

Tema 5.

Transistor de Efecto Campo (FET)

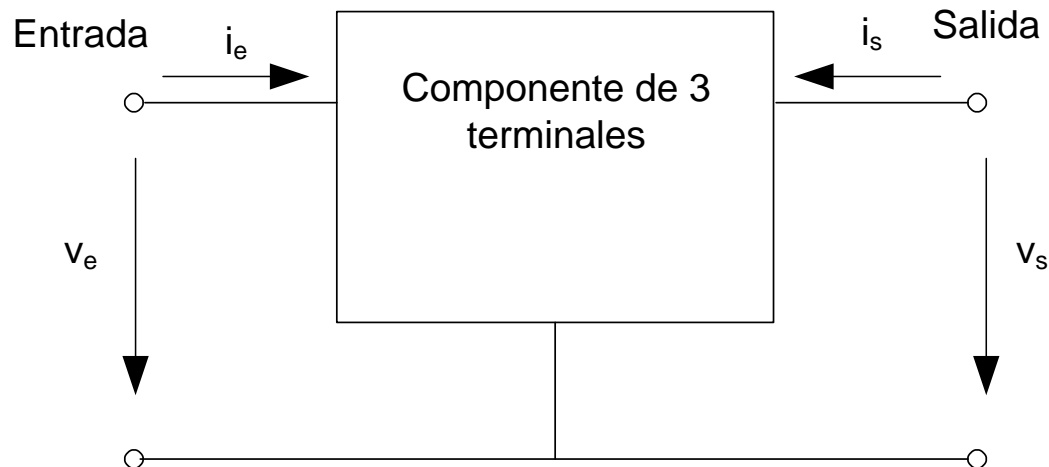
Joaquín Vaquero López

Transistor de Efecto Campo (FET): Índice

- 5.1) Introducción a los elementos de 3 terminales
- 5.2) Transistor de Efecto Campo FET (Field Effect Transistor): Estructura. Efecto Campo. Comparativa FET-BJT.
- 5.3) Zonas de funcionamiento. Modelos. Curvas características V-I. Polarización. Aplicaciones.
- 5.4) Transistor de Efecto Campo MOSFET (Metal Oxide Semiconductor FET): Estructura.
- 5.5) Zonas de funcionamiento. Curvas características V-I. Polarización. Modelos.
- 5.6) Configuraciones. Inversor. Seguidor de voltaje. Seguidor de corriente.
- 5.7) Aplicaciones. Transistor real.

Introducción a los elementos de 3 terminales

- ✓ Hasta ahora se han visto componentes de 2 terminales, con una curva característica V-I. Los componentes de 3 terminales tienen 3 pares de posibles curvas características V-I. Dos de ellas son suficientes para definir el componente.
- ✓ Esas dos curvas características son la **curva V-I de entrada** y la **curva V-I de salida**. La curva característica V-I de salida es un conjunto de curvas en función de uno de los parámetros de entrada.

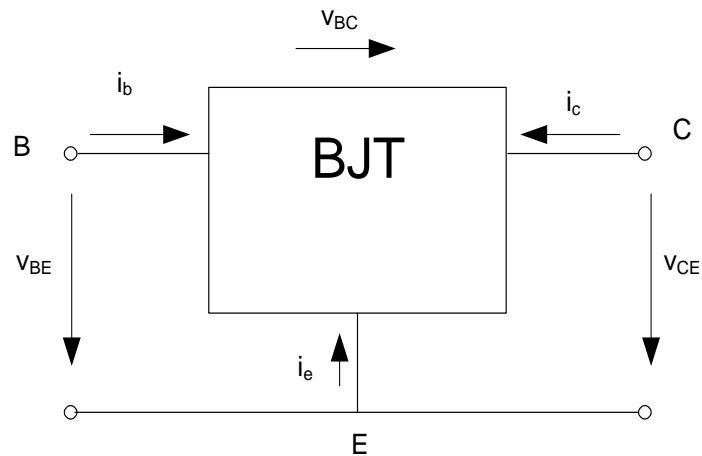


Introducción a los elementos de 3 terminales

Componentes de 3 terminales:

BJT: Fuente de corriente (salida)
controlada por corriente (entrada).
Ganancia de corriente.

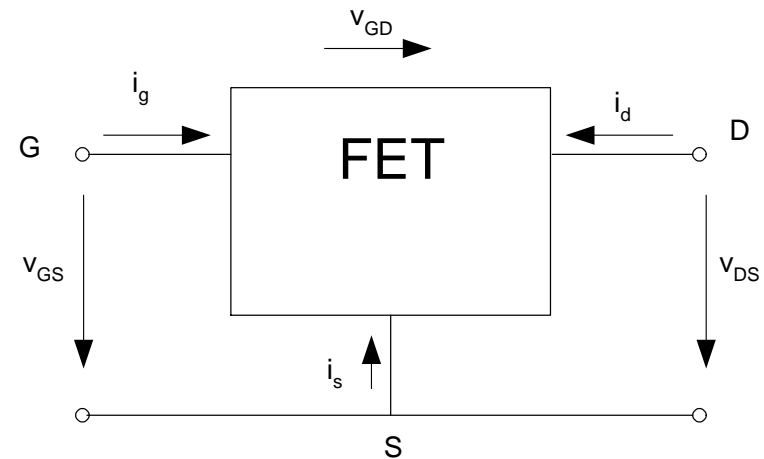
Terminales: Base, Emisor y Colector



J. Bardeen, W.H. Brattain, y W. Shockley, 1948

FET: Fuente de corriente (salida)
controlada por tensión (entrada).
Transconductancia (g_m).

