

## TRANSISTORES DE EFECTO CAMPO (FET) (Versión reducida: Sólo MOSFET de enriquecimiento)

El funcionamiento básico de los transistores de efecto campo, consiste en que la tensión aplicada al terminal de puerta G ("gate") produce un campo eléctrico, cuyo efecto sobre el dispositivo, es aumentar (hacer más conductivo) o reducir (hacer menos conductivo) un canal que une los terminales de fuente S ("source") y drenador D ("drain"). El campo eléctrico puede llegar a cerrar totalmente el canal.

La tensión puerta-fuente (G-S) regula el ancho del canal en la fuente. La tensión puerta-drenador (G-D) controla el ancho del canal en el drenador. Según sean estas diferencias de potencial, un transistor de efecto campo puede trabajar en tres estados:

**Corte:** No existe canal entre el terminal de fuente (S) y el de drenador (D). El canal está cerrado en S y en D. No hay corriente entre S y D.

**Lineal u Ohmica:** Existe un canal que une los terminales de fuente (S) y drenador (D). El canal está abierto en los dos lados. El FET se comporta (con pequeñas polarizaciones drenador-fuente) como una resistencia (controlada por la tensión puerta-fuente).

**Saturación:** Hay canal abierto en el lado de la fuente, pero la polarización en el lado del drenador cierra el canal en el drenador. La corriente entre S y D depende sólo de la polarización de puerta-fuente; no depende de la diferencia de potencial entre D y S (en realidad aumenta un poco con la diferencia de potencial entre D y S). El FET se comporta como una fuente de corriente controlada por la polarización de puerta-fuente.

Si el canal se prepara para que la corriente eléctrica sea llevada por electrones, se dice que es de canal N. Si es llevada por huecos, se dice que es de canal P.

En un FET de **canal N**, los electrones viajan desde el terminal fuente al drenador (de S a D). Por tanto, la corriente siempre fluye de D a S, lo que implica que  $I_{DS}$  sea siempre mayor que cero ( $I_{DS} > 0$ ). Se puede dar el caso de que no haya corriente, por eso, la condición más general es que  $I_{DS} \geq 0$ . Para que los electrones se muevan desde la fuente al drenador, se debe tener en D una tensión ( $V_D$ ) mayor que en la fuente ( $V_S$ ), por tanto,  $V_{DS} > 0$  ( $V_{DS} = V_D - V_S$ ). Se puede tener el caso de  $V_D = V_S$ , por eso, la condición más general es que  $V_{DS} \geq 0$ .

En un FET de **canal P**, los huecos viajan desde el terminal fuente al drenador (de S a D). Por tanto, la corriente siempre fluye de S a D, lo que implica que  $I_{SD}$  sea siempre mayor que cero ( $I_{SD} > 0$ ). Se puede dar el caso de que no haya corriente, por eso, la condición más general es que  $I_{SD} \geq 0$ . Para que los huecos se muevan desde la fuente al drenador, se debe tener en D una tensión ( $V_D$ ) menor que en la fuente ( $V_S$ ), por tanto,  $V_{SD} > 0$  ( $V_{SD} = V_S - V_D$ ). Se puede tener el caso de  $V_S = V_D$ , por eso, la condición más general es que  $V_{SD} \geq 0$ .

En todos los transistores FET, la corriente que entra por la puerta es (casi) cero ( $I_G = 0$ ). Si la corriente no es cero, puede ser que el dispositivo se esté operando incorrectamente o esté estropeado.

### Tipos de transistores de efecto campo:

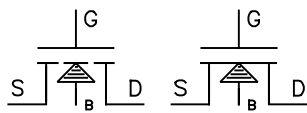
**JFET** Fet de unión ("Junction"). La unión PN se polariza en inverso, con lo cual se controla el ancho de la zona de carga espacial, y por tanto se puede controlar el ancho del canal entre S y D.

**MESFET** (MES=MEtal Semiconductor). Es como un JFET, salvo que la unión que regula el ancho del canal, no es una unión PN, sino una unión metal-semiconductor rectificadora (o unión Schottky). Aunque pueden fabricarse en Silicio, suele emplearse Arseniuro de Galio (buscando la alta movilidad de los electrones en GaAs) u otros semiconductores compuestos.

