

ELECTRONICA APLICADA I

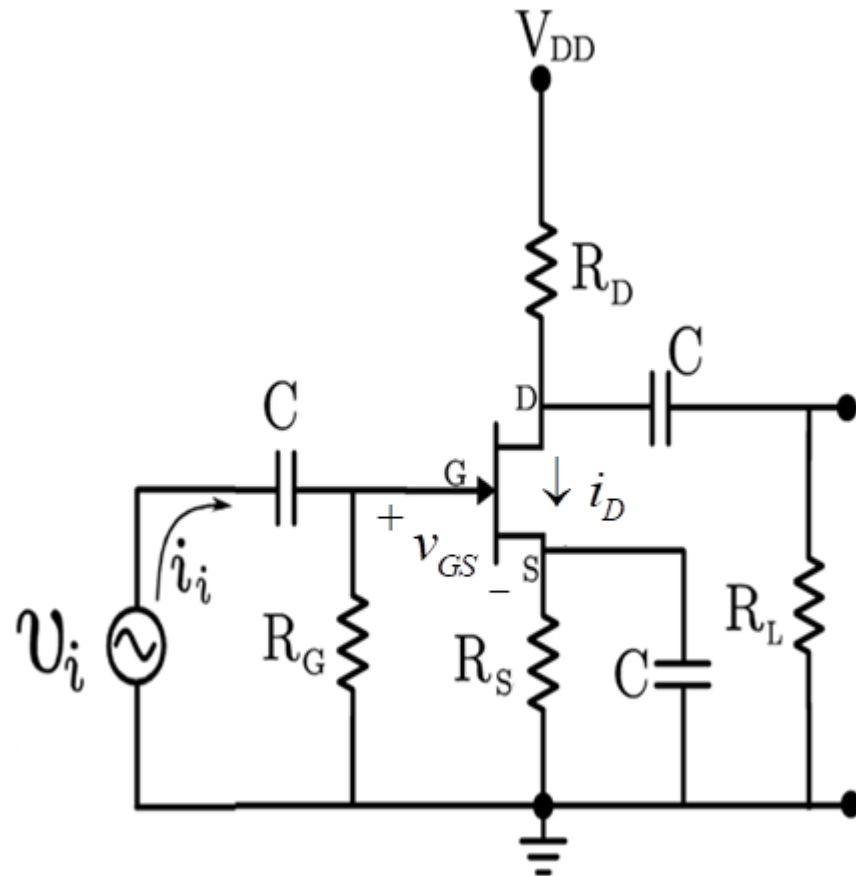
Profesor Titular Dr Ing. Guillermo Riva

Profesor Adjunto Ing Martin Guido

- Etapa Amplificadora surtidor común con JFET.
- Expresión de la corriente de drenaje.
- Características corriente-voltaje.
- Voltaje estrangulamiento.
Voltaje de ruptura.
Corriente de saturación.
- Polarización del JFET.
- Análisis del JFET
Método analítico.
Método gráfico.
- Diseño del JFET para máxima excursión simétrica.
- Polarización del MOSFET.
- Modelo para pequeña señal del JFET.
- Parámetros interno del JFET.
- Etapa amplificadora surtidor común.
- Circuito equivalente amplificador surtidor común.
Impedancia de entrada y salida.
Ganancia de tensión.
Ganancia de corriente.
- Reflexión de impedancia en transistores bipolares y FET.
- Configuración surtidor común sin capacitor de desacople de surtidor.
Impedancias de entrada y salida.
Ganancia de tensión y corriente.

Etapa Amplificadora surtidor común con FET.

Amplificador surtidor común con autopolarización.



Características de los FET :

- *Alta impedancia de entrada.*
- *Corriente de salida i_D controlada por la tensión de entrada v_{GS} .*
- *Más estables a las ΔT que los BJT.*
- *Ocupan un área pequeña en el chip, útiles en la fabricación de CI se pueden incluir millones.*
- *Consumen poca potencia.*

Desventajas :

- *Menos sensibles g_m bajos.*
- $g_m = \frac{\Delta i_D}{\Delta v_{GS}}$ (Transconductancia).
- *Sensibles a las cargas estáticas.*

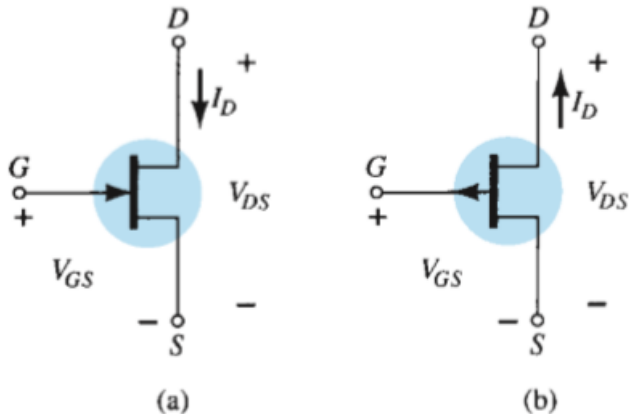
Expresión de la corriente de drenaje

Curva de transferencia del JFET.