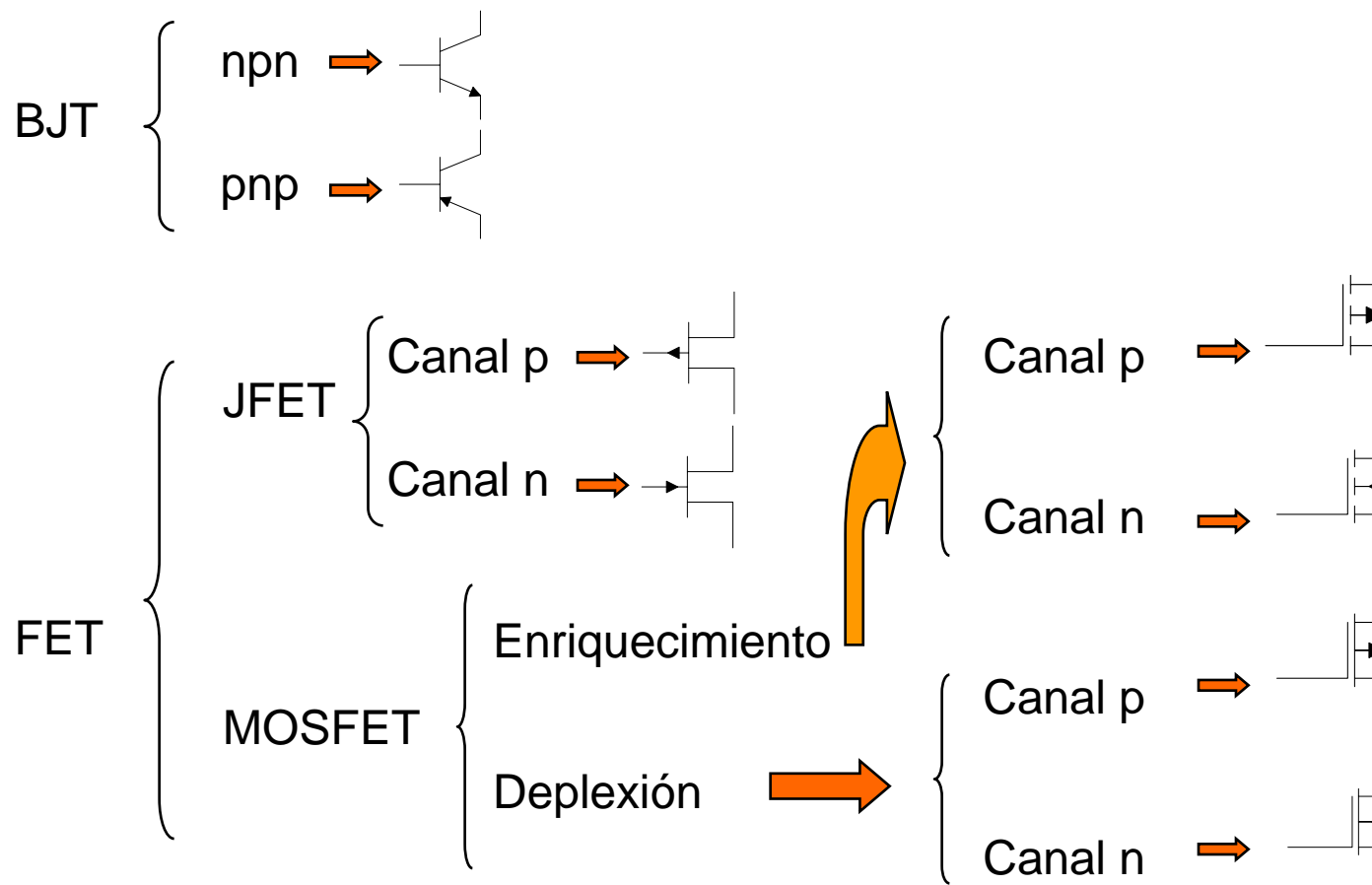
Terminales: Puerta, Drenador y Fuente



W. Shockley, 1952

Introducción a los elementos de 3 terminales

Clasificación de los componentes de 3 terminales.

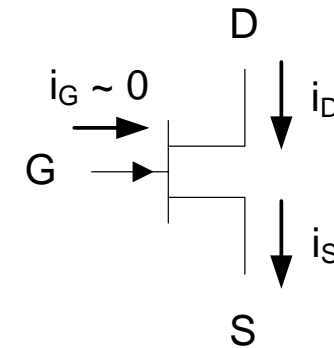
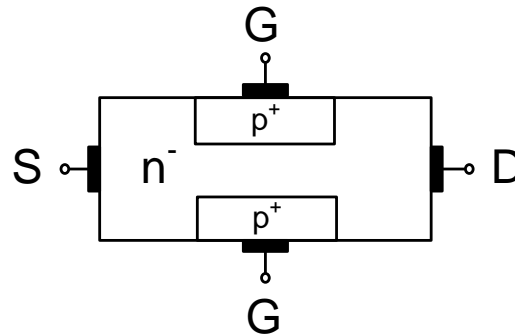


Transistor de efecto campo JFET

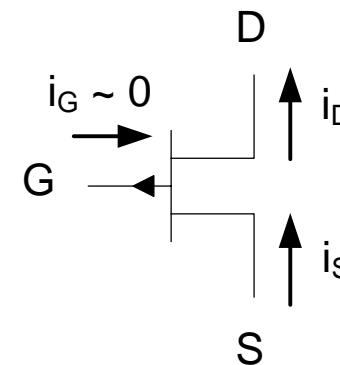
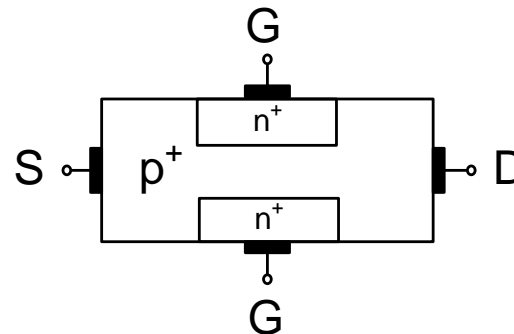
Estructura y símbolo del transistor. *Canal n* y *Canal p*

Terminales: Puerta, Drenador y Fuente. Componente simétrico.

