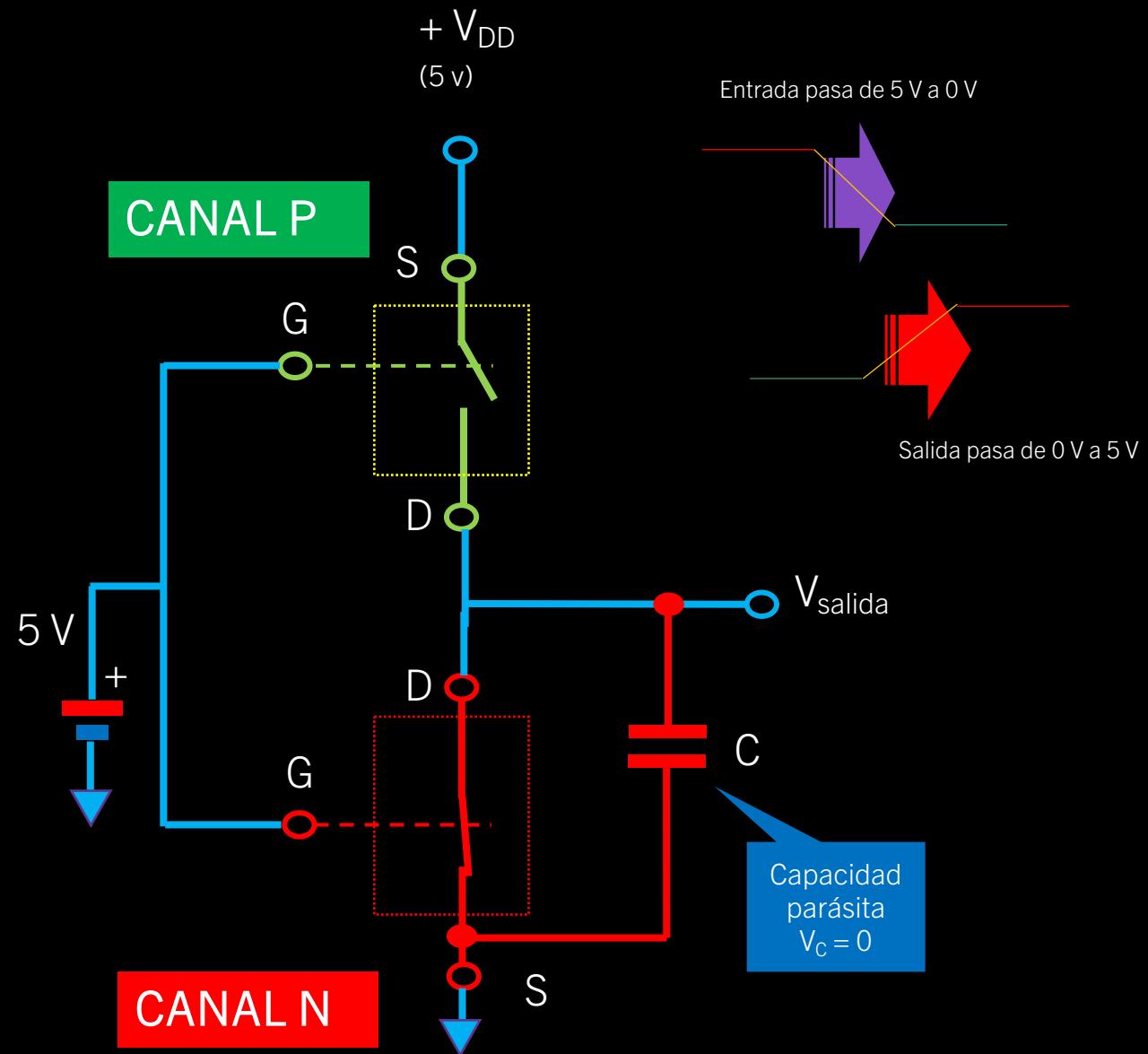
+ V_{cc}

El MOSFET cerrado tiene una resistencia, R_{DS} , no es un cortocircuito perfecto