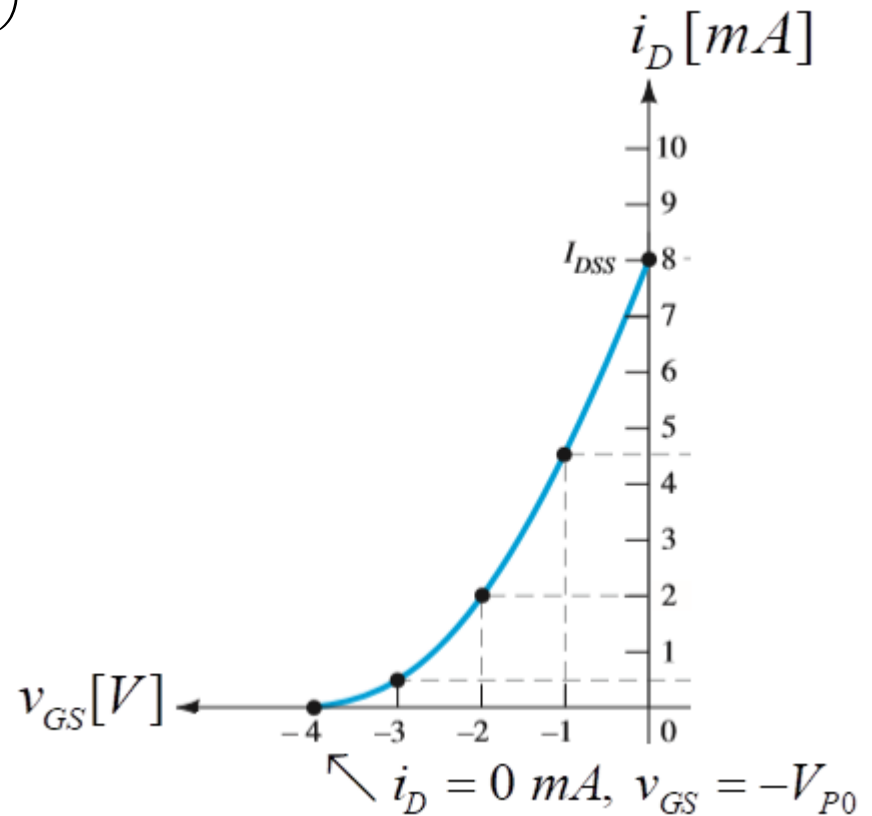
$$i_D = f^2_{(v_{GS})} \Rightarrow i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{v_{GS}}{v_{GS,off}} \right)^2 \quad \text{Ecuación de Sockley}$$

$v_{GS,off} = -V_{P0}$ Tensión de apagado

I_{DSS} : Corriente de saturación



Símbolos de JFET: (a) canal n; (b) canal p.

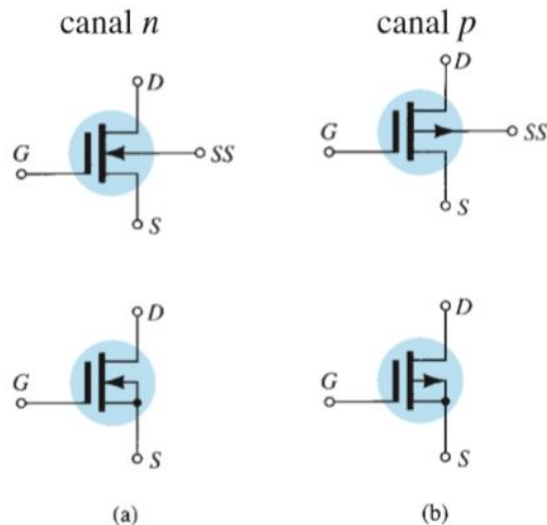


Expresión de la corriente de drenaje.

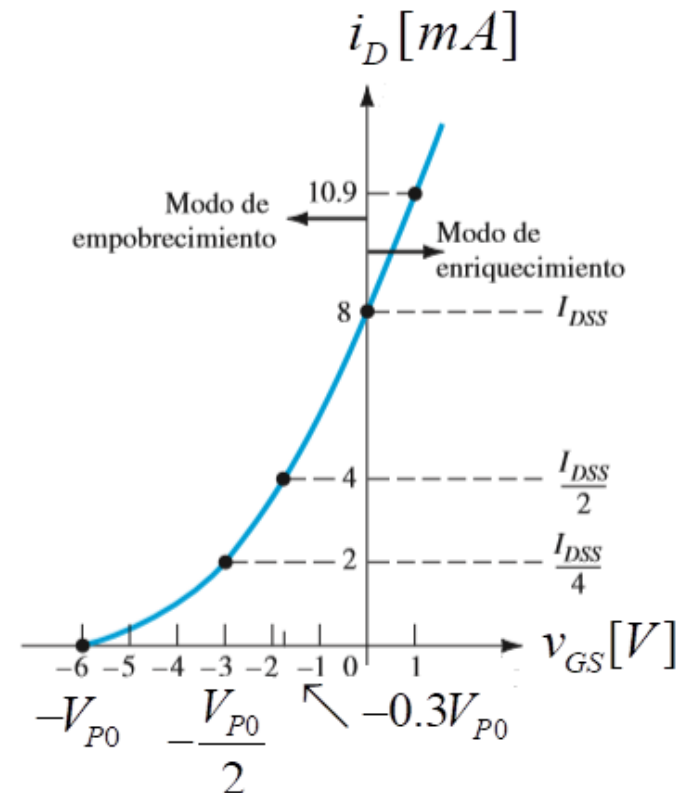
Curva de transferencia del MOSFET Decremental.

$$i_D = f^2_{(v_{GS})} \Rightarrow i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{v_{GS}}{v_{GS,off}} \right)^2 \quad \text{Ecuación de Shockley}$$

$$v_{GS_{off}} = -V_{P0} \quad I_{DSS} = I_{P0}$$



Símbolos gráficos para (a) MOSFET tipo empobrecimiento de canal n y (b) MOSFET tipo empobrecimiento de canal p.