Canal n



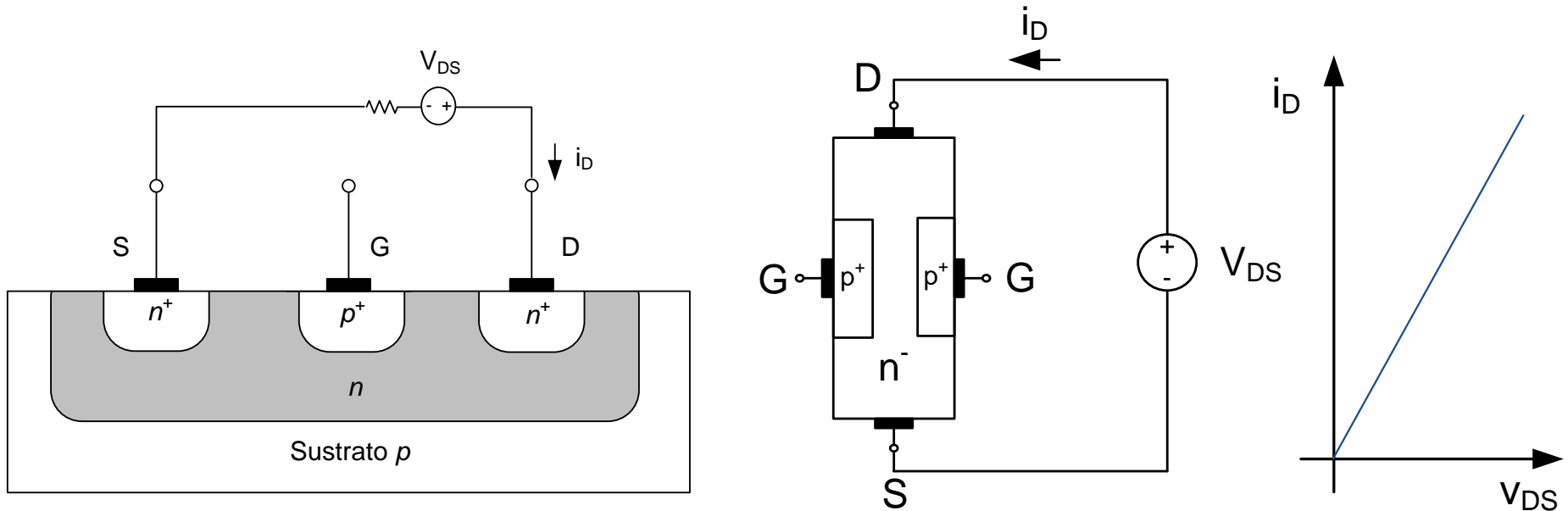
Canal p



Transistor de efecto campo JFET

Efecto campo. *Canal n*

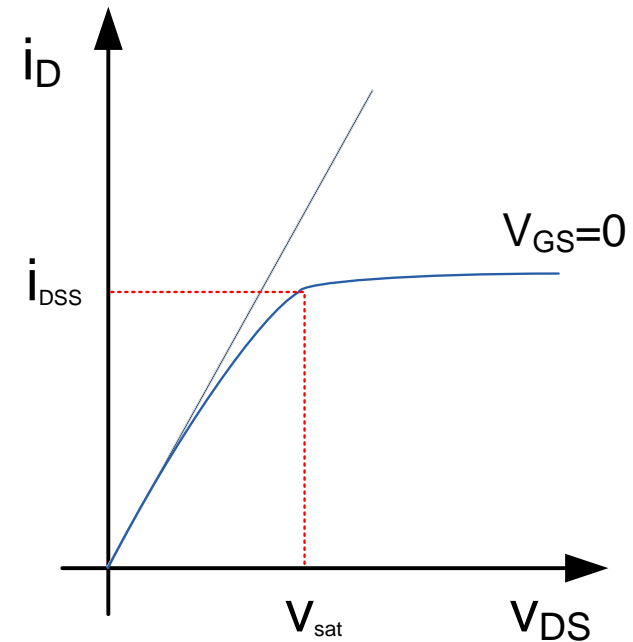
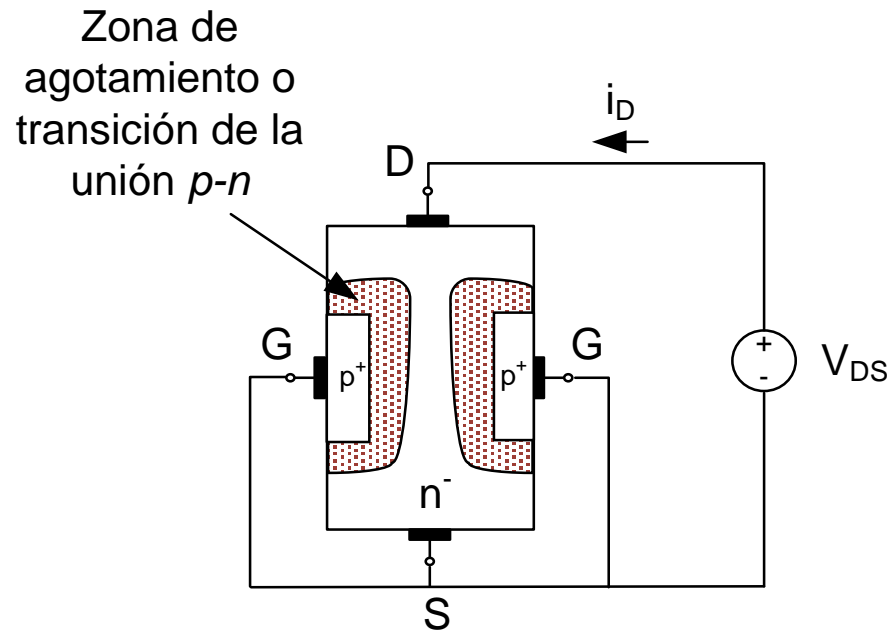
✓ Tensión V_{DS} y V_{GS} al aire: i_D proporcional a V_{DS} . Máxima i_D determinada por la sección del canal n . Resistencia.



Transistor de efecto campo JFET

Efecto campo. *Canal n*

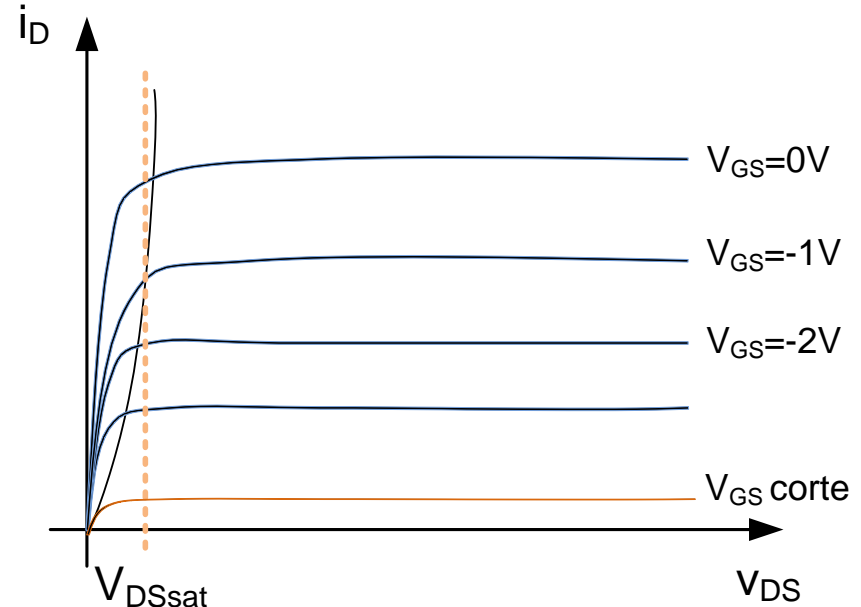
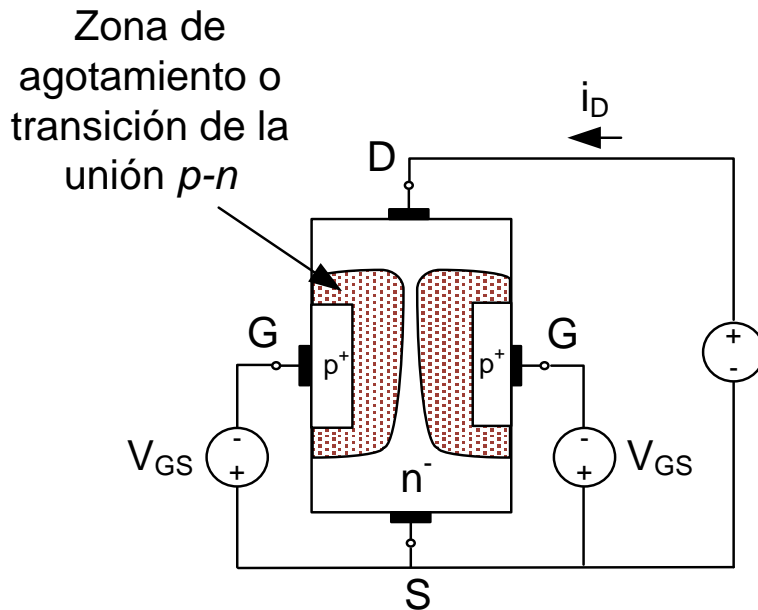
✓ Tensión V_{DS} y V_{GS} cortocircuitado: Polarización p-n inversa. Aparece zona de transición o agotamiento. Se estrecha el canal de conducción. i_D proporcional a V_{DS} hasta un valor máximo i_{DSS} (Corriente de drenaje de saturación). Comportamiento no lineal.



Transistor de efecto campo JFET

Efecto campo. *Canal n*

✓ Tensión V_{DS} y V_{GS} polarizado en inversa: Polarización p-n más inversa que $V_{GS}=0$. Zona de transición mayor. Canal de conducción más estrecho. i_D proporcional a V_{DS} hasta un valor máximo. Comportamiento no lineal.



Canal p: Igual funcionamiento pero cambiando el signo de V_{GS}

Transistor de efecto campo JFET

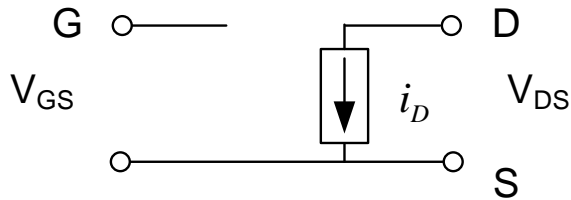
Comparativa JFET- BJT

- ✓ Sólo circulan portadores mayoritarios, es unipolar, no bipolar como el BJT
- ✓ Fabricación más sencilla y de menor tamaño. Fabricación de C.I.
- ✓ Funcionan como resistencia y amplificador. Facilidad de integración de C.I.
- ✓ Gran impedancia de entrada. Idealmente no consume corriente por la puerta.
- ✓ Es simétrico.
- ✓ Más estables con la T^a. Generan menos ruido.
- ✓ Mayor capacidad de manejar potencia.
- ✓ Almacenan carga. Posibilidad de utilización como unidades de memoria.
- ✓ Peor respuesta en frecuencia (alta capacidad).
- ✓ Sensibles a la ESD.
- ✓ Alguno presenta poca linealidad.

Transistor de efecto campo JFET

Zonas de funcionamiento

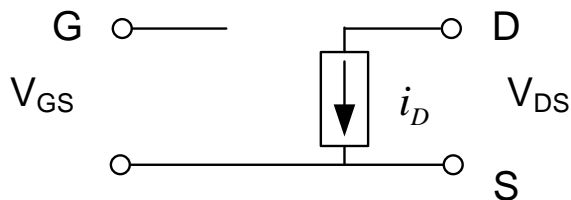
✓ **Zona Lineal:** Para una determinada tensión $V_{GS} > V_{TR}$ la i_D varía linealmente según se incrementa V_{DS} hasta una V_{sat} . $V_{sat} \sim V_{GS} - V_{TR}$



Si $V_{GS} > V_{TR}$ y $0 < V_{DS} < V_{sat} (\approx V_{GS} - V_{TR})$

$$i_D = k \cdot (2(V_{GS} - V_{TR})V_{DS} - V_{DS}^2); \quad k = \frac{i_{DSS}}{V_{TR}^2}$$

✓ **Zona de Saturación:** Para una determinada tensión $V_{GS} > V_{TR}$, si $V_{DS} > V_{sat}$ la i_D permanece constante aunque aumente V_{DS} .