**MOSFET de enriquecimiento** (también llamados de acumulación). La tensión de puerta aplicada a la estructura MOS (Metal Oxido Semiconductor) puede crear un canal que una los terminales S y D. También puede regular la conductividad de ese canal.

**MOSFET de empobrecimiento** (también llamados de depleción). En estos MOSFET, en ausencia de tensión de puerta aplicada, existe ya un canal que une los terminales de S y D. El control de la tensión de puerta puede aumentar o reducir la conductividad de ese canal.

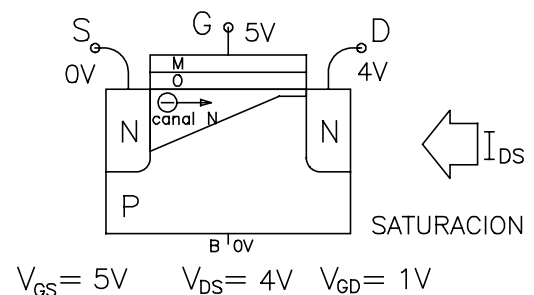
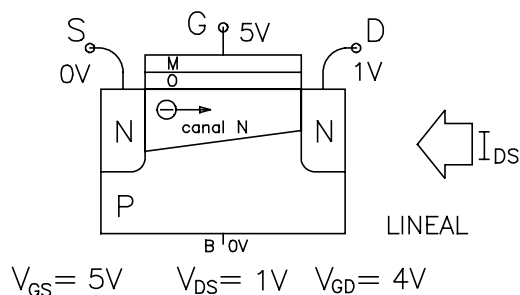
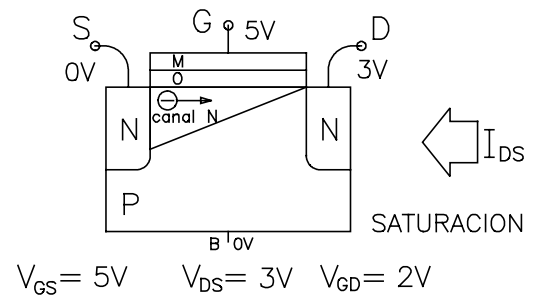
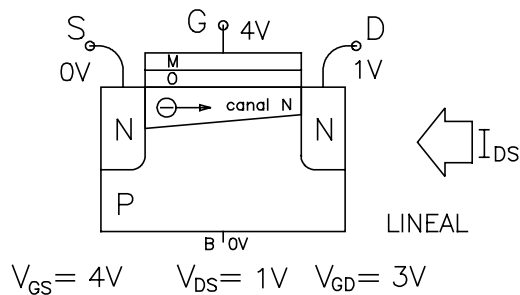
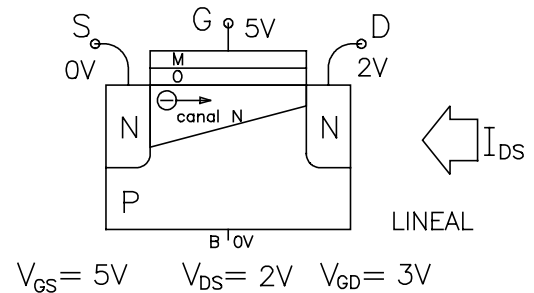
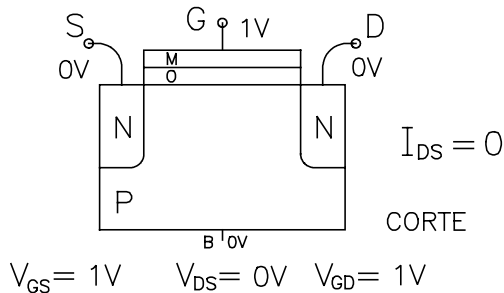
## MOSFET enriquecimiento canal N