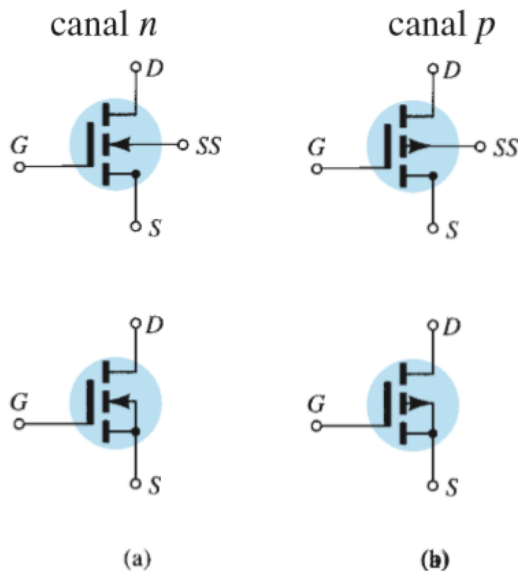


Expresión de la corriente de drenaje.

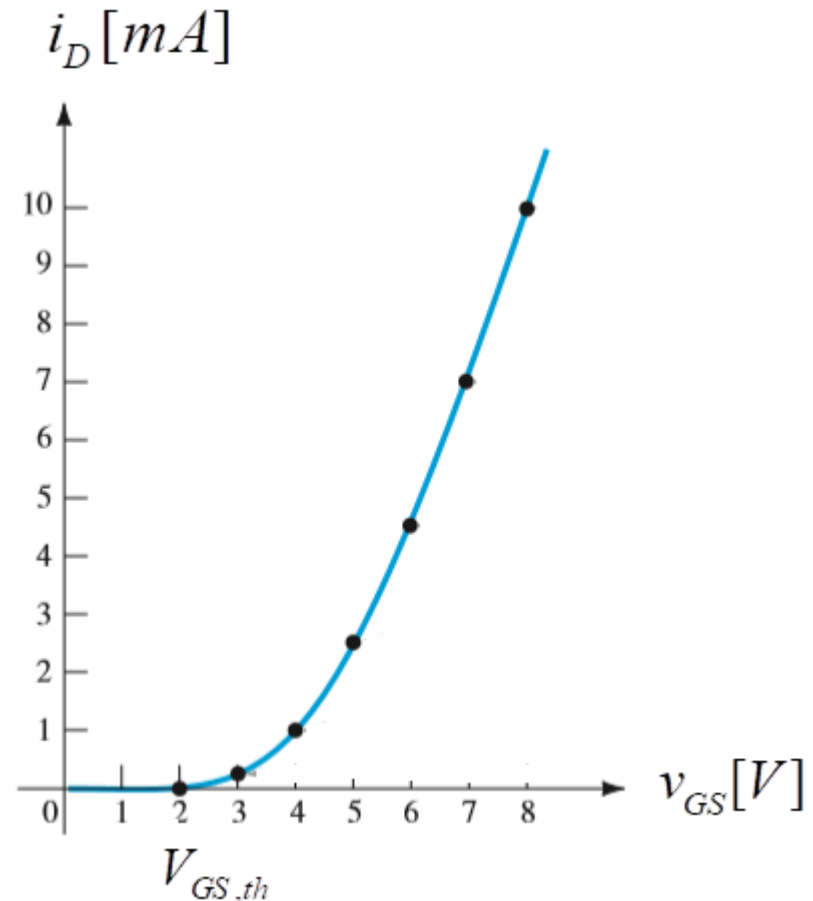
Curva de transferencia del MOSFET Incremental. (canal inducido)