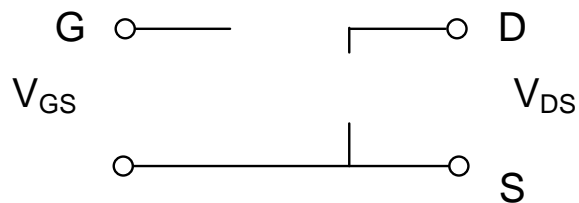
Si $V_{GS} > V_{TR}$ y $V_{DS} > V_{sat} (\approx V_{GS} - V_{TR})$

$$i_D = k \cdot (V_{GS} - V_{TR})^2; \quad k = \frac{i_{DSS}}{V_{TR}^2}$$

Transistor de efecto campo JFET

Zonas de funcionamiento

- ✓ **Zona de Corte:** Para una determinada tensión $V_{GS} < V_{TR}$ en canal está estrangulado y no circula la corriente i_D .



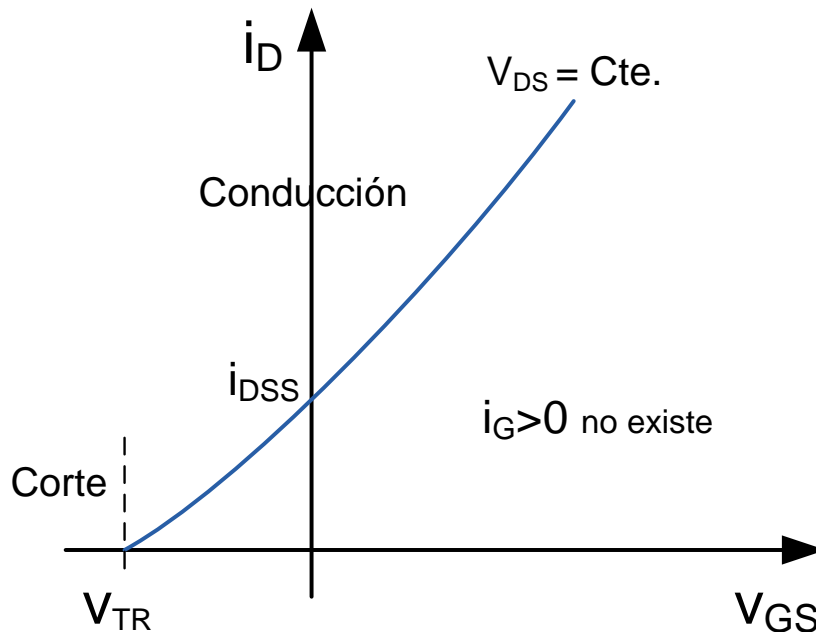
$$i_D = 0$$

- ✓ **Zona de ruptura:** Si estando en la zona de saturación se aumenta mucho V_{DS} se produce la ruptura del componente.
- ✓ **No hay Zona inversa:** El componente es simétrico.

Transistor de efecto campo JFET

Curvas características V-I. Canal n

Característica V-I de entrada



- La i_{DSS} es la corriente de drenaje de saturación

- En la zona de saturación:

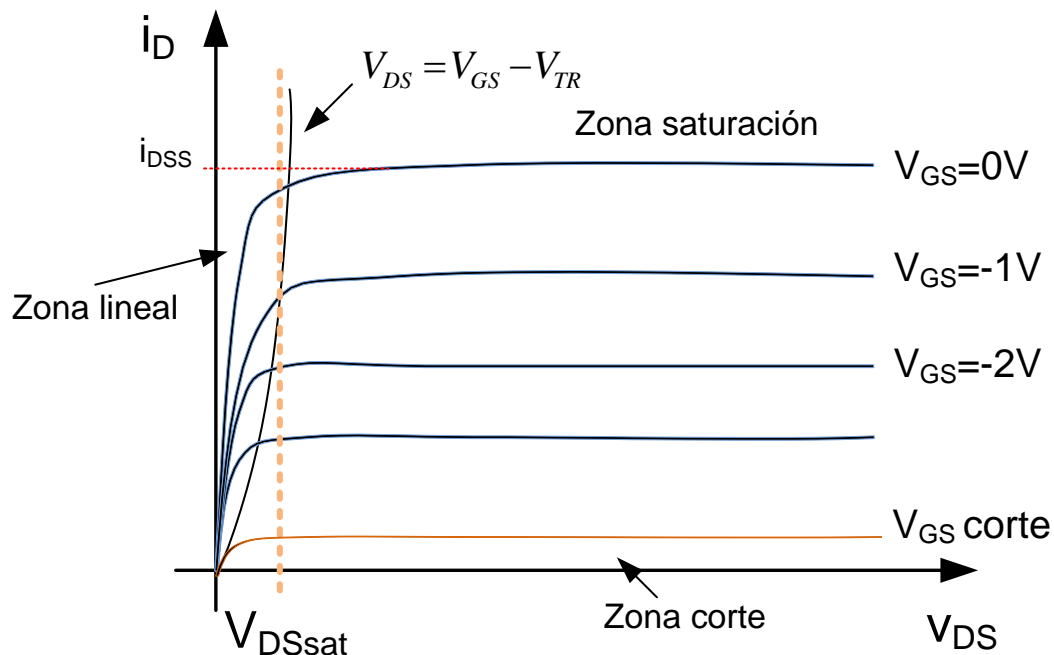
$$i_D = k \cdot (V_{GS} - V_{TR})^2; \quad k = \frac{i_{DSS}}{V_{TR}^2}$$

- Útil para obtener parámetros del componente.

Transistor de efecto campo JFET

Curvas características V-I. Canal n

Característica V-I de salida



- La salida depende de la V_{GS} :

$V_{GS} > V_{TR} \Rightarrow$ Zona Activa o Saturación
($i_D = f(V_{DS}, V_{TR})$)

$V_{GS} < V_{TR} \Rightarrow$ Zona de Corte $\Rightarrow (i_D = 0)$

- La potencia disipada limita el área de operación segura:

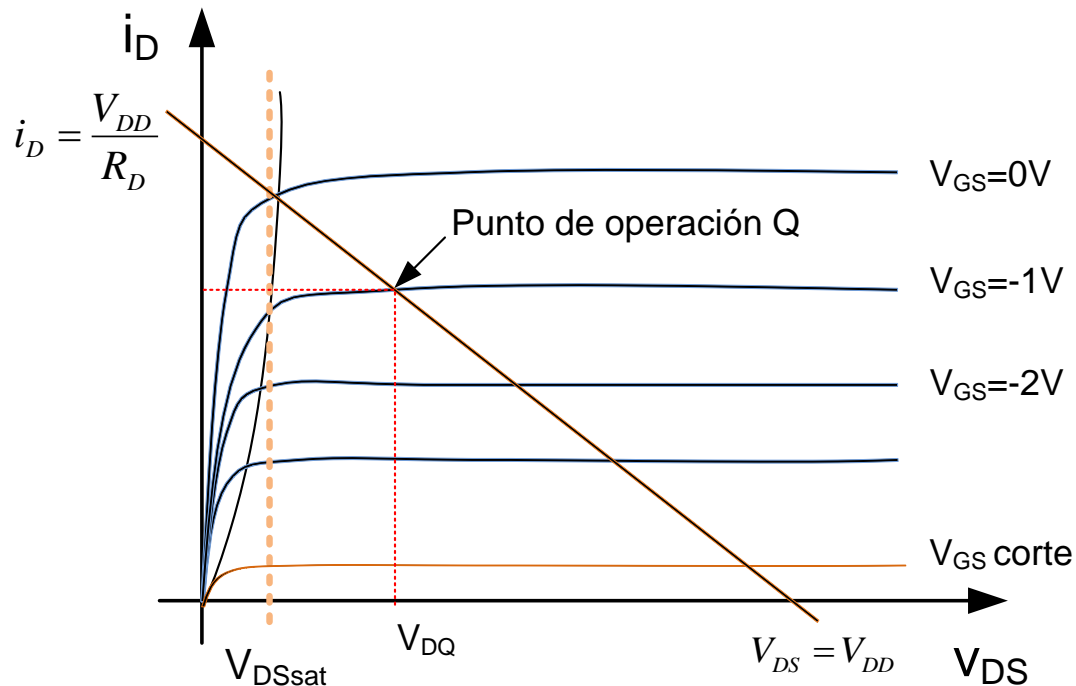
$$P_{FET} = i_D \cdot v_{DS} \leq P_{max} = Cte.$$

- En la zona activa la i_D no es plana, tiene un ligera pendiente positiva

Transistor de efecto campo JFET

Polarización. Análisis en CC. Recta de carga.

