

TRANSISTORES DE EFECTO CAMPO (FET)

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:

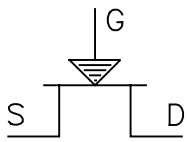
JFET Fet de unión ("Junction"). La unión PN se polariza en inverso, con lo cual se controla el ancho de la zona de carga espacial, y por tanto se puede controlar el ancho del canal entre S y D.

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.

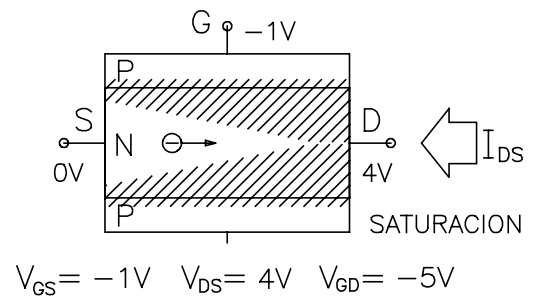
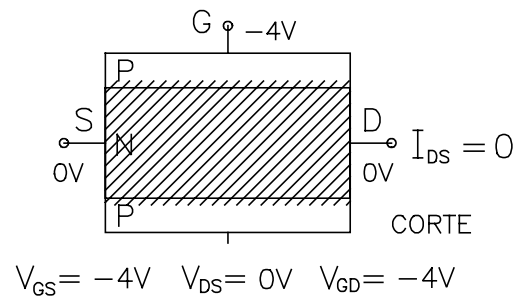
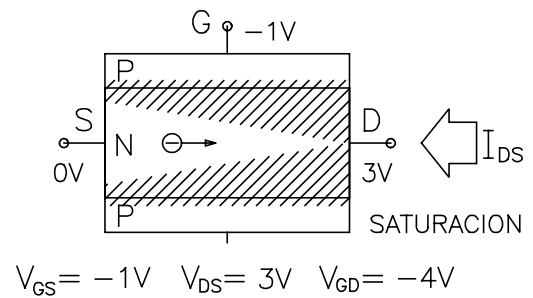
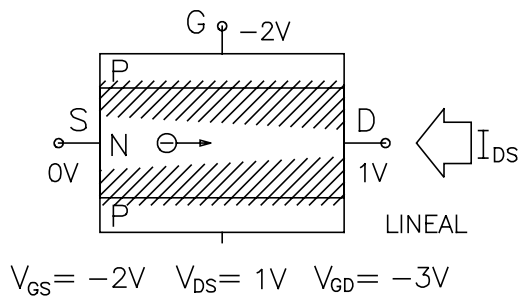
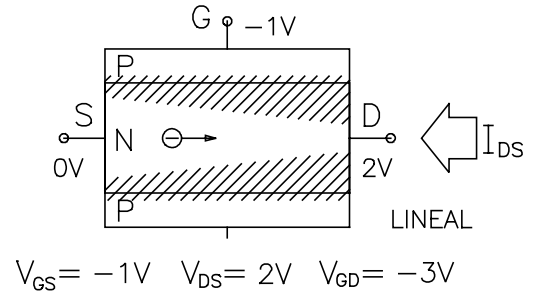
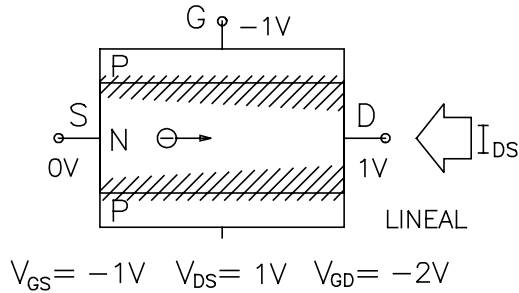
MOSFET de empobrecimiento (también llamados de depleción). En estos MOSFET, en ausencia de tensión de puerta aplicada, existe ya un canal que une los terminales de S y D. El control de la tensión de puerta puede aumentar o reducir la conductividad de ese canal.