$$i_D = f^2_{(v_{GS})} \Rightarrow i_D = k(v_{GS} - v_{GS,th})^2$$

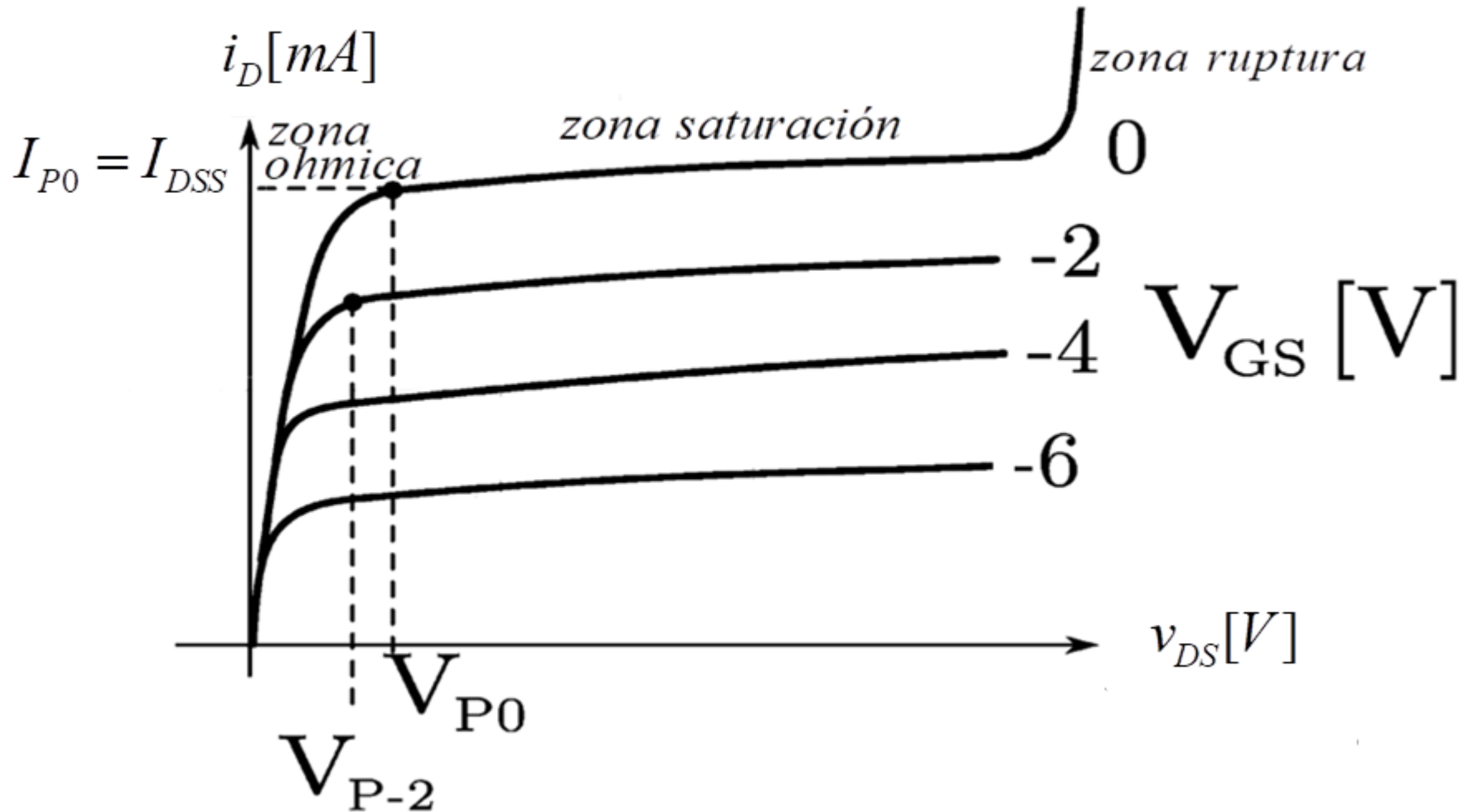
$v_{GS,th}$: Tensión de umbral



Símbolos de (a) MOSFET tipo enriquecimiento de canal n, y (b) MOSFET tipo enriquecimiento de canal p.



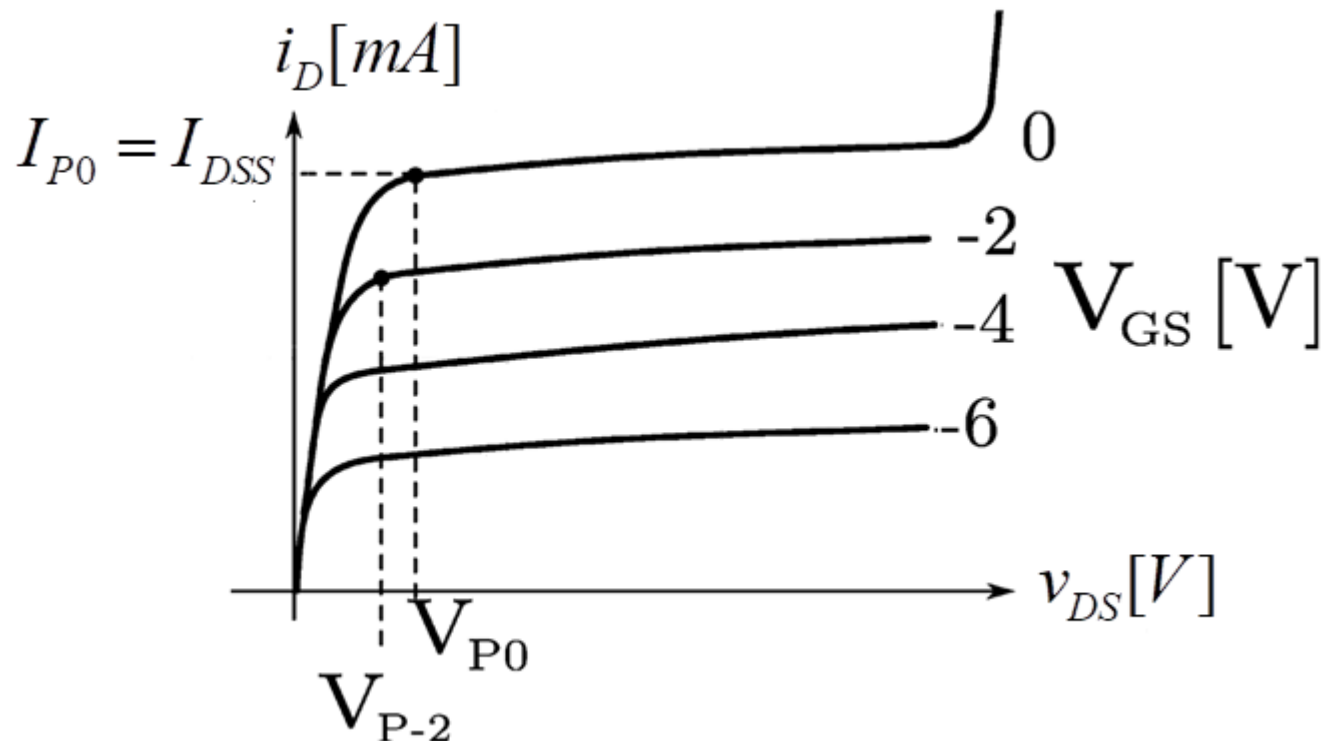
Características corriente-tensión.