✓ Obtención del Pto. de Operación.



• Circuito de salida

$$V_{DD} = i_D \cdot R_D + V_{DS}$$

• Recta de carga a la salida

$$V_{DS} = 0 \Rightarrow i_D = \frac{V_{DD}}{R_D}$$

$$i_D = 0 \Rightarrow V_{DS} = V_{DD}$$

• Pto. De Operación. Intersección de la recta de carga con la curva del valor de V_{GS} conectado en la entrada.

Transistor de efecto campo JFET

Aplicaciones

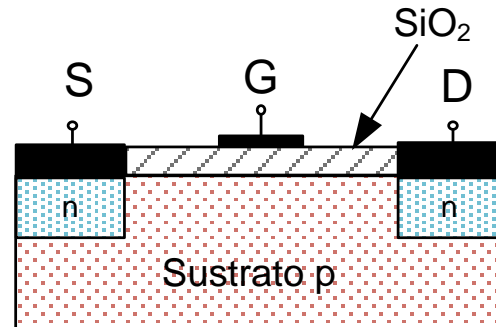
- ✓ Interruptores analógicos o digitales.
- ✓ Etapas de entrada a amplificadores diferenciales.
- ✓ Amplificadores especiales.
- ✓ Resistencias controladas por tensión.

Transistor de efecto campo MOSFET

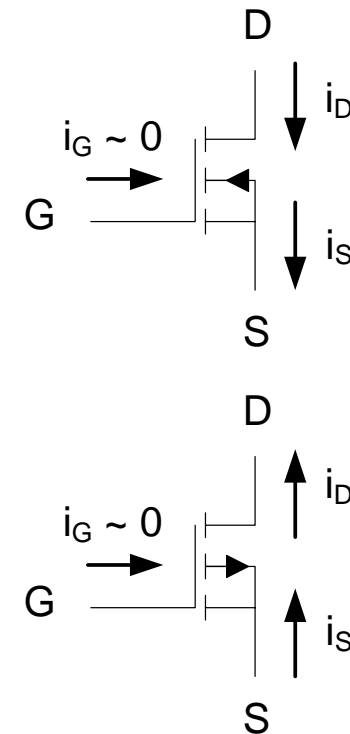
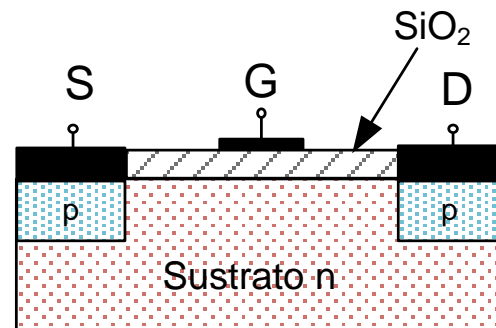
Estructura y símbolo del MOSFET de enriquecimiento. *Canal n* y *Canal p*

Terminales: Puerta, Drenador y Fuente. Componente simétrico.