JFET canal N

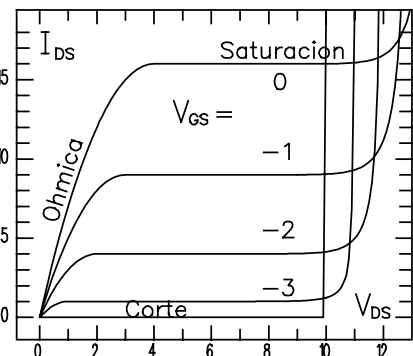
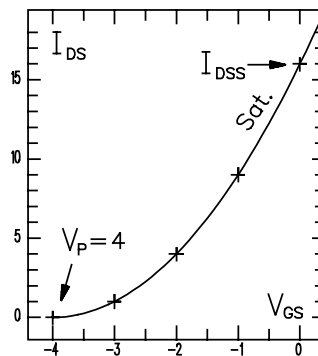


La unión PN de la unión puerta-fuente se polariza en inverso ($V_{GS} \leq 0$). Cuanto más negativo sea el valor de V_{GS} , mayor será el ancho de la zona de carga espacial (zona rayada), y por tanto, el ancho del canal se reduce. Si la V_{GS} fuese más negativa que la tensión $-V_P$ (tensión de estrangulación) la zona de carga espacial se haría tan ancha que cerraría completamente el canal (JFET en corte). Si V_{GS} es mayor que $-V_P$, hay canal abierto en S. Para que además haya canal abierto en el drenador (FET en lineal) se necesita que la tensión $V_{GD} = V_{GS} - V_{DS}$ aplicada a la unión PN en el lado del drenador sea mayor que $-V_P$. Si V_{GD} fuera menor que $-V_P$, el canal estaría cerrado en D, y por tanto, el JFET estaría en saturación.

En las figuras se muestra un JFET de canal N, con diversas polarizaciones, y el estado del canal. La tensión umbral es $-V_P = -4$ V.

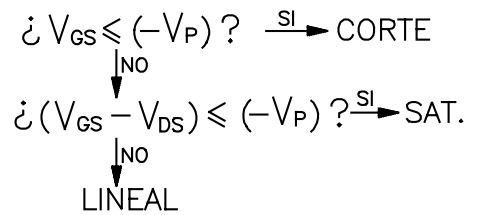


Se muestra la relación parabólica entre I_{DS} y V_{GS} para un JFET-N en Saturación. Se ve, cómo la corriente es mayor de cero para $V_{GS} > -V_P = -4V$. Todas las polarizaciones V_{GS} son inversas. En la otra gráfica ($I_{DS} - V_{DS}$) se ve que en Saturación, I_{DS} es constante (sólo depende de 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:
 $V_{DS} \geq 0 \quad I_{DS} \geq 0$
 NORMALMENTE:
 $V_{GS} \leq 0 \quad I_G = 0$

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

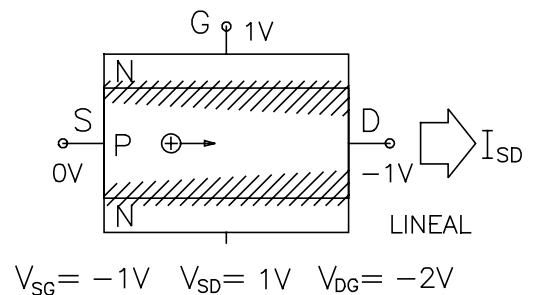
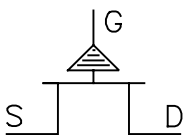


Corte: $I_{DS} = 0$

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

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

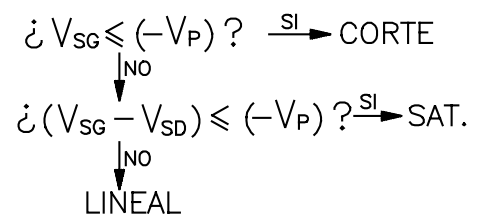
JFET canal P



En el JFET 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 JFET de canal N, salvo el cambio de los subíndices indicado.