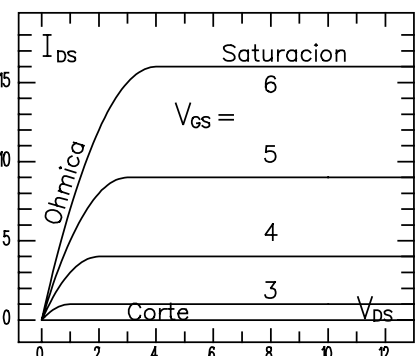
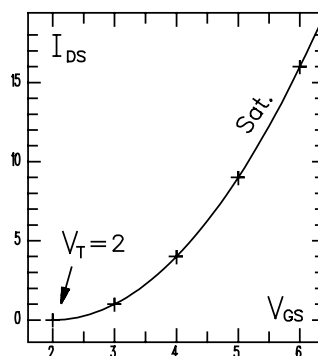
En ausencia de polarización, o con polarización de puerta ( $V_{GS}$ ) menor que la tensión umbral ( $V_T$ ) no hay canal N que una los terminales de fuente y drenador (MOSFET en corte). Se necesita  $V_{GS}$  mayor de  $V_T$  para que aparezca un canal, que será más conductivo, cuanto mayor sea la polarización de puerta ( $V_{GS}$ ). Para que además haya canal abierto en el

drenador (MOSFET en lineal) se necesita que la tensión  $V_{GD}=V_{GS}-V_{DS}$  aplicada a la unión MOS en el lado del drenador sea mayor que  $V_T$ . Si  $V_{GD}$  fuera menor que  $V_T$ , el canal estaría cerrado en D, y por tanto, el MOSFET estaría en saturación.

En las figuras se muestra un MOSFET de canal N, con diversas polarizaciones, y el estado del canal. La tensión umbral es  $V_T = 2 \text{ V}$ .



Se muestra la relación parabólica entre  $I_{DS}$  y  $V_{GS}$  para un MOSFET-N en Saturación. Se ve, como la corriente es mayor de cero para  $V_{GS} > V_T = 2\text{V}$ . En la otra gráfica ( $I_{DS}-V_{DS}$ ) se ve que en Saturación,  $I_{DS}$  es constante (sólo depende de  $V_{GS}$ ), y que en zona Lineal u Ohmica, se tiene una dependencia parabólica, que puede ser considerada lineal a bajos valores de  $V_{DS}$ .



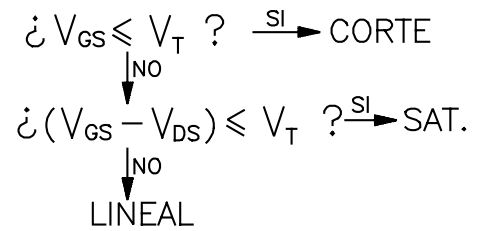
SIEMPRE:  
 $I_G=0$   $V_{DS} \geq 0$   $I_{DS} \geq 0$   
 NORMALMENTE:  
 $V_{GS} \geq 0$

A la derecha se tiene el diagrama de decisiones para saber el estado de un MOSFET de canal N. Abajo se tienen las ecuaciones para los distintos estados.

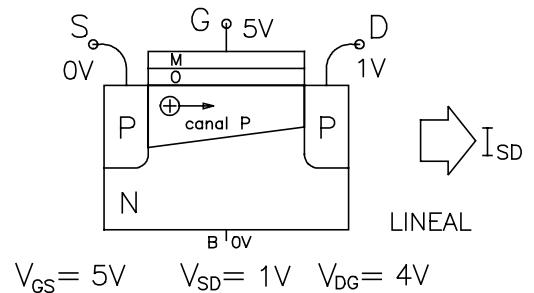
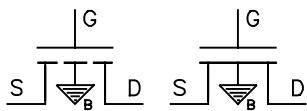
Corte:  $I_{DS} = 0$

Lineal u Ohmica:  $I_{DS} = k \{ 2 [V_{GS} - V_T] V_{DS} - V_{DS}^2 \}$

Saturación:  $I_{DS} = K \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_T} \right)^2$  o bien:  $I_{DS} = k [V_{GS} - V_T]^2$



## MOSFET enriquecimiento canal P



En el MOSFET de canal P, se han intercambiado los tipos de semiconductor (N por P y viceversa). Esto conlleva que todas las polarizaciones cambien de signo, por lo que los subíndices se invierten de orden (GS por SG, DS por SD). Las curvas del dispositivo son iguales a las del MOSFET de canal N, salvo el cambio de los subíndices indicado.