Voltaje de estrangulamiento

$$v_{DS, \text{estrangulamiento}} = V_p = V_{po} + v_{GS}$$

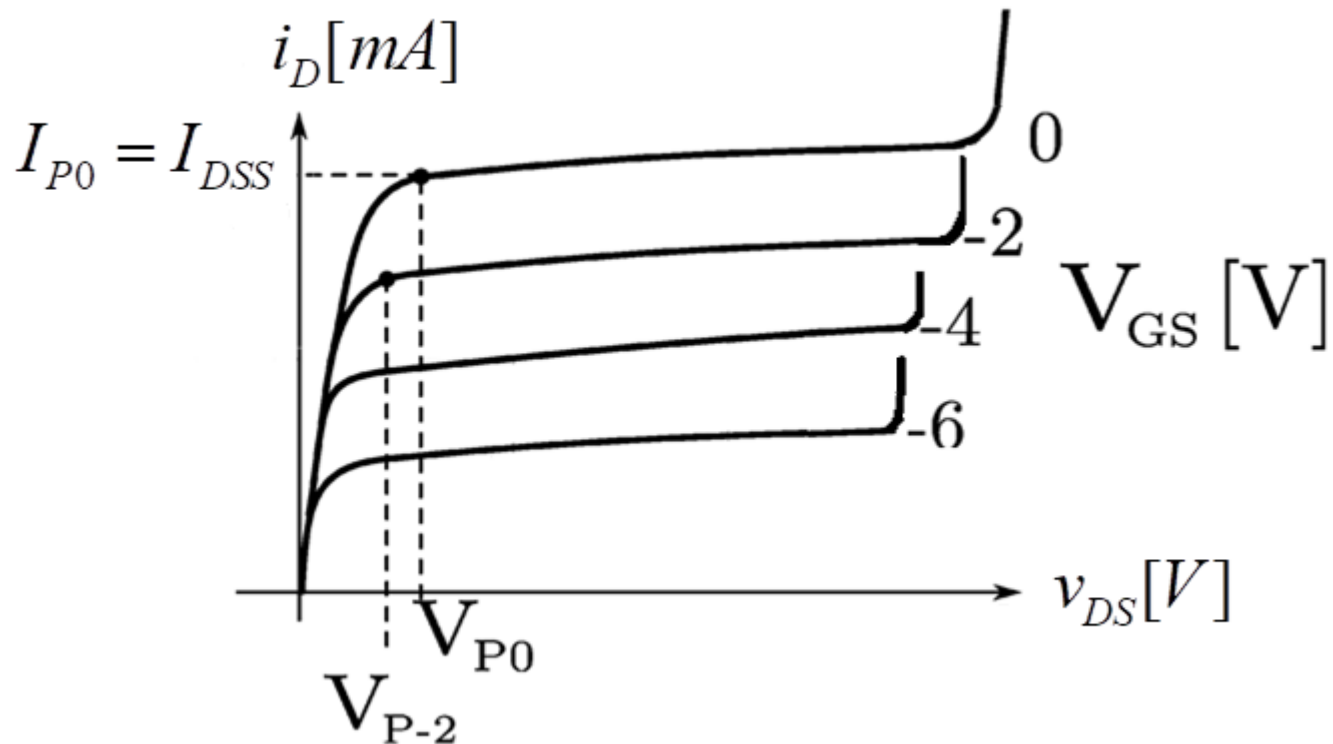
$$\text{Cuando } v_{GS} = 0 \Rightarrow V_p = V_{po}$$



Voltaje de ruptura.

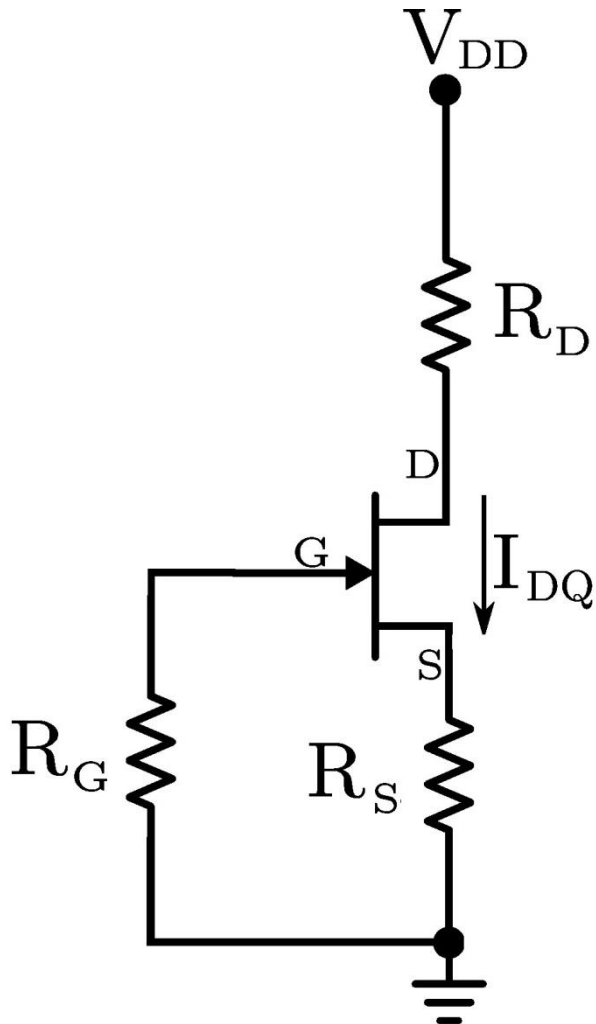
$$BV_{DSX} \cong BV_{DSO} + V_{GS}$$

Donde BV_{DSO} es la tension de ruptura para $V_{GS} = 0$



Polarización del JFET.

Amplificador surtidor común, con autopolarización.



Ecuación de entrada :

$$V_{GSQ} = V_{GQ} - V_{SQ}$$

$$\text{Como } I_{GQ} = 0 \Rightarrow V_{GQ} = I_{GQ}R_G = 0$$

$$V_{SQ} = I_{DQ}R_S$$

$$V_{GSQ} = 0 - I_{DQ}R_S = -I_{DQ}R_S$$

Ecuación de salida :

$$V_{DD} = V_{DSQ} + I_{DQ}(R_S + R_D)$$

$$V_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ}(R_S + R_D)$$

Análisis del JFET.