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

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

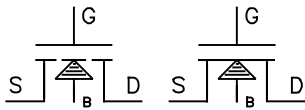


Corte: $I_{SD} = 0$

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

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

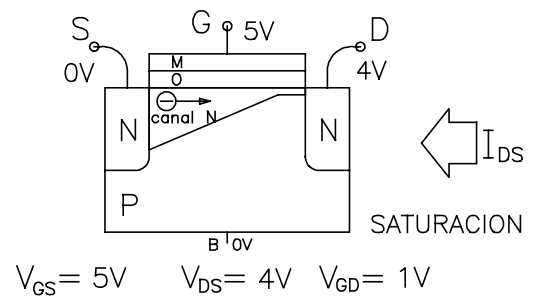
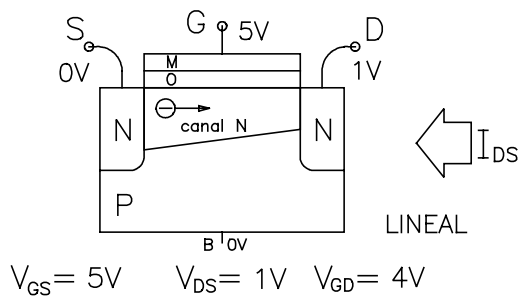
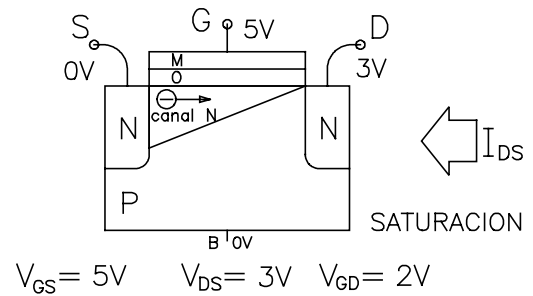
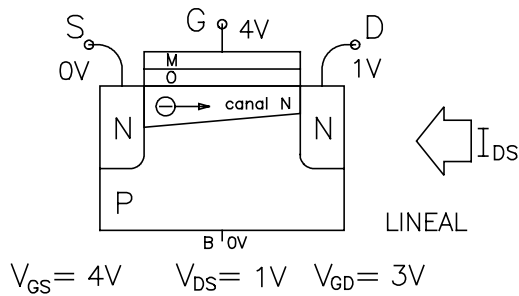
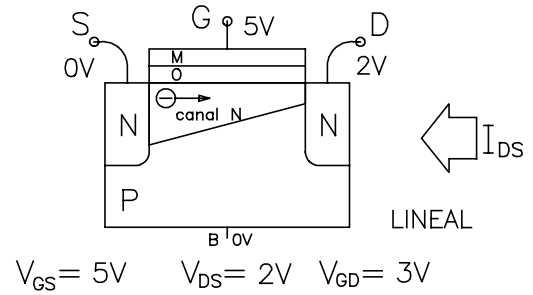
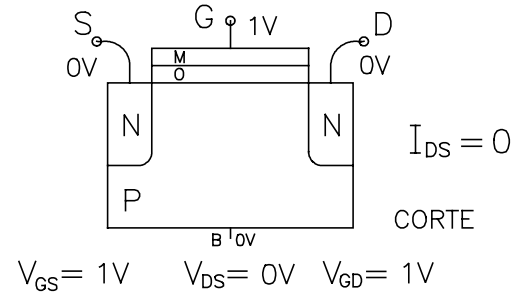
MOSFET enriquecimiento canal N