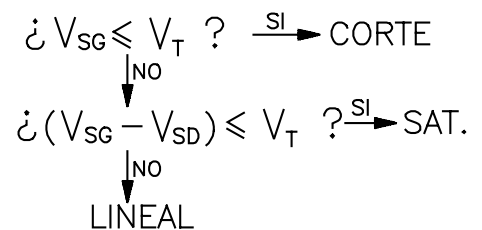
SIEMPRE:  
 $I_G=0$   $V_{SD} \geq 0$   $I_{SD} \geq 0$   
 NORMALMENTE:  
 $V_{SG} \geq 0$

A la derecha se tiene el diagrama de decisiones para saber el estado de un MOSFET de canal P. Abajo se tienen las ecuaciones para los distintos estados.

Corte:  $I_{SD} = 0$

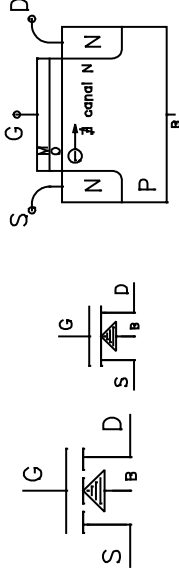
Lineal u Ohmica:  $I_{SD} = k \{ 2 [V_{SG} - V_T] V_{SD} - V_{SD}^2 \}$

Saturación:  $I_{SD} = K \left( 1 - \frac{V_{SG}}{V_T} \right)^2$  o bien:  $I_{SD} = k [V_{SG} - V_T]^2$

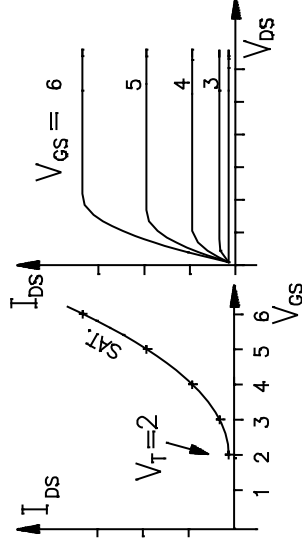


## MOSFET ENRIQUECIMIENTO

CANAL N



SIEMPRE:  
 $I_G = 0$   $V_{DS} \geq 0$   $I_{DS} \geq 0$   
 NORMALMENTE:  
 $V_{GS} \geq 0$

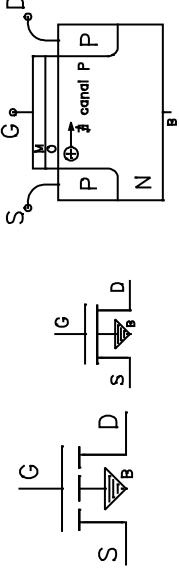


en SAT:  $I_{DS} = K \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_T} \right)^2$  ó  $I_{DS} = K (V_{GS} - V_T)^2$

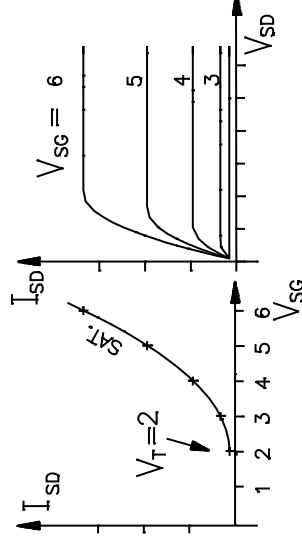
¿  $V_{GS} \leq V_T$  ?  $\xrightarrow{\text{SI}}$  CORTE  
 $\xrightarrow{\text{NO}}$   
 ¿  $(V_{GS} - V_{DS}) \leq V_T$  ?  $\xrightarrow{\text{SI}}$  SAT.  
 $\xrightarrow{\text{NO}}$  LINEAL

## MOSFET ENRIQUECIMIENTO

CANAL P



SIEMPRE:  
 $I_G = 0$   $V_{SD} \geq 0$   $I_{SD} \geq 0$   
 NORMALMENTE:  
 $V_{SG} \geq 0$



en SAT:  $I_{SD} = K \left( 1 - \frac{V_{SG}}{V_T} \right)^2$  ó  $I_{SD} = K (V_{SG} - V_T)^2$

¿  $V_{SG} \leq V_T$  ?  $\xrightarrow{\text{SI}}$  CORTE  
 $\xrightarrow{\text{NO}}$   
 ¿  $(V_{SG} - V_{SD}) \leq V_T$  ?  $\xrightarrow{\text{SI}}$  SAT.  
 $\xrightarrow{\text{NO}}$  LINEAL