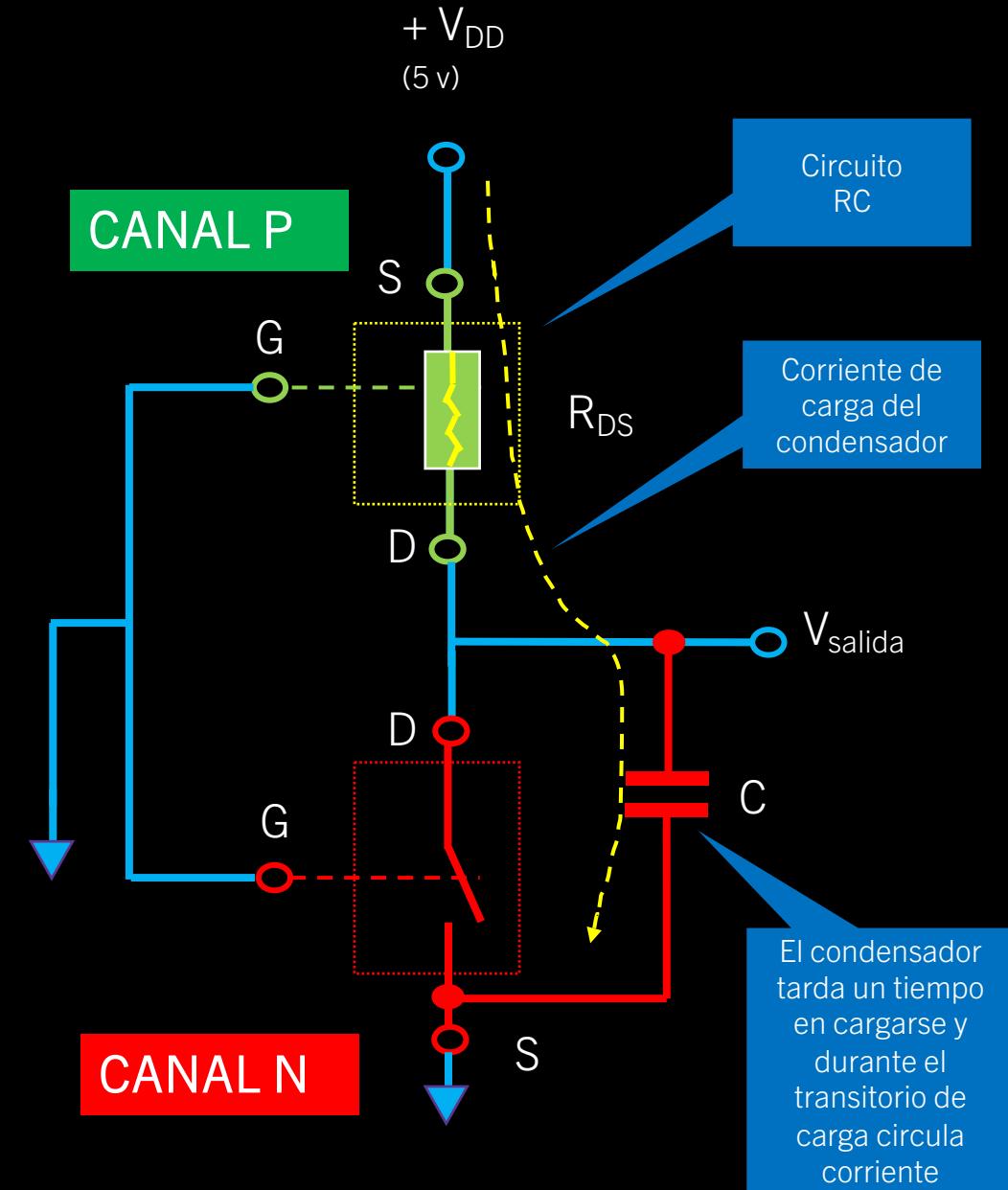
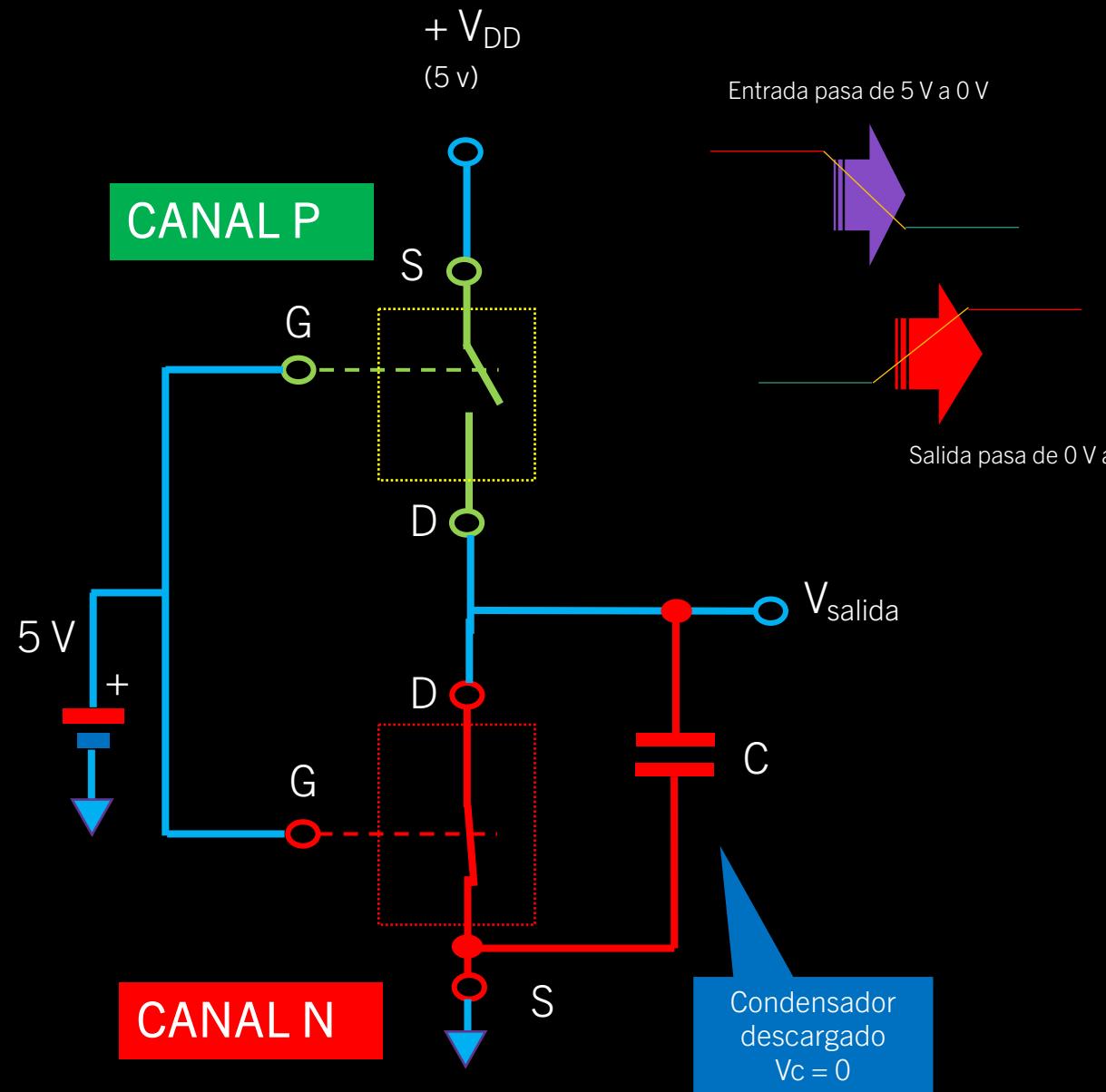
TRANSISTORES MOSFET