Canal n



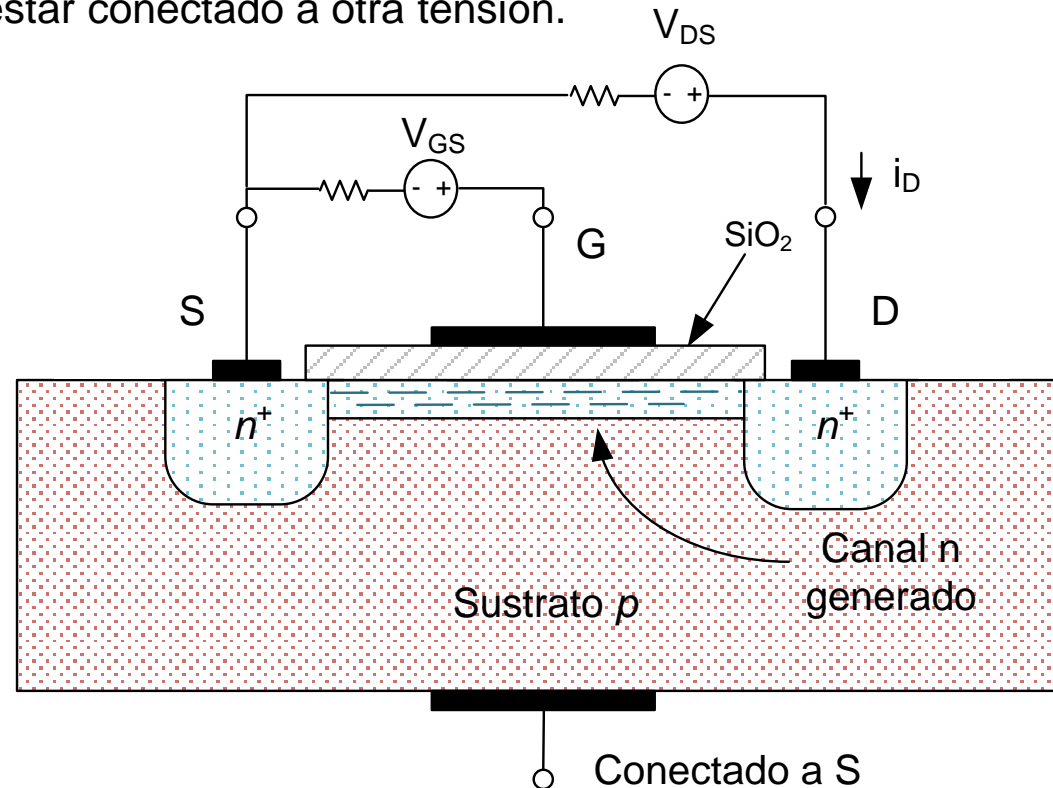
Canal p



Transistor de efecto campo MOSFET

Funcionamiento. MOSFET de enriquecimiento de canal *n*

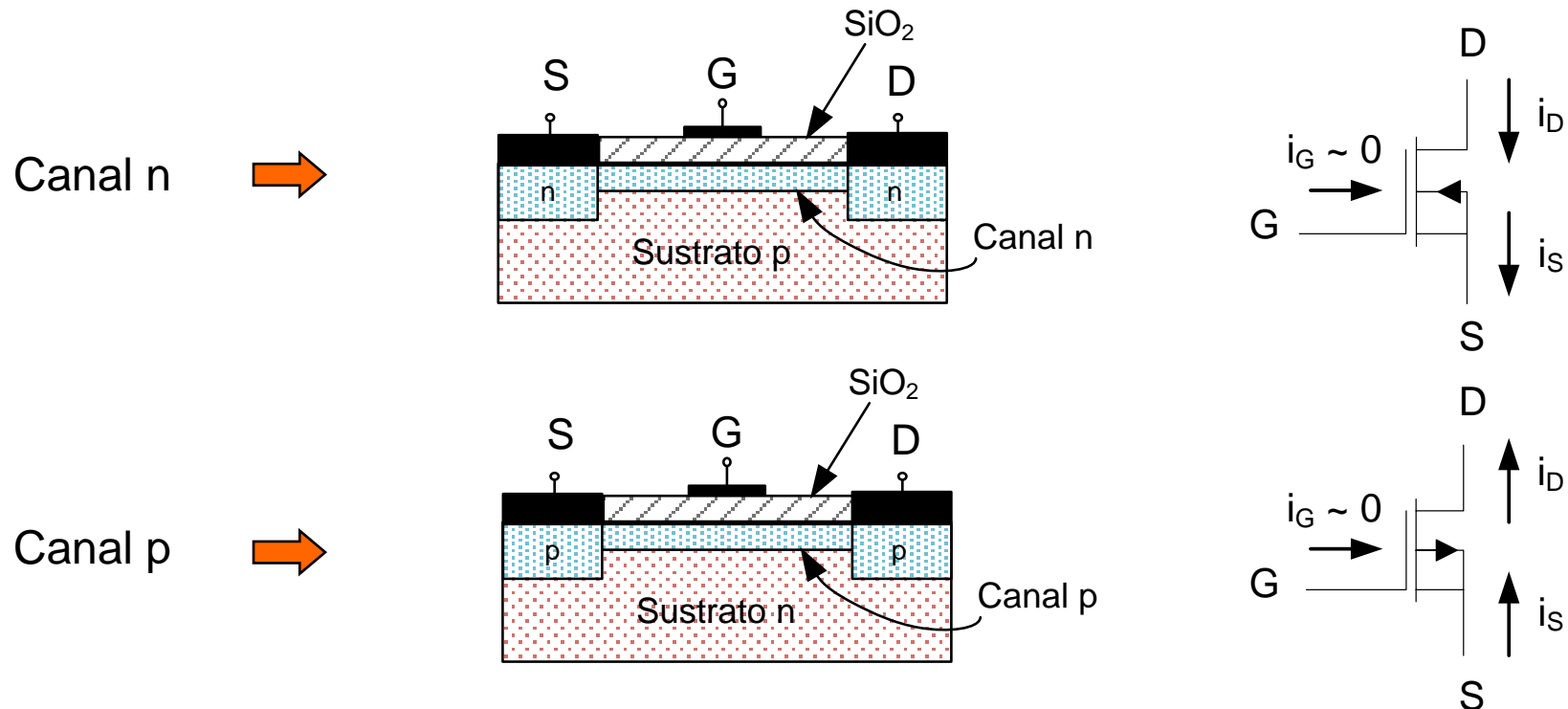
✓ Tensión V_{DS} y V_{GS} : La tensión V_{GS} atrae electrones del sustrato hacia la capa aislante de SiO_2 , creando un canal. La corriente i_D comienza a circular cuando la tensión V_{DS} supera un umbral V_{TR} . El sustrato p se conecta a la fuente. En transistores usados en C.I. el sustrato puede estar conectado a otra tensión.



Transistor de efecto campo MOSFET

Estructura y símbolo del MOSFET de empobrecimiento. *Canal n* y *Canal p*

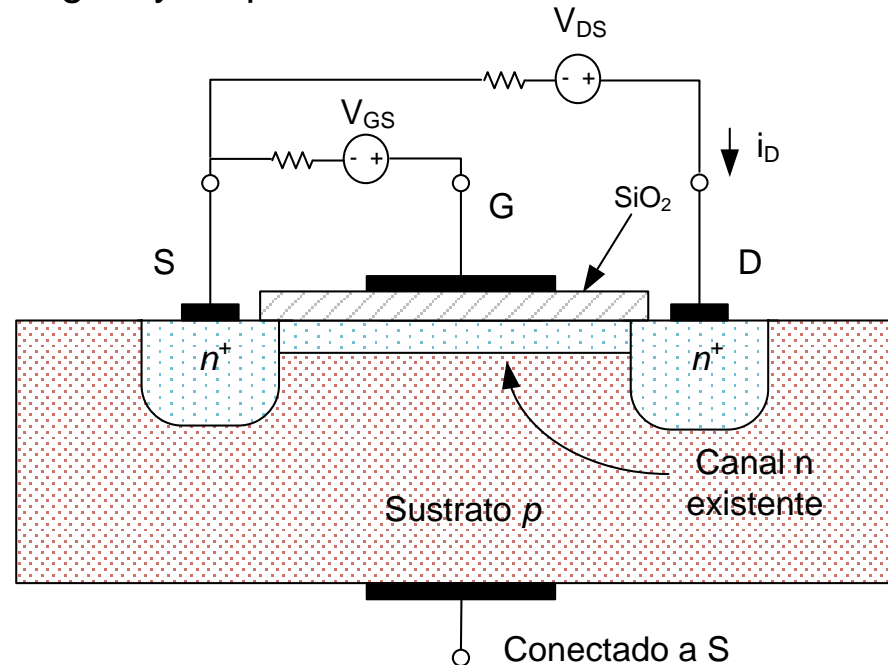
Terminales: Puerta, Drenador y Fuente. Componente simétrico.



Transistor de efecto campo MOSFET

Funcionamiento. MOSFET de empobrecimiento o deplexión *canal n*

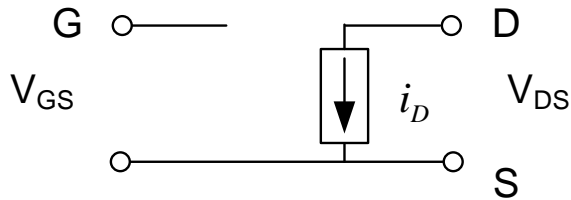
✓ Tensión V_{DS} y V_{GS} : Existe un canal n físicamente. La corriente i_D comienza a circular cuando se aplica una tensión V_{DS} . Una tensión V_{GS} positiva atrae electrones del sustrato hacia la capa aislante de SiO_2 , aumentando el canal. Una tensión V_{GS} negativa saca electrones del canal, empobreciéndolo. Para un determinado valor de V_{GS} negativa (umbral V_{TR}) el canal se estrangula y no permite la circulación de corriente



Transistor de efecto campo MOSFET

Zonas de funcionamiento

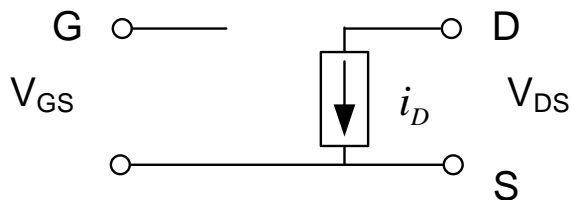
✓ **Zona Lineal:** Para una determinada tensión $V_{GS} > V_{TR}$ la i_D varía linealmente según se incrementa V_{DS} hasta una V_{sat} . $V_{sat} \sim V_{GS} - V_{TR}$



Si $V_{GS} > V_{TR}$ y $0 < V_{DS} < V_{sat} (\approx V_{GS} - V_{TR})$

$$i_D = k \cdot (2(V_{GS} - V_{TR})V_{DS} - V_{DS}^2); \quad k = \frac{i_{DSS}}{V_{TR}^2}$$

✓ **Zona de Saturación:** Para una determinada tensión $V_{GS} > V_{TR}$, si $V_{DS} > V_{sat}$ la i_D permanece constante aunque aumente V_{DS} .



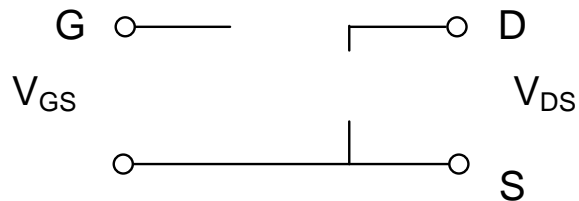
Si $V_{GS} > V_{TR}$ y $V_{DS} > V_{sat} (\approx V_{GS} - V_{TR})$

$$i_D = k \cdot (V_{GS} - V_{TR})^2; \quad k = \frac{i_{DSS}}{V_{TR}^2}$$

Transistor de efecto campo MOSFET

Zonas de funcionamiento

✓ **Zona de Corte:** Para una determinada tensión $V_{GS} < V_{TR}$ en canal está estrangulado o no se ha formado y no circula la corriente i_D .