- **Método Analítico:**

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{v_{GS}}{v_{GS(off)}} \right)^2$$

$$v_{GS} = -R_S i_D$$

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{-R_S i_D}{v_{GS(off)}} \right)^2 = I_{DSS} \left(1 + \frac{R_S i_D}{v_{GS(off)}} \right)^2$$

$$i_D = I_{DSS} \left(1 + 2 \times \frac{R_S i_D}{v_{GS(off)}} + \frac{R_S^2 i_D^2}{v_{GS(off)}^2} \right)$$

$$i_D = I_{DSS} + \frac{2I_{DSS}R_S}{v_{GS(off)}} \times i_D + \frac{I_{DSS}R_S^2}{v_{GS(off)}^2} \times i_D^2$$

$$0 = I_{DSS} + \frac{2I_{DSS}R_S}{v_{GS(off)}} \times i_D - i_D + \frac{I_{DSS}R_S^2}{v_{GS(off)}^2} \times i_D^2$$

Análisis del JFET.

$$I_{DSS} + \left(\frac{2I_{DSS}R_S}{V_{GS(off)}} - 1 \right) i_D + \frac{I_{DSS}R_S^2}{V_{GS(off)}^2} \times i_D^2 = 0$$

$$\frac{I_{DSS}R_S^2}{V_{GS(off)}^2} i_D^2 + \left(\frac{2I_{DSS}R_S}{V_{GS(off)}} - 1 \right) i_D + I_{DSS} = 0$$

$$A \quad i_D^2 + \quad B \quad i_D + \quad C \quad = 0$$

$$A = \frac{I_{DSS}R_S^2}{V_{GS(off)}^2} ; \quad B = \frac{2I_{DSS}R_S}{V_{GS(off)}} - 1 ; \quad C = I_{DSS}$$

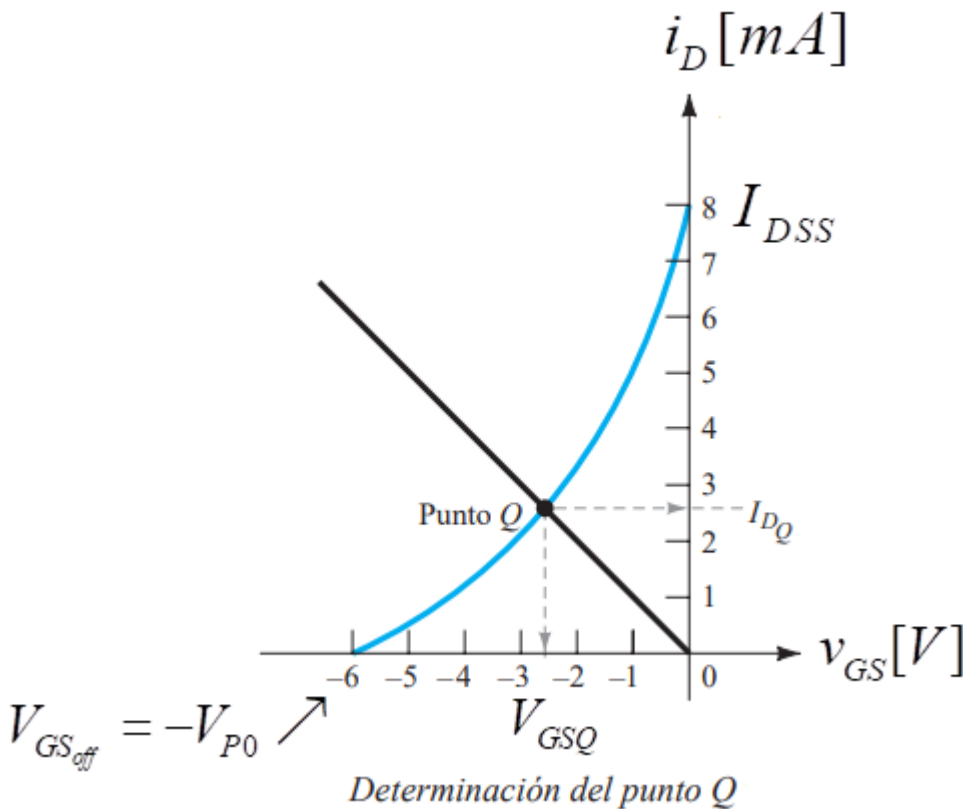
$$I_{DQ(1,2)} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{De las dos raices se toma la de} \\ \text{menor valor y se la reemplaza} \\ \text{en las siguientes ecuaciones,} \\ \text{obteniendose } V_{GSQ} \text{ y } V_{DSQ}. \end{array} \right.$$

$$V_{GSQ} = -I_{DQ} \times R_S$$

$$V_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ} (R_S + R_D)$$

Análisis del JFET.

- Método Gráfico (Graphmatica):



Graficamos las dos ecuaciones

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{v_{GS}}{v_{GS(off)}} \right)^2$$

$$i_D = -\frac{1}{R_S} \times v_{GS}$$

En la intersección obtenemos el valor de I_{DQ} y v_{GSQ} .

La reemplazamos en la ecuación de la malla de salida y obtenemos.

$$v_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ} (R_S + R_D)$$

Diseño del JFET.

Máxima excursión simétrica.