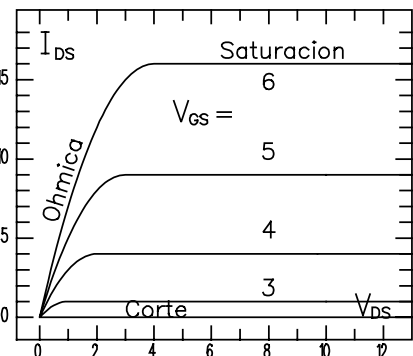
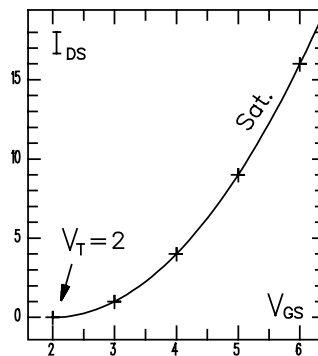
En ausencia de polarización, o con polarización de puerta (V_{GS}) menor que la tensión umbral (V_T) no hay canal N que una los terminales de fuente y drenador (MOSFET en corte). Se necesita V_{GS} mayor de V_T para que aparezca un canal, que será más conductivo, cuanto mayor sea la polarización de puerta (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 $V_T = 2$ V.

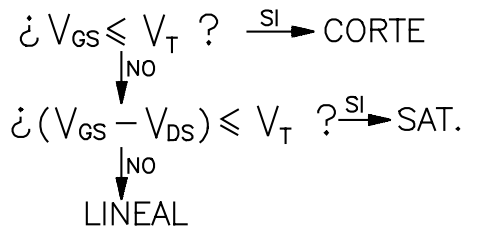


Se muestra la relación parabólica entre I_{DS} y V_{GS} para un MOSFET-N en Saturación. Se ve, cómo la corriente es mayor de cero para $V_{GS} > V_T = 2V$. En la otra gráfica ($I_{DS}-V_{DS}$) se ve que en Saturación, I_{DS} es constante (sólo depende de V_{GS}), y que en zona Lineal u Ohmica, se tiene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



SIEMPRE:
 $I_G=0 \quad V_{DS} \geq 0 \quad I_{DS} \geq 0$
 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.

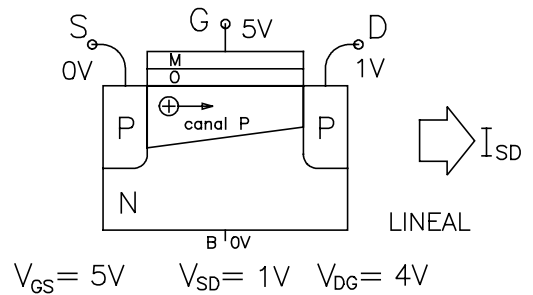
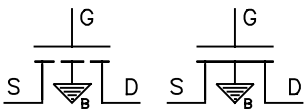


Corte: $I_{DS} = 0$

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

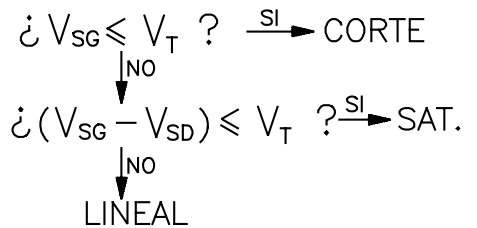
MOSFET enriquecimiento canal P



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:
 $I_G=0 \quad V_{SD} \geq 0 \quad I_{SD} \geq 0$
 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 empobrecimiento canal N

El MOSFET de empobrecimiento es como el de enriquecimiento, salvo que la tensión umbral (V_T) es negativa, lo que provoca que en ausencia de polarización, o con polarización de puerta (V_{GS}) mayor que la tensión umbral ($-V_T$) haya un canal N que una los terminales de fuente y drenador.

Se tiene por tanto la libertad de aumentar la conductividad del canal (aumentando V_{GS} por encima de 0 V) o reducir la conductividad del canal (disminuyendo V_{GS} por debajo de 0 V) (en realidad es un inconveniente, pues se deben usar fuentes de tensión positivas y negativas). Para eliminar el canal hay que hacer V_{GS} más negativa que $-V_T$. El canal en el drenador estará abierto (zona lineal u óhmica) para $V_{GD}=V_{GS}-V_{DS}$ mayores que $-V_T$.

Las curvas de $I_{DS}-V_{GS}$ en saturación, y de $I_{DS}-V_{DS}$ son similares a las de un MOSFET de enriquecimiento, salvo que la tensión umbral es ahora negativa (tensión umbral $-V_T=-2V$).