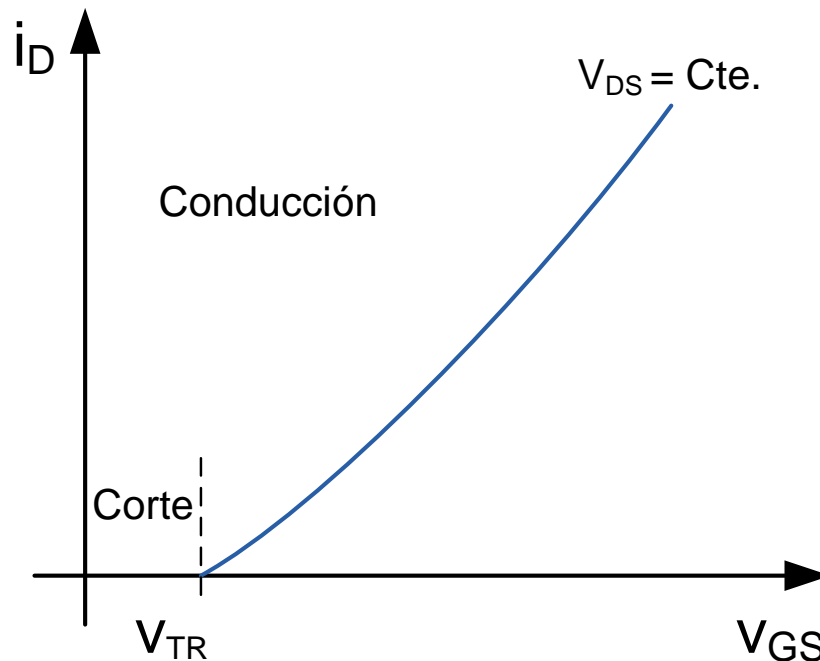
$$i_D = 0$$

✓ **Zona de ruptura:** Si estando en la zona de saturación se aumenta mucho V_{DS} se produce la ruptura del componente.

Transistor de efecto campo MOSFET

Curvas características V-I. Enriquecimiento canal n

Característica V-I de entrada



- No hay i_{DSS} (corriente de drenaje de saturación), para $V_{GS} = 0$, la $i_D = 0$

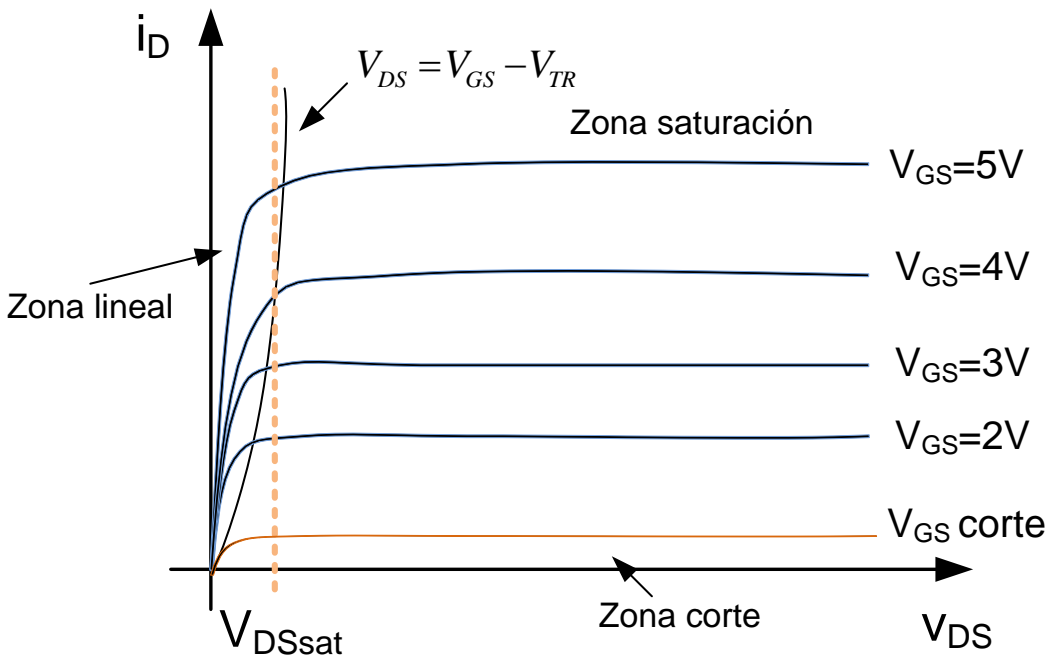
- En la zona de saturación:

$$i_D = k \cdot (V_{GS} - V_{TR})^2; \quad k \left(\frac{mA}{V^2} \right)$$

Transistor de efecto campo MOSFET

Curvas características V-I. Enriquecimiento canal n

Característica V-I de salida



- La salida depende de la V_{GS} :

$V_{GS} > V_{TR} \Rightarrow$ Zona Activa o Saturación
($i_D = f(V_{DS}, V_{TR})$)

$V_{GS} < V_{TR} \Rightarrow$ Zona de Corte $\Rightarrow (i_D = 0)$

- La potencia disipada limita el área de operación segura:

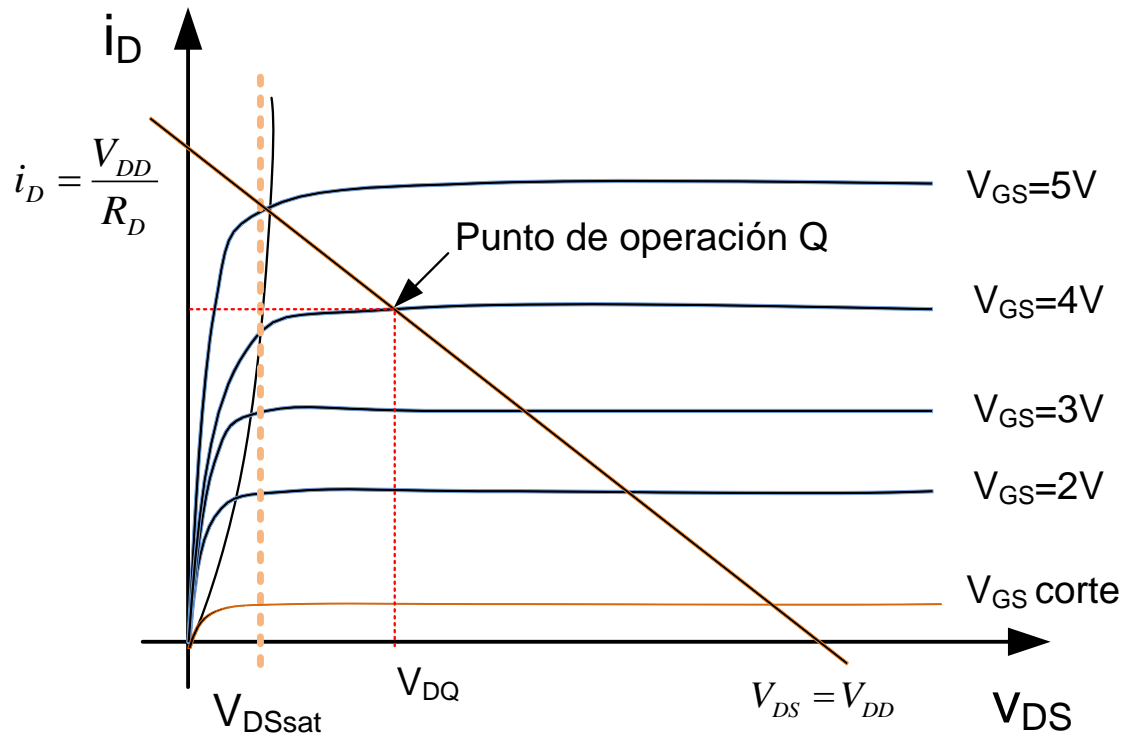
$$P_{FET} = i_D \cdot v_{DS} \leq P_{max} = Cte.$$

- En la zona activa la i_D no es plana, tiene un ligera pendiente positiva

Transistor de efecto campo MOSFET

Polarización. Análisis en CC. Recta de carga.

✓ Obtención del Pto. de Operación.