Comutación de 0 a 1 lógico en la salida

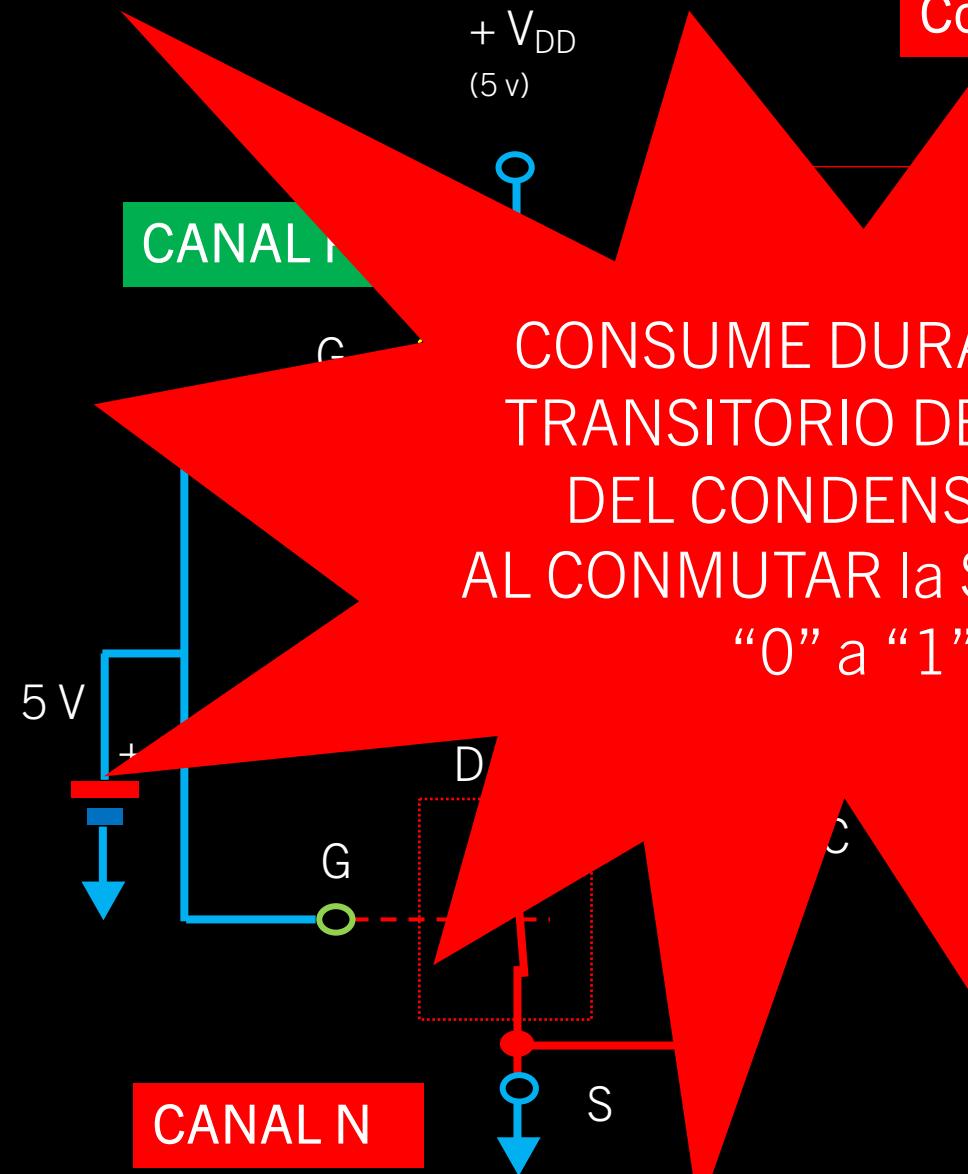


TRANSISTORES MOSFET

Conmutación de 0 a 1 lógico

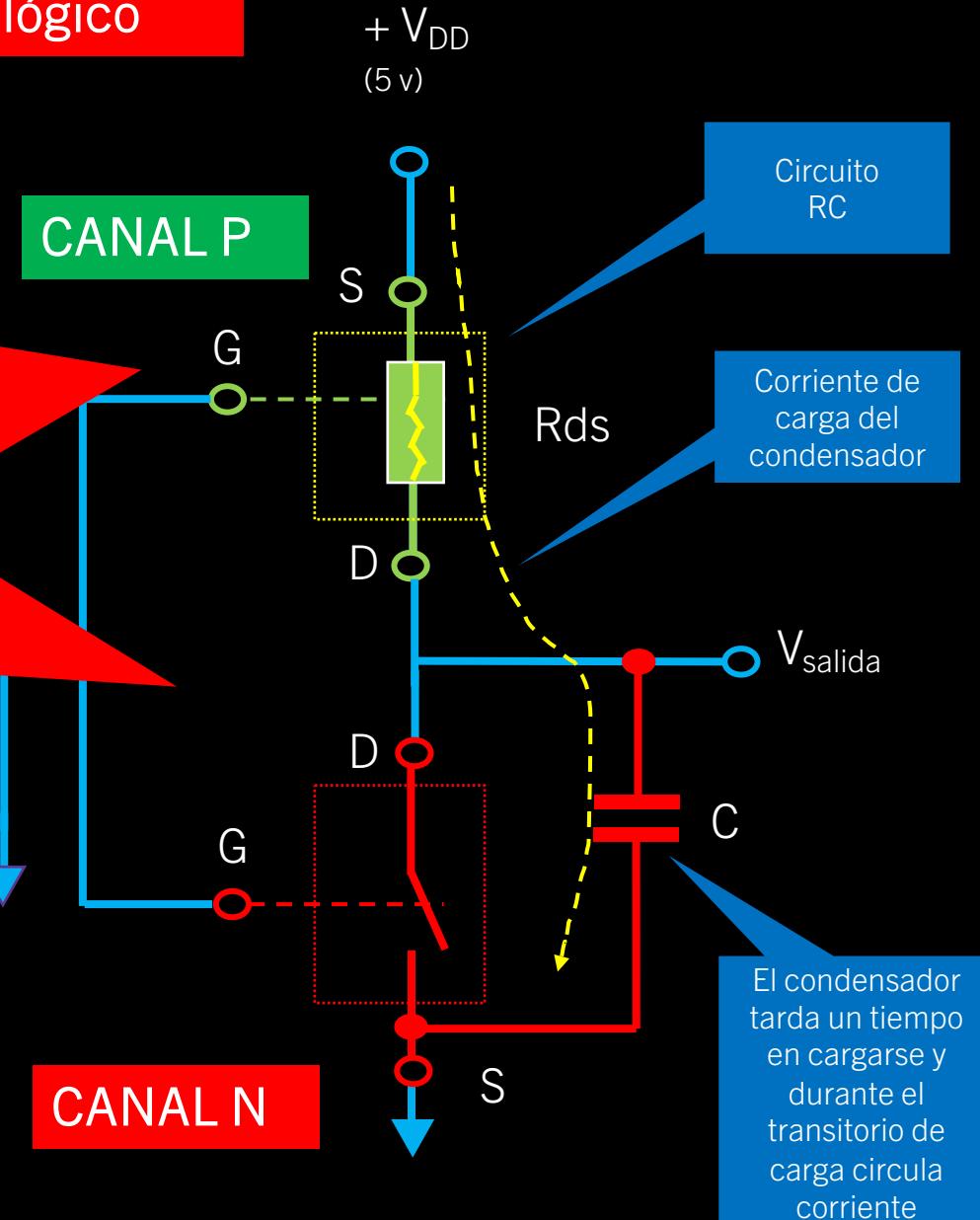


TRANSISTORES MOSFET

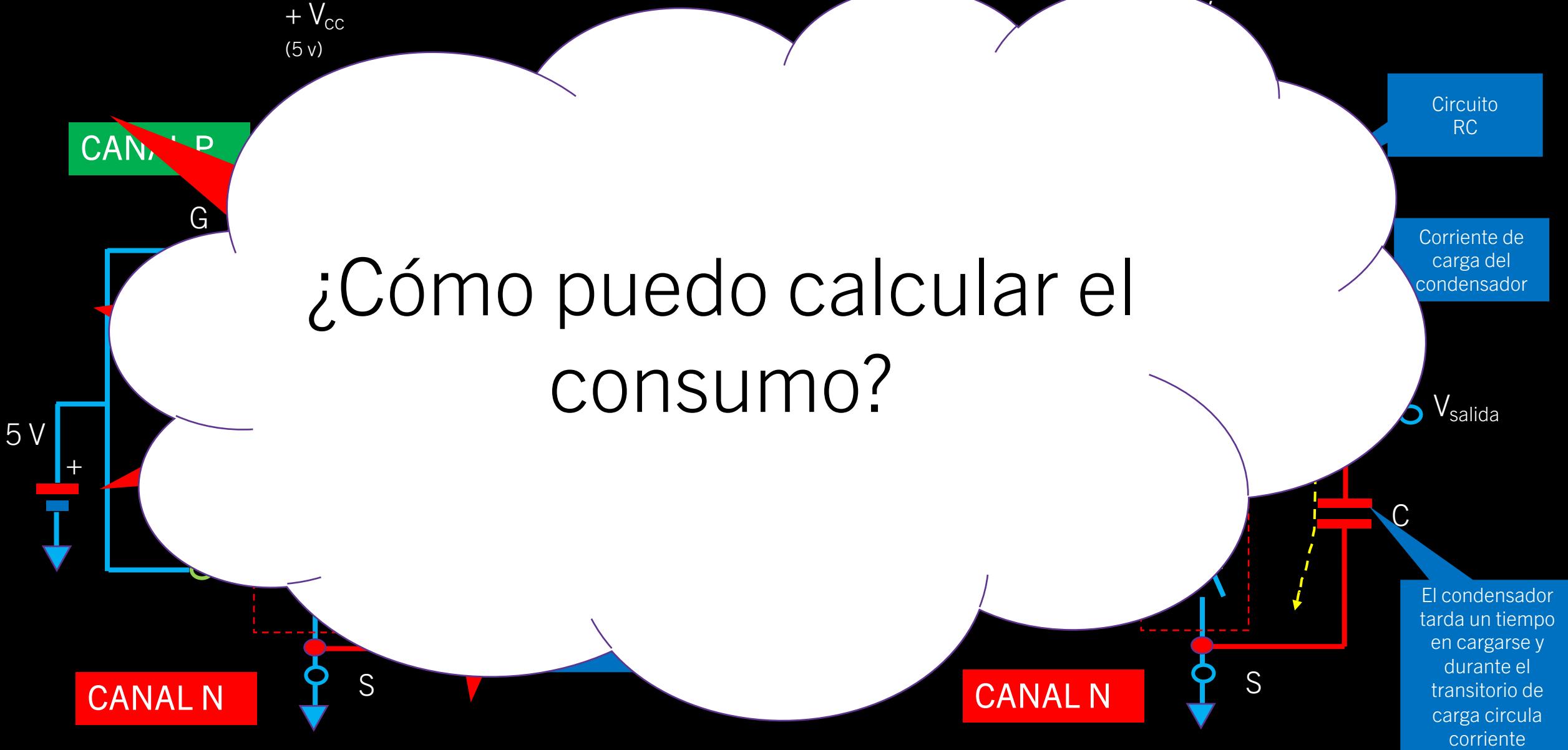


Conversión de 0 a 1 lógico

CONSUME DURANTE EL
TRANSITORIO DE CARGA
DEL CONDENSADOR
AL CONMUTAR la SALIDA de
“0” a “1”



TRANSISTORES MOSFET



MOSFET CONSUMO

Consumo de potencia dinámica

Energía proporcionada por la fuente de alimentación

$$E_{fuente} = \int P dt = \int V_{DD} i_C dt = \int_0^{V_{DD}} V_{DD} C \frac{dv_c}{dt} dt = C V_{DD} \int_0^{V_{DD}} dv_c = C V_{DD}^2$$

Parte de la energía se almacena en C

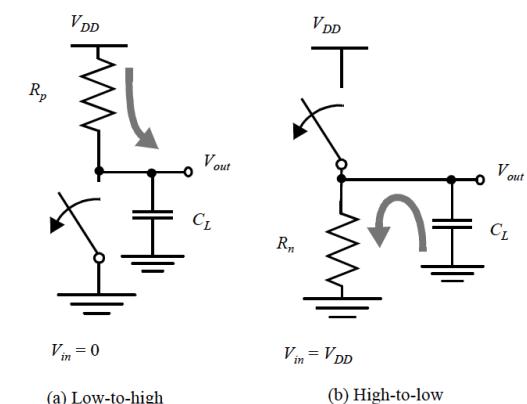
$$E_{condensador} = \frac{1}{2} C V_{DD}^2$$

la otra mitad se disipa en el transistor PMOS

Transición 0 → 1

Transición 1 → 0

Durante la fase de descarga, la carga se extrae del condensador y su energía se disipa en el dispositivo NMOS



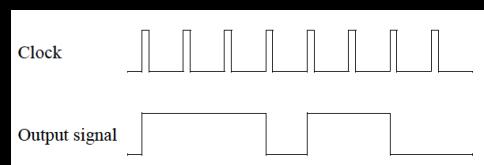
MOSFET CONSUMO

Consumo de potencia dinámica

$$PD = C V_{DD}^2 f$$

Diagrama que muestra la fórmula para el consumo de potencia dinámica. Señales de flecha apuntan a los términos de la ecuación:

- Tensión de alimentación (V_{DD})
- Potencia disipada (PD)
- Capacidad (C)
- Frecuencia de conmutación (f)