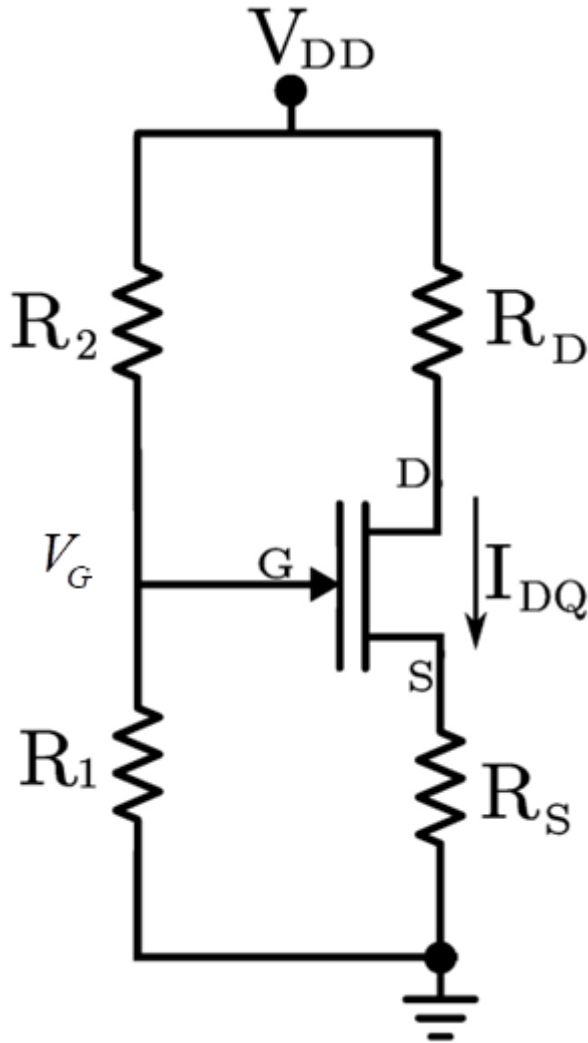
$$I_{DQ,MES} = \frac{V_{DD} - V_{P0}}{R_S + R_D + R_D // R_L}$$

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{v_{GS}}{v_{GS(off)}} \right)^2 \Rightarrow v_{GSQ} = v_{GS(off)} \left(1 - \sqrt{\frac{i_{DQ,MES}}{I_{DSS}}} \right)$$

$$V_{GSQ} = -I_{DQ,MES} \times R_S \Rightarrow R_S = -\frac{V_{GSQ}}{I_{DQ,MES}}$$

$$v_{DSQ} = V_{DD} - i_{DQ,MES} (R_S + R_D) \Rightarrow R_D = \frac{V_{DD} - V_{DSQ}}{I_{DQ,MES}} - R_S$$

Polarización del MOSFET.



Ecuación de entrada

$$V_{GSQ} = V_{GQ} - V_{SQ}$$

$$V_{GQ} = V_G = \frac{V_{DD}}{R_1 + R_2} \times R_1$$

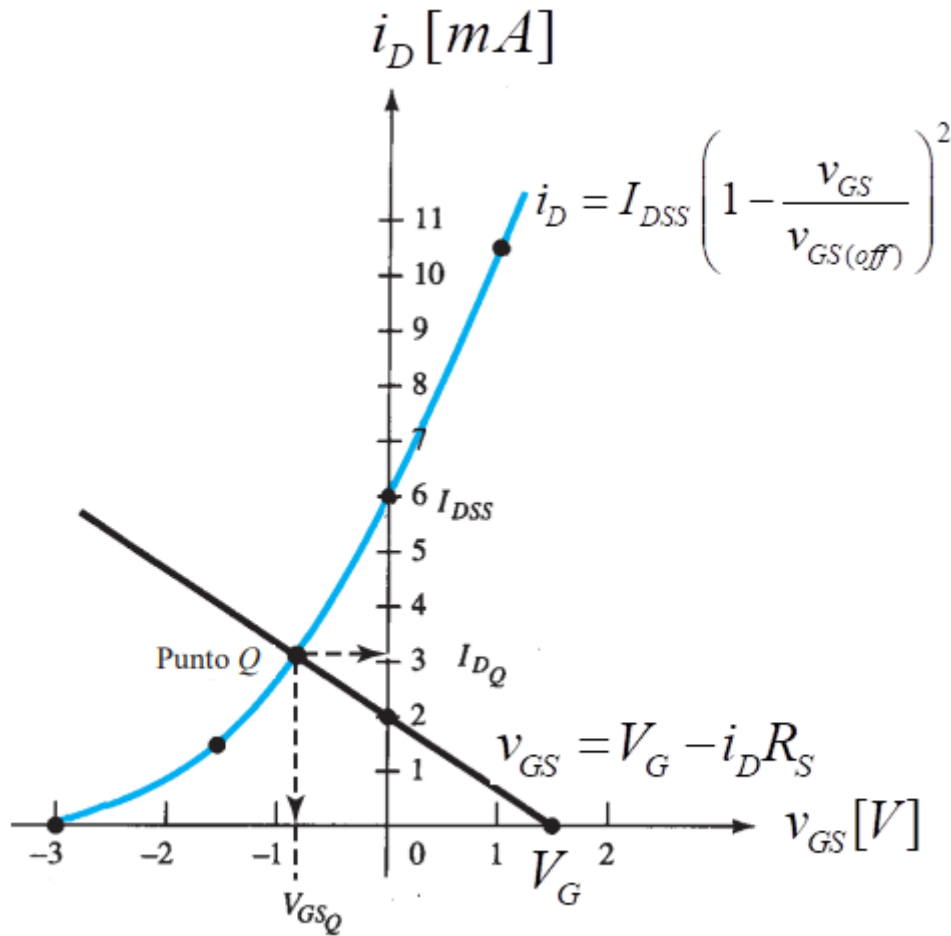
$$V_{SQ} = I_{DQ} R_S$$

$$V_{GSQ} = \frac{V_{DD}}{R_1 + R_2} \times R_1 - I_{DQ} R_S$$

Ecuación de salida

$$V_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ} (R_D + R_S)$$

Análisis del MOSFET con divisor resistivo.