• Circuito de salida

$$V_{DD} = i_D \cdot R_D + V_{DS}$$

• Recta de carga a la salida

$$V_{DS} = 0 \Rightarrow i_D = \frac{V_{DD}}{R_D}$$

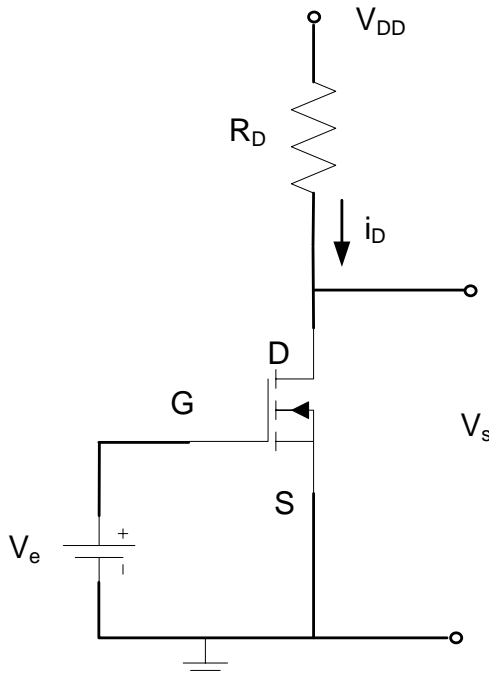
$$i_D = 0 \Rightarrow V_{DS} = V_{DD}$$

• Pto. De Operación. Intersección de la recta de carga con la curva del valor de V_{GS} conectado en la entrada.

Transistor de efecto campo MOSFET

Configuraciones.

- ✓ Amplificador inversor de tensión.



- Suponiendo zona de saturación:

$$V_{GS} > V_{TR} \text{ y } V_{DS} > V_{GS} - V_{TR}$$
$$i_D = k \cdot (V_{GS} - V_{TR})^2; \quad k \left(\frac{mA}{V^2} \right)$$

- Polarización CC (Pto. de operación o trabajo):

$$V_{DD} = i_D \cdot R_D + V_{DS}$$

$$V_s = V_{DS}$$

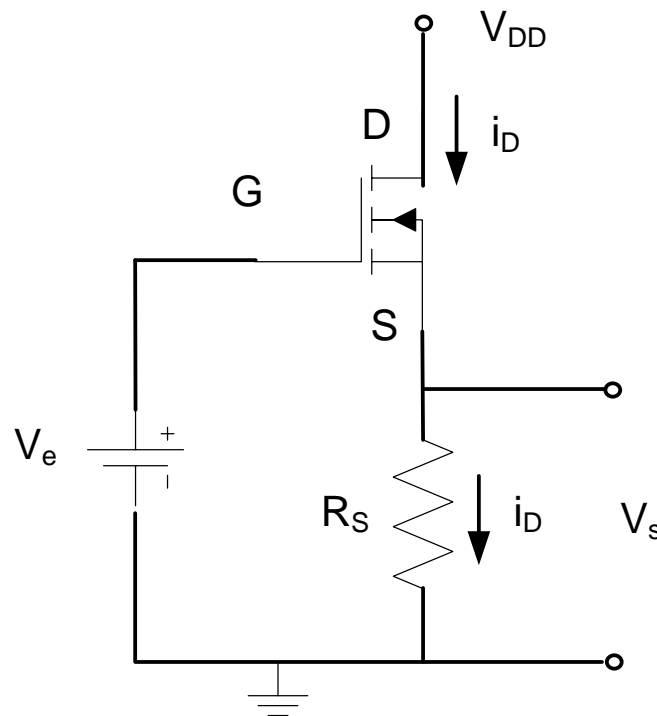
- Se comprueba la suposición

$$V_{GS} > V_{TR} \text{ y } V_{DS} > V_{GS} - V_{TR}$$

Transistor de efecto campo MOSFET

Configuraciones.

- ✓ Seguidor de tensión.



- Suponiendo zona de saturación:

$$V_{GS} > V_{TR} \text{ y } V_{DS} > V_{GS} - V_{TR}$$
$$i_D = k \cdot (V_{GS} - V_{TR})^2; \quad k \left(\frac{mA}{V^2} \right)$$

- Polarización CC (Pto. de operación o trabajo):

$$V_{DD} = i_S \cdot R_S + V_{DS}$$

$$V_s = i_S \cdot R_S; \quad i_S = i_D$$

$$V_E = i_S \cdot R_S + V_{GS}$$

- Se comprueba la suposición

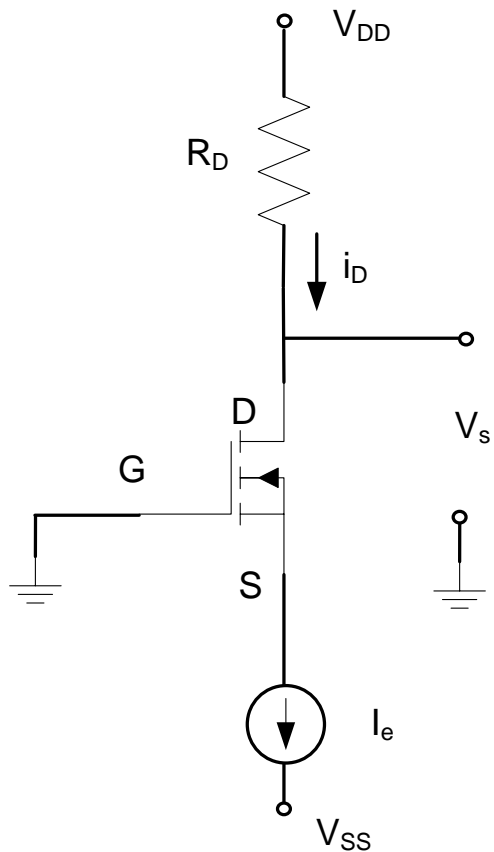
$$V_{GS} > V_{TR} \text{ y } V_{DS} > V_{GS} - V_{TR}$$

- Hay realimentación

Transistor de efecto campo MOSFET

Configuraciones

✓ Seguidor de corriente.



• Suponiendo zona de saturación:

$$V_{GS} > V_{TR} \text{ y } V_{DS} > V_{GS} - V_{TR}$$
$$i_D = k \cdot (V_{GS} - V_{TR})^2; \quad k \left(\frac{mA}{V^2} \right)$$

• Polarización CC (Pto. de operación o trabajo):

$$V_s = V_{DD} - i_D \cdot R_D$$
$$i_D = i_e = Cte. \Rightarrow V_{GS} = V_{TR} + \sqrt{\frac{i_D}{k}}$$

$$V_{DS} = V_s + V_{GS}$$

• Se comprueba la suposición

$$V_{GS} > V_{TR} \text{ y } V_{DS} > V_{GS} - V_{TR}$$

Transistor de efecto campo MOSFET

Aplicaciones

- ✓ Interruptores analógicos o digitales.
- ✓ Etapas de entrada a amplificadores diferenciales.
- ✓ Amplificadores especiales.
- ✓ Resistencias controladas por tensión.

Transistor de efecto campo MOSFET

Transistor JFET y MOSFET real.

- ✓ Sus características varían con la temperatura. En general, el incremento de temperatura produce una disminución de la tensión umbral Puerta-Fuente (V_{GS}) y una disminución de la pendiente I_D - V_{GS} . Aparece un punto de coeficiente de temperatura 0. La corriente en la unión p-n de un JFET aumenta con la temperatura.
- ✓ La curva característica de salida no es plana en su Zona de Saturación, tiene un ligera pendiente positiva, determinada por la longitud del canal. (Modulación de la longitud del canal).
- ✓ La tensión máxima que soporta un transistor entre terminales es finita. Por encima de ellas se rompe el componente.
- ✓ La máxima corriente viene limitada por la capacidad de disipación de potencia del componente.
- ✓ La existencia de capacidades y resistencia parásitas hacen que la velocidad de respuesta del transistor sea limitada.
- ✓ Sensible a descargas electroestáticas.