En la figura la forma de onda superior representa la señal de reloj y la inferior muestra la señal presente a la salida de la puerta. Las transiciones que consumen potencia tienen lugar en 2 de cada 8 ciclos de reloj, lo que equivale a una probabilidad de transición de 0.25 (25%)

El cálculo de disipación en circuitos complejos es más complicado. Uno de los problemas es que la frecuencia de las transiciones de 0 a 1 de la salida, también denominada tasa de conmutación, depende de la estadística de las señales de entrada. Si las señales de entrada no cambian, no se producirá ninguna conmutación y el consumo de potencia dinámica será cero. Si las señales cambian rápidamente, se producirá una gran cantidad de conmutaciones y, por tanto, de disipación. Otros factores que tienen influencia sobre la tasa de conmutación son la topología de la red y la función lógica que realiza. Pueden considerarse estos factores escribiendo:

$$PD = C \cdot V_{DD}^2 \cdot f_{0 \rightarrow 1} = C \cdot V_{DD}^2 \cdot P_{0 \rightarrow 1} \cdot f = C_{EFF} \cdot V_{DD}^2 \cdot f$$

donde :

f : representa la tasa máxima de sucesos en la entrada, a menudo es la frecuencia de reloj.

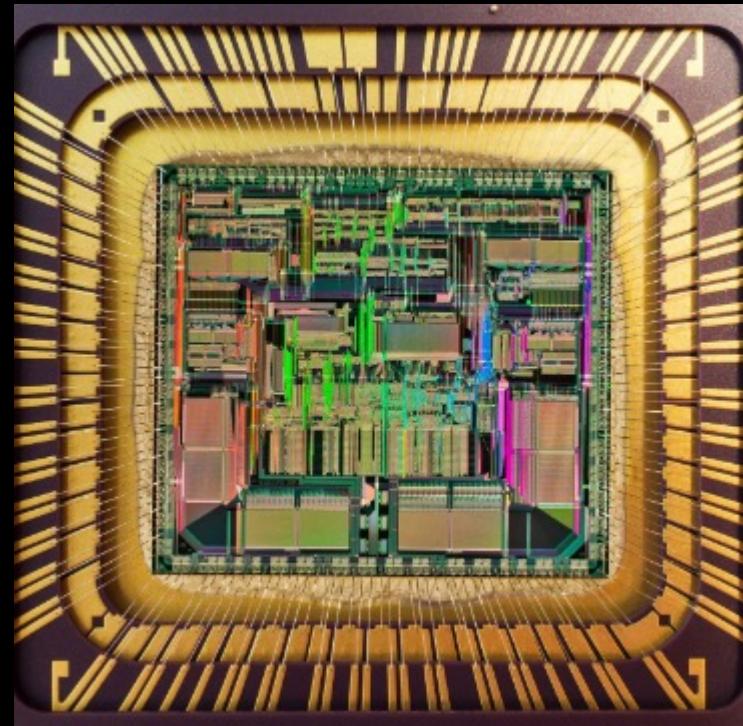
$P_{0 \rightarrow 1}$: es la tasa de actividad y representa la probabilidad de que un suceso de reloj provoque una transición 0 → 1 a la salida de la puerta.