SIEMPRE:

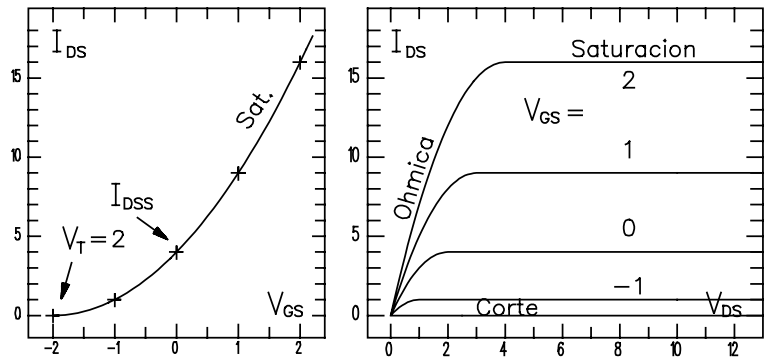
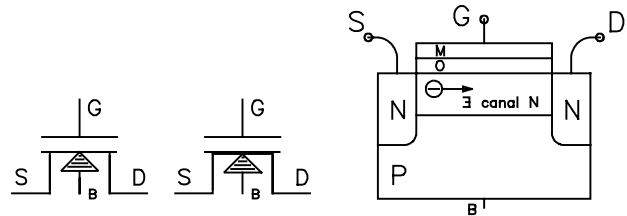
$$I_G=0 \quad V_{DS} \geq 0 \quad I_{DS} \geq 0$$

A la derecha se tiene el diagrama de decisiones para saber el estado del MOSFET, y abajo se tienen las ecuaciones.

Corte: $I_{DS} = 0$

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

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



$\dot{?} V_{GS} \leq (-V_T) ? \xrightarrow{SI} \text{CORTE}$

$\downarrow \text{NO}$
 $\dot{?} (V_{GS} - V_{DS}) \leq (-V_T) ? \xrightarrow{SI} \text{SAT.}$

$\downarrow \text{NO}$
LINEAL

MOSFET empobrecimiento canal P

Para un MOSFET de empobrecimiento de canal P sólo habría que cambiar GS por SG y DS por SD.

SIEMPRE:

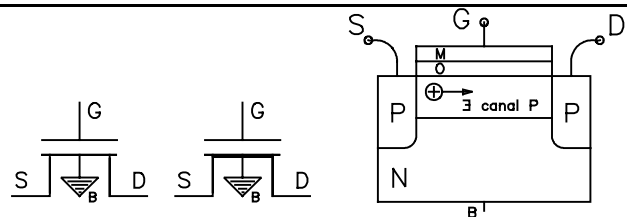
$$I_G=0 \quad V_{SD} \geq 0 \quad I_{SD} \geq 0$$

A la derecha se tiene el diagrama de decisiones para saber el estado del MOSFET, y abajo se tienen las ecuaciones.

Corte: $I_{SD} = 0$

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

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

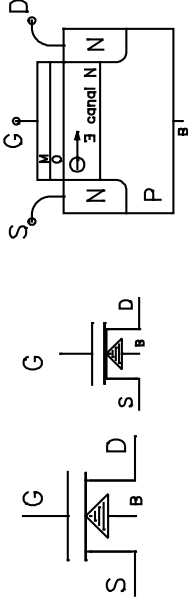
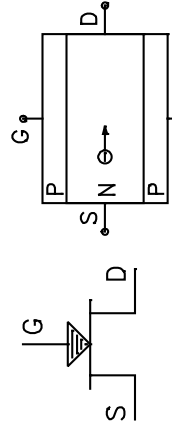


$\dot{?} V_{SG} \leq (-V_T) ? \xrightarrow{SI} \text{CORTE}$

$\downarrow \text{NO}$
 $\dot{?} (V_{SG} - V_{SD}) \leq (-V_T) ? \xrightarrow{SI} \text{SAT.}$