Determinación del punto Q

Graficamos las dos ecuaciones

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{v_{GS}}{v_{GS(off)}} \right)^2$$

$$v_{GS} = V_G - i_D R_S$$

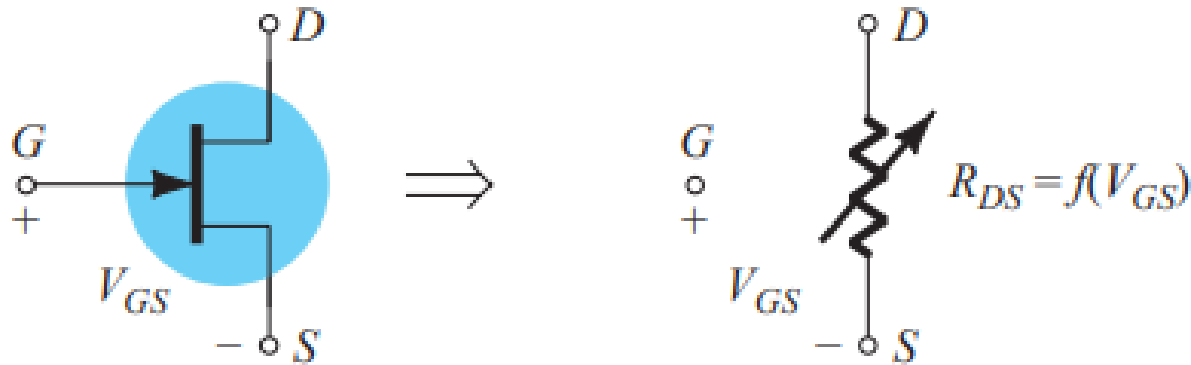
En la intersección obtenemos el valor de I_{DQ} y v_{GSQ} .

La reemplazamos en la ecuación de la malla de salida y obtenemos.

$$v_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ} (R_S + R_D)$$

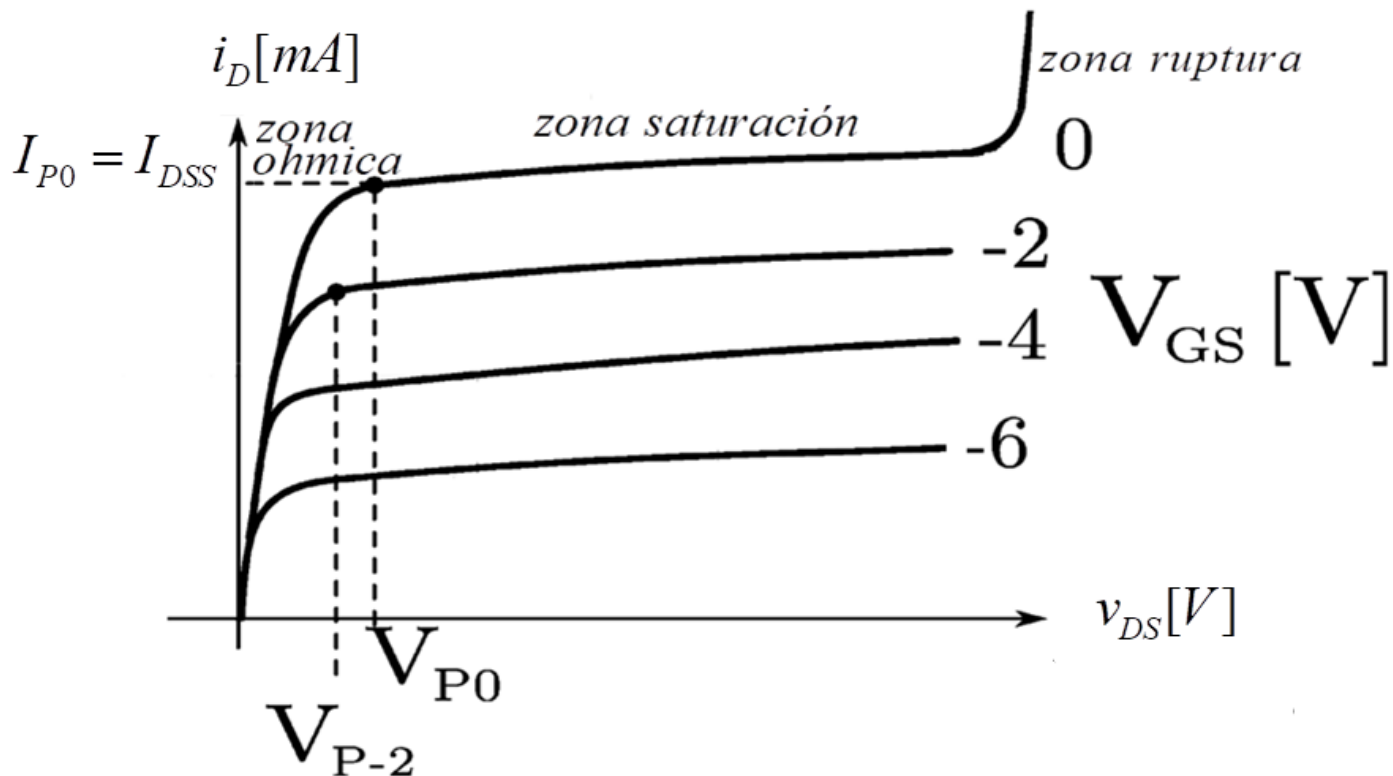
Resistor controlado por voltaje.

En la región ohmica al JFET se lo puede utilizar como resistor variable.



Resistor controlado por voltaje.

Para trabajar en esta region ohmica o lineal los niveles de v_{DS} deben ser mas pequeños que el tensión de estrangulamiento.



Resistor controlado por voltaje.

Una aproximación al valor de resistencia en función del voltaje aplicado v_{GS} viene dado por la siguiente ecuación.

$$r_d = \frac{r_o}{\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS,apagado}}\right)^2}$$

r_o = resistencia con $V_{GS} = 0$

r_d = resistencia a un nivel particular de V_{GS}

Ejemplo