$C_{EFF} = C \cdot P_{0 \rightarrow 1}$ es la capacidad efectiva.

Aplicación

Considere un chip CMOS de $0,25 \mu\text{m}$ con una frecuencia de reloj de 500 MHz y una capacidad de carga media de 15 fF ($15 \cdot 10^{-15} \text{ F}$) por puerta.

¿Cuál es el consumo de potencia por puerta para una alimentación de $2,5 \text{ V}$? ¿y para un millón de puertas suponiendo que se produzca una transición en cada flanco de reloj? ¿y si la tasa de actividad es del 10%?



Aplicación



Considere un chip CMOS de 0,25 μm con una frecuencia de reloj de 500 MHz y una capacidad de carga media de 15 fF ($15 \cdot 10^{-15}$ F) por puerta.

¿Cuál es el consumo de potencia por puerta para una alimentación de 2.5 V? ¿y para un millón de puertas suponiendo que se produzca una transición en cada flaco de reloj? ¿y si la tasa de actividad es del 10%?

$$PD = C V_{DD}^2 f$$

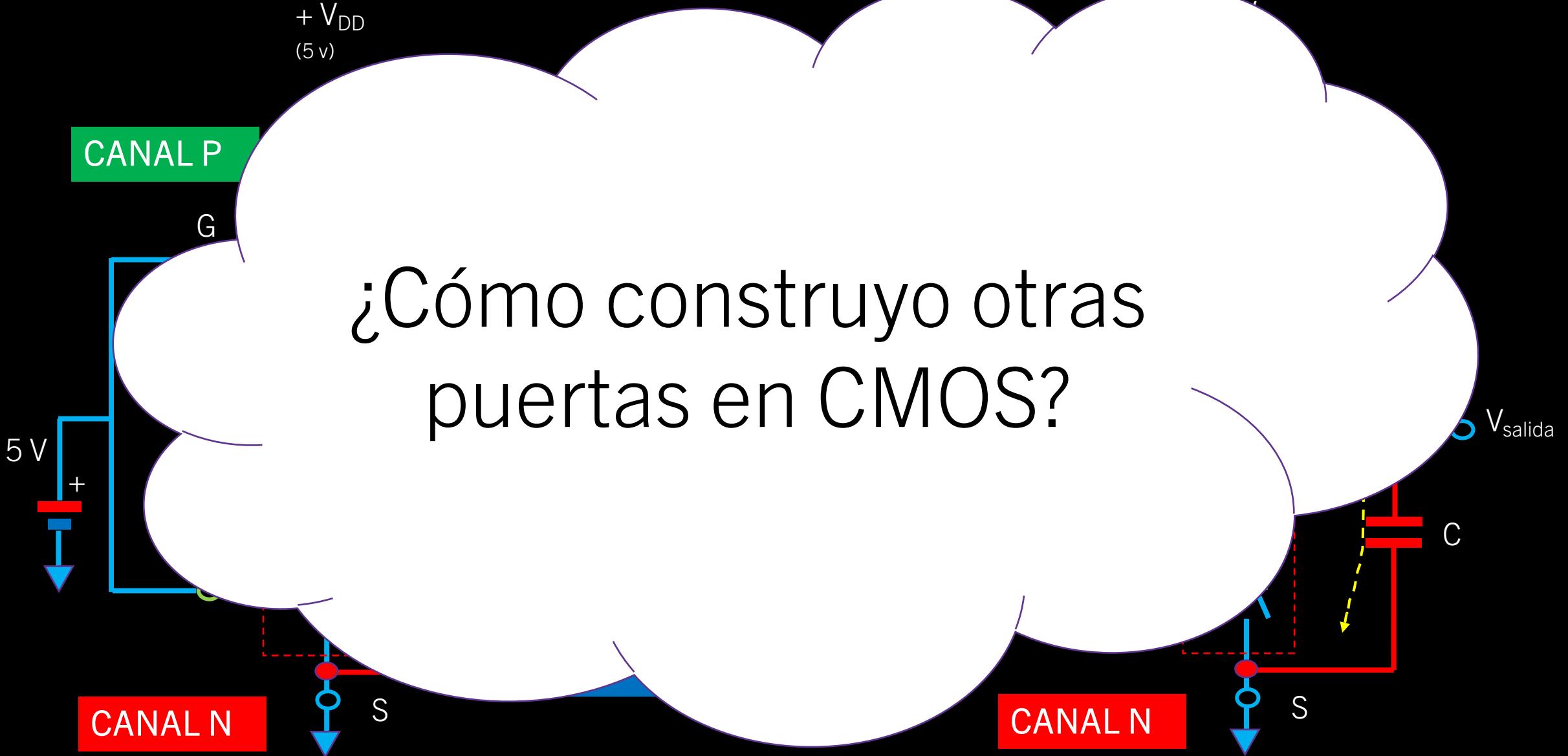
$$PD = 15 \text{ fF} \cdot 2,5^2 \cdot 500 \cdot 10^6 = 47 \mu\text{W}$$

Para un diseño de 1 millón de puertas nos daría un consumo de 47 W, ¡un valor muy alto!

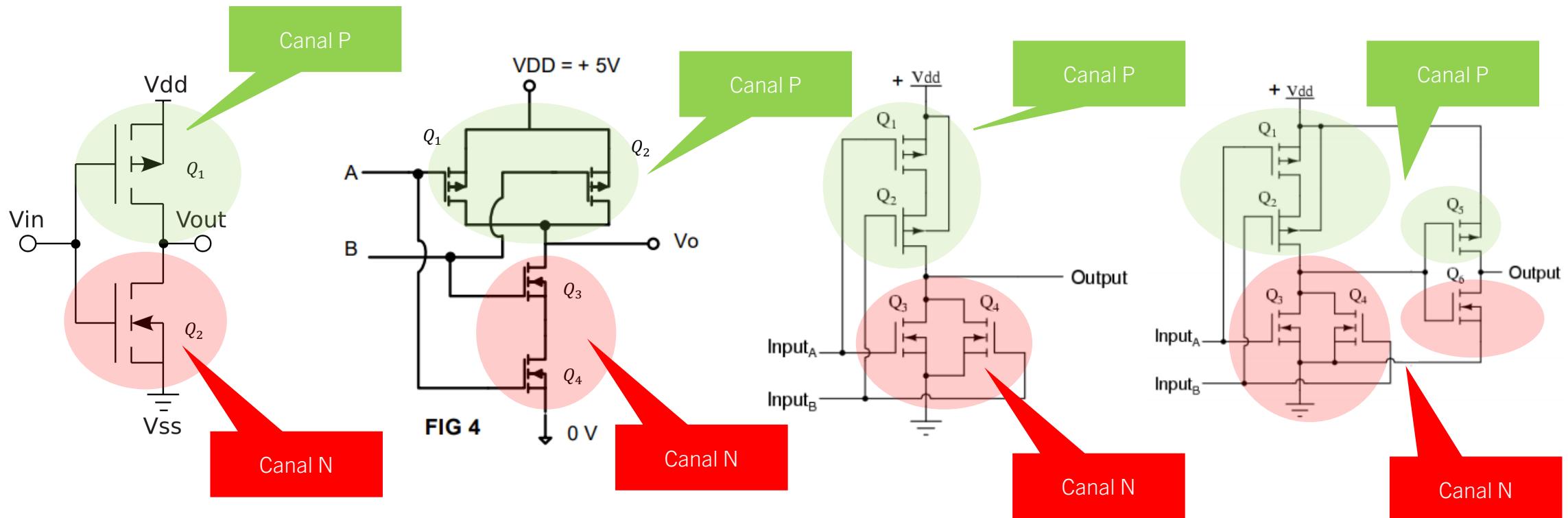
No obstante, este cálculo es muy pesimista, en realidad, no todas las puertas de un circuito integrado comutan a la velocidad máxima de 500 MHz. ¡ La actividad real en el circuito es bastante menor !