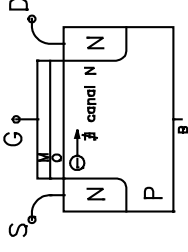
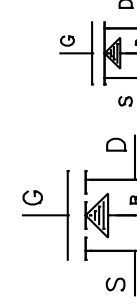
$\downarrow \text{NO}$
LINEAL

JFET



MOSFET EMPOBRECIMIENTO

MOSFET ENRIQUECIMIENTO

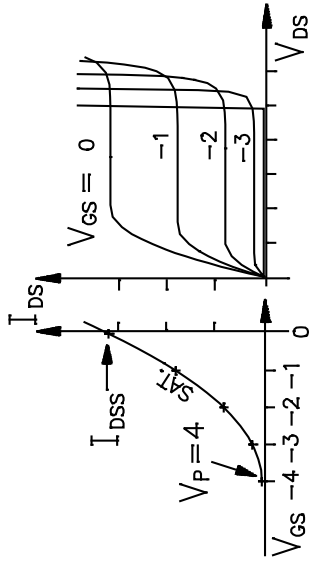


SIEMPRE:

$$V_{DS} \geq 0 \quad I_{DS} \geq 0$$

NORMALMENTE:

$$V_{GS} \leq 0 \quad I_G = 0$$



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

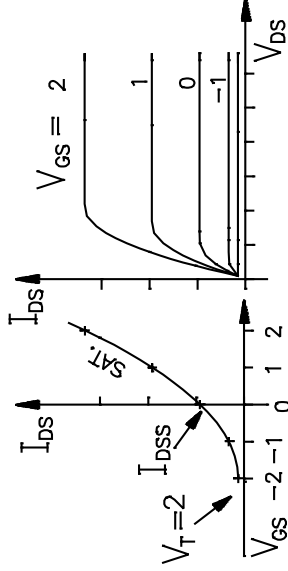
¿ $V_{GS} \leq (-V_P)$? \xrightarrow{SI} CORTE

¿ $(V_{GS} - V_{DS}) \leq (-V_P)$? \xrightarrow{SI} SAT.

NO
LINEAL

SIEMPRE:

$$I_G = 0 \quad V_{DS} \geq 0 \quad I_{DS} \geq 0$$



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

¿ $V_{GS} \leq (-V_T)$? \xrightarrow{SI} CORTE

¿ $(V_{GS} - V_{DS}) \leq (-V_T)$? \xrightarrow{SI} SAT.

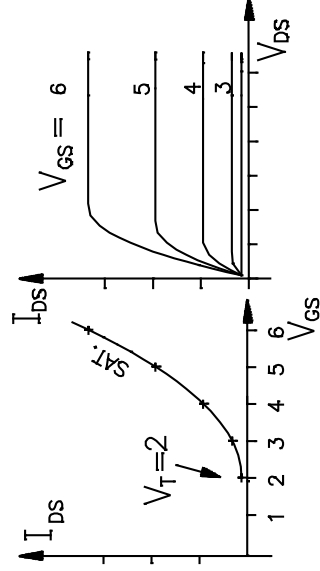
NO
LINEAL

SIEMPRE:

$$I_G = 0 \quad V_{DS} \geq 0 \quad I_{DS} \geq 0$$

NORMALMENTE:

$$V_{GS} \geq 0$$



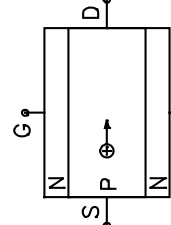
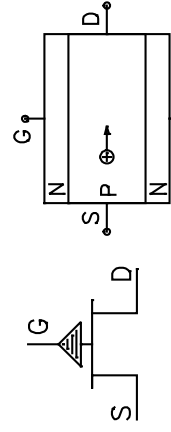
en SAT:
$$I_{DS} = K \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_T} \right)^2 \quad \sigma \quad I_{DS} = k (V_{GS} - V_T)^2$$

¿ $V_{GS} \leq V_T$? \xrightarrow{SI} CORTE

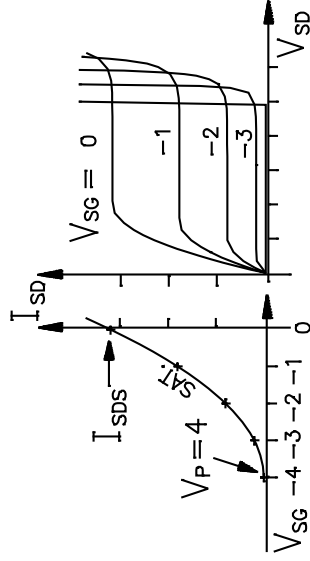
¿ $(V_{GS} - V_{DS}) \leq V_T$? \xrightarrow{SI} SAT.