Para una tasa de actividad del 10% ($P_{0 \rightarrow 1} = 0,1$) el consumo medio de energía del ejemplo anterior se divide por 10.

TRANSISTORES MOSFET



PUERTAS CMOS



Regla

Canal N { Entrada = 0 se abre (OFF)
Entrada = 1 se cierra (ON)

Canal P { Entrada = 0 se cierra (ON)
Entrada = 1 se abre (OFF)

PUERTAS CMOS

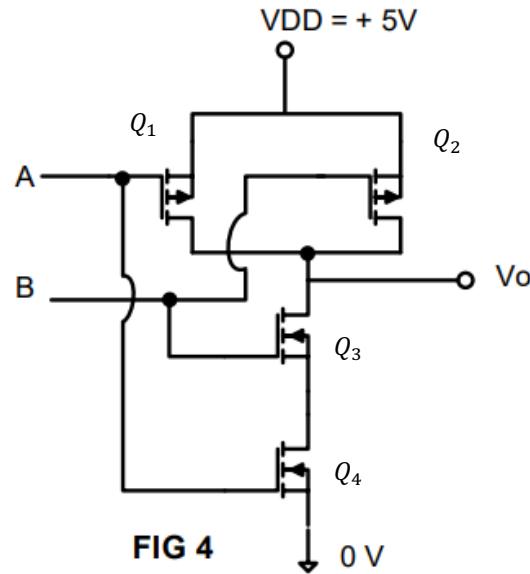
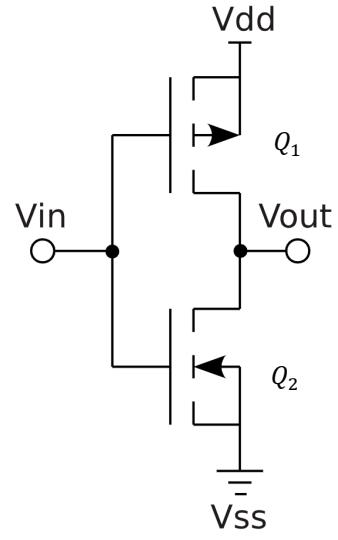
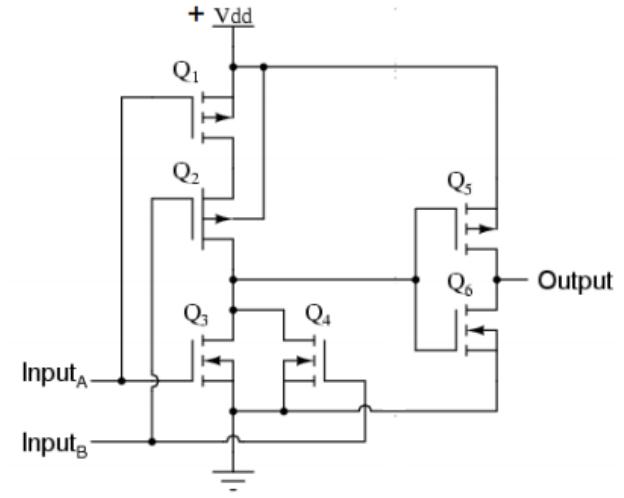
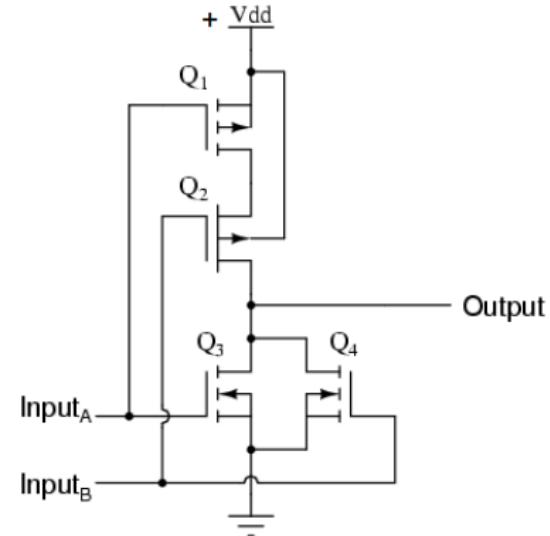


FIG 4



?

Vin	Q1	Q2	Vout
1	OFF	ON	0
0	ON	OFF	1

A	B	Q1	Q2	Q3	Q4	Vo
0	0	ON	ON	OFF	OFF	1
0	1	ON	OFF	ON	OFF	1
1	0	OFF	ON	OFF	ON	1
1	1	OFF	OFF	ON	ON	0

CONTENIDO

1º TRANSISTORES

2º ESTRUCTURA DEL MOSFET

3º MODELO DEL MOSFET

4º CIRCUITOS DIGITALES: PUERTAS CMOS

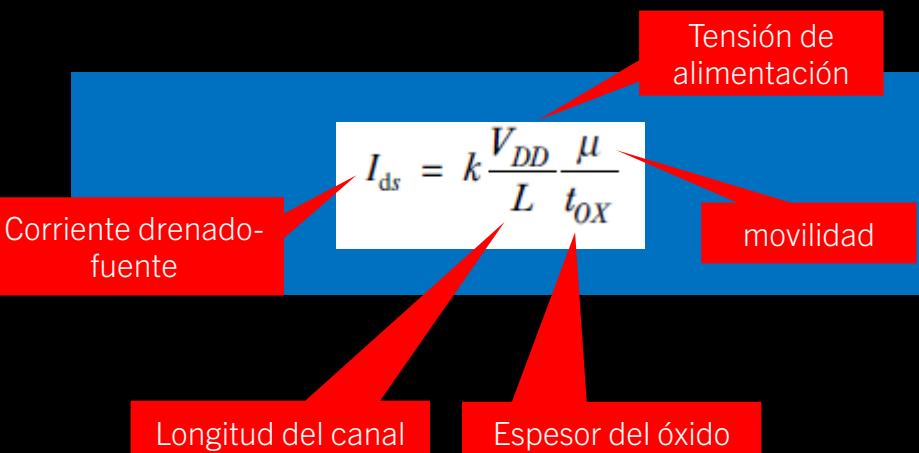
5º TECNOLOGÍAS AVANZADAS

Universidad de Oviedo

AUMENTO DE VELOCIDAD

La velocidad de los circuitos integrados se mejora con la reducción del canal de los transistores y también con corrientes más elevadas capaces de cargar y descarga las pequeñas capacitancias parásitas del transistor.

Una aproximación para la corriente por un dispositivo MOSFET viene dada por la ecuación:



ALTERNATIVAS

- Aumento de la tensión de alimentación V_{DD} . Desafortunadamente, el voltaje de alimentación tiende a seguir una tendencia opuesta con el fin de reducir el consumo de energía.
- Reducción de la distancia L entre el drenador y la fuente. Afortunadamente, la longitud del canal se escala automáticamente con la tecnología (aunque con un estancamiento a partir del nodo 32 nm).
- Disminución del espesor del óxido t_{ox} . El espesor del óxido se ha reducido de 1,8 nm (ocho átomos) a 1,2 nm (cinco átomos) ... Desafortunadamente, la fuga de óxido de puerta aumenta exponencialmente con la reducción de la anchura, lo que afecta a las corrientes de fuga parásitas y, en consecuencia, al consumo en estado de reposo.
- Aumento de la movilidad de los portadores de carga (electrones o huecos, según el tipo de MOSFET). Este parámetro se mantuvo sin cambios hasta la generación de 90 nm, que fue el primero en explotar el concepto de silicio tensionado (*stress silicon*) para mejorar la movilidad de los portadores. Las técnicas de mejora de la movilidad son obligatorias para mantener un incremento del rendimiento sin afectar las fugas del dispositivo.
- Aumento de densidad de integración el incremento de la densidad de integración reduce el área de silicio ocupada y las dimensiones del dispositivo, favoreciendo el decremento en las capacidades parásitas de las uniones semiconductoras e interconexiones, lo que permite incrementar la velocidad de comutación.

MOSFET TECNOLOGÍAS AVANZADAS

AUMENTO DE VELOCIDAD

La velocidad de los circuitos integrados se mejora con la reducción del canal de los transistores y también con corrientes más elevadas capaces de cargar y descargar las pequeñas capacidades parásitas del transistor.

Una aproximación para la corriente en un dispositivo MOSFET viene dada por la ecuación:

$$I_{ds} = k \frac{V_{DD}}{L} \frac{\mu}{t_{ox}} I$$

Corriente drenado-fuente

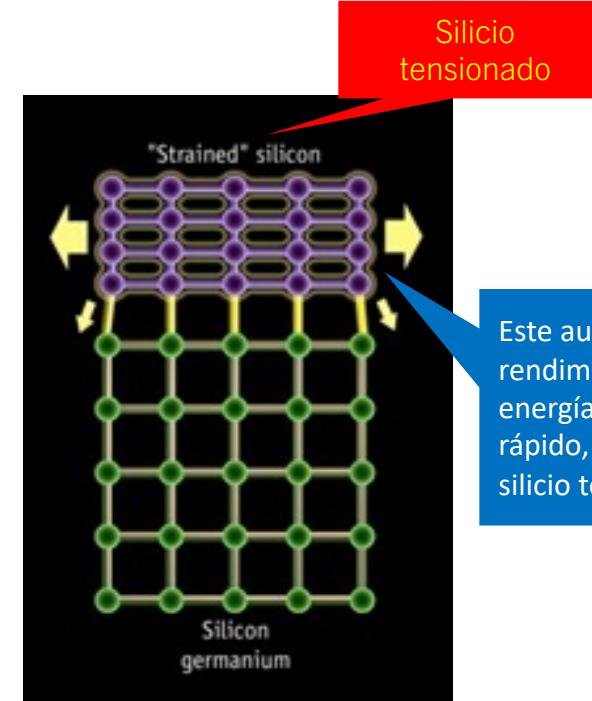
Tensión alimentación

movilidad

Longitud del canal

Espesor del óxido

ALTERNATIVAS



Este aumento de la movilidad incrementa el rendimiento del chip y reduce el consumo de energía. Los electrones pueden moverse más rápido, lo que permite que los transistores de silicio tensionado comuten a mayor velocidad.

el voltaje de la fuente de alimentación se reduce a bajo consumo de energía, de 5 V a 1,2 V.

longitud de canal y aumento a la velocidad de 3% en la velocidad de operación.

nm de longitud de puerta y de los dispositivos

con el tipo de proceso de 90 nm, que es necesario para mejorar la velocidad. Estas son obligatorias para el dispositivo.

MOSFET TECNOLOGÍAS AVANZADAS

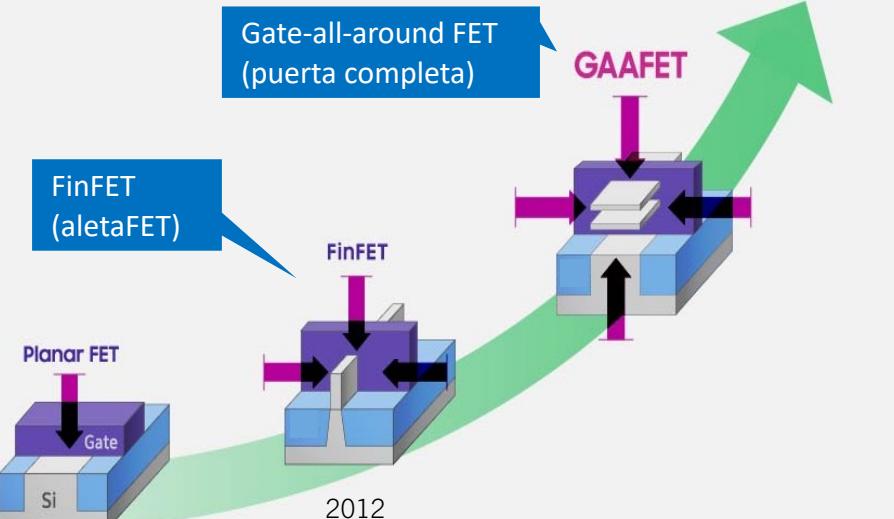
ALTERNATIVAS

AUMENTO DE VELOCIDAD

La velocidad de los transistores más elevados descende.

Incremento del número de transistores por Chip

MOSFET plano tradicional.



VDD. Desafortunadamente, el voltaje de la puesta, motivado por fines de bajo consumo de ministro se ha reducido de 1,5 V a 1,2 V.

Este. Afortunadamente, la longitud de la que con un estancamiento a un aumento del 33% en la

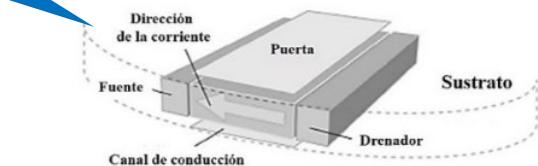
que ha reducido de 1,8 nm la fuga de óxido de puerta que afecta a las corrientes de paso.

o huecos, según el tipo generación de 90 nm, que (process silicon) para mejorar la movilidad son obligatorias para las rugas del dispositivo.