NO
LINEAL

JFET



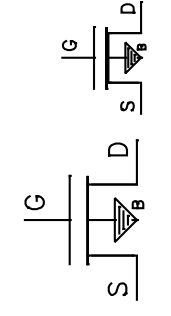
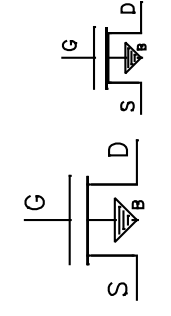
SIEMPRE: $V_{sd} \geq 0 \quad I_{sd} \geq 0$
 NORMALMENTE: $V_{sg} \leq 0 \quad I_g = 0$



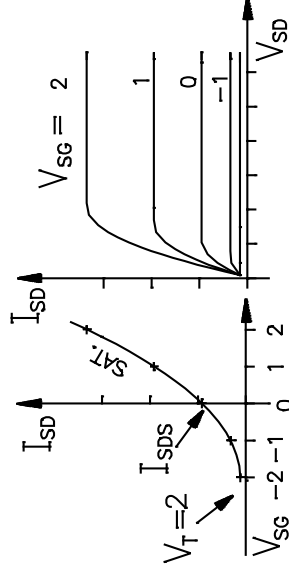
en SAT: $I_{sd} = I_{sds} \left(1 - \frac{V_{sg}}{(-V_P)} \right)^2$

¿ $V_{sg} \leq (-V_P)$? $\xrightarrow{\text{NO}}$ CORTE
 ¿ $(V_{sg} - V_{sd}) \leq (-V_P)$? $\xrightarrow{\text{SI}}$ SAT.
 LINEAL

MOSFET EMPOBRECIMIENTO



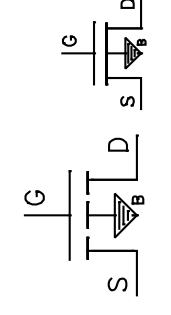
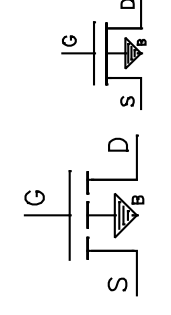
SIEMPRE: $I_g = 0 \quad V_{sd} \geq 0 \quad I_{sd} \geq 0$



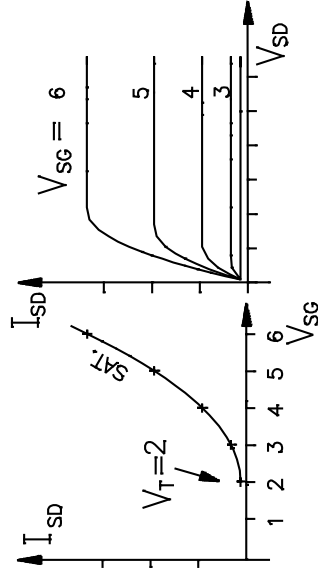
en SAT: $I_{sd} = I_{sds} \left(1 - \frac{V_{sg}}{(-V_T)} \right)^2$

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

MOSFET ENRIQUECIMIENTO



SIEMPRE: $I_g = 0 \quad V_{sd} \geq 0 \quad I_{sd} \geq 0$
 NORMALMENTE: $V_{sg} \geq 0$



en SAT: $I_{sd} = K \left(1 - \frac{V_{sg}}{V_T} \right)^2 \quad \text{o} \quad I_{sd} = k (V_{sg} - V_T)^2$

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