MOSFET TECNOLOGÍAS AVANZADAS

Transistor FinFET

MOSFET
plano
tradicional

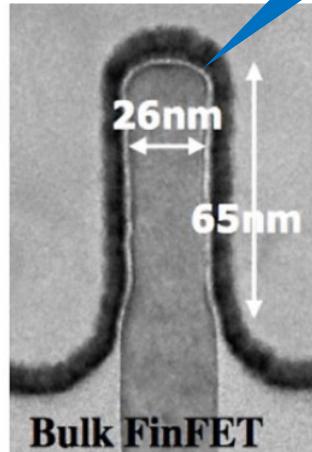


FinFET
(aletaFET)



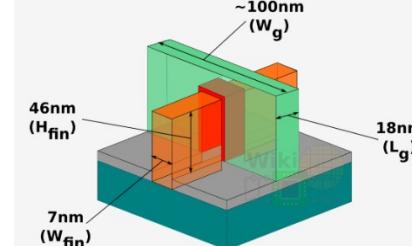
La estructura se construye en vertical, ocupa menos espacio en la oblea. La puerta tiene forma de aleta.

Aislante de
puerta



Corte transversal de una aleta

Fin FET.



PREGUNTAS DE REPASO

Universidad de Oviedo

1. En un transistor MOSFET de canal N
 - (a) El sustrato es N
 - (b) El sustrato es P
2. En un transistor MOSFET de canal P
 - (a) El sustrato es N
 - (b) El sustrato es P
3. El control de un MOSFET se realiza por
 - (a) Tensión VDS
 - (b) Tensión VGD
 - (c) Tensión VGS
 - (d) Ninguna de las anteriores
4. Un MOSFET de Canal N
 - (a) Se dice que conduce ceros
 - (b) Se dice que conduce unos
 - (c) Ninguna de las anteriores
5. Un MOSFET de Canal P
 - (a) Se dice que conduce ceros
 - (b) Se dice que conduce unos
 - (c) Ninguna de las anteriores
6. En un MOSFET el terminal de sustrato suele unirse al drenador
 - (a) verdadero
 - (b) falso
7. La conducción en un MOSFET es de tipo bipolar (electrones y huecos)
 - (a) verdadero
 - (b) falso
8. El óxido de puerta del MOSFET es muy estrecho:
 - (a) verdadero
 - (b) falso
9. La corriente de puerta del MOSFET es despreciable en condiciones estáticas
 - (a) verdadero
 - (b) falso
10. El consumo de una puerta CMOS se produce básicamente en condiciones estáticas
 - (a) verdadero
 - (b) falso
11. La velocidad de una puerta CMOS depende de las capacidades parásitas entre sus terminales
 - (a) verdadero
 - (b) falso
12. La potencia disipada en una puerta CMOS depende de la frecuencia de comutación
 - (a) verdadero
 - (b) falso
13. Si un MOSFET está en la zona de saturación se comporta como
 - (a) una fuente de corriente
 - (b) un circuito abierto
 - (c) Una resistencia
 - (d) Ninguna de las anteriores
14. Si un MOSFET está en la zona de corte se comporta como
 - (a) una fuente de corriente
 - (b) un circuito abierto
 - (c) Una resistencia
 - (d) Ninguna de las anteriores
15. Si un MOSFET está en la zona lineal se comporta como
 - (a) una fuente de corriente
 - (b) un circuito abierto
 - (c) Una resistencia
 - (d) Ninguna de las anteriores

16. Si un MOSFET canal N está en la zona de corte su tensión VGS

- (a) Supera la tensión umbral VT
- (b) No supera la tensión umbral VT
- (c) Es igual a VDS
- (d) Ninguna de las anteriores

17. Un MOSFET tiene un diodo parásito entre drenador y fuente

- (a) verdadero
- (b) falso

18. Los terminales de drenado y fuente son intercambiables en un MOSFET

- (a) verdadero
- (b) falso

19, ¿A qué se refiere la inversión del canal en un MOSFET de canal N?

- (a) Se polariza en inversa los terminales drenado fuente
- (b) Se invierte el sentido de la corriente por el MOSFET
- (c) Se crea una zona N bajo el óxido de puerta cuando VGS supera un valor
- (d) Ninguna de las anteriores

20. El transistor MOSFET es poco sensible a descargas electrostáticas

- (a) verdadero
- (b) falso

PREGUNTAS DE REPASO SOLUCIONES

Universidad de Oviedo

1. En un transistor MOSFET de canal N
 - (a) El sustrato es N
 - (b) **El sustrato es P**
2. En un transistor MOSFET de canal P
 - (a) **El sustrato es N**
 - (b) El sustrato es P
3. El control de un MOSFET se realiza por
 - (a) Tensión VDS
 - (b) Tensión VGD
 - (c) **Tensión VGS**
 - (d) Ninguna de las anteriores
4. Un MOSFET de Canal N
 - (a) **Se dice que conduce ceros**
 - (b) Se dice que conduce unos
 - (c) Ninguna de las anteriores
5. Un MOSFET de Canal P
 - (a) Se dice que conduce ceros
 - (b) **Se dice que conduce unos**
 - (c) Ninguna de las anteriores
6. En un MOSFET el terminal de sustrato suele unirse al drenador
 - (a) verdadero
 - (b) **falso**
7. La conducción en un MOSFET es de tipo bipolar (electrones y huecos)
 - (a) verdadero
 - (b) **falso**
8. El óxido de puerta del MOSFET es muy estrecho:
 - (a) **verdadero**
 - (b) falso
9. La corriente de puerta del MOSFET es despreciable en condiciones estáticas
 - (a) **verdadero**
 - (b) falso
10. El consumo de una puerta CMOS se produce básicamente en condiciones estáticas
 - (a) verdadero
 - (b) **falso**
11. La velocidad de una puerta CMOS depende de las capacidades parásitas entre sus terminales
 - (a) **verdadero**
 - (b) falso
12. La potencia disipada en una puerta CMOS depende de la frecuencia de comutación
 - (a) **verdadero**
 - (b) falso
13. Si un MOSFET está en la zona de saturación se comporta como
 - (a) **una fuente de corriente**
 - (b) un circuito abierto
 - (c) Una resistencia
 - (d) Ninguna de las anteriores
14. Si un MOSFET está en la zona de corte se comporta como
 - (a) una fuente de corriente
 - (b) **un circuito abierto**
 - (c) Una resistencia
 - (d) Ninguna de las anteriores
15. Si un MOSFET está en la zona lineal se comporta como
 - (a) una fuente de corriente
 - (b) un circuito abierto
 - (c) **Una resistencia**
 - (d) Ninguna de las anteriores

16. Si un MOSFET canal N está en la zona de corte su tensión VGS

- (a) Supera la tensión umbral VT
- (b) No supera la tensión umbral VT
- (c) Es igual a VDS
- (d) Ninguna de las anteriores

17. Un MOSFET tiene un diodo parásito entre drenador y fuente

- (a) verdadero
- (b) falso

18. Los terminales de drenado y fuente son intercambiables en un MOSFET

- (a) verdadero
- (b) falso

19, ¿A qué se refiere la inversión del canal en un MOSFET de canal N?

- (a) Se polariza en inversa los terminales drenado fuente
- (b) Se invierte el sentido de la corriente por el MOSFET
- (c) Se crea una zona N bajo el óxido de puerta cuando VGS supera un valor
- (d) Ninguna de las anteriores

20. El transistor MOSFET es poco sensible a descargas electrostáticas

- (a) verdadero
- (b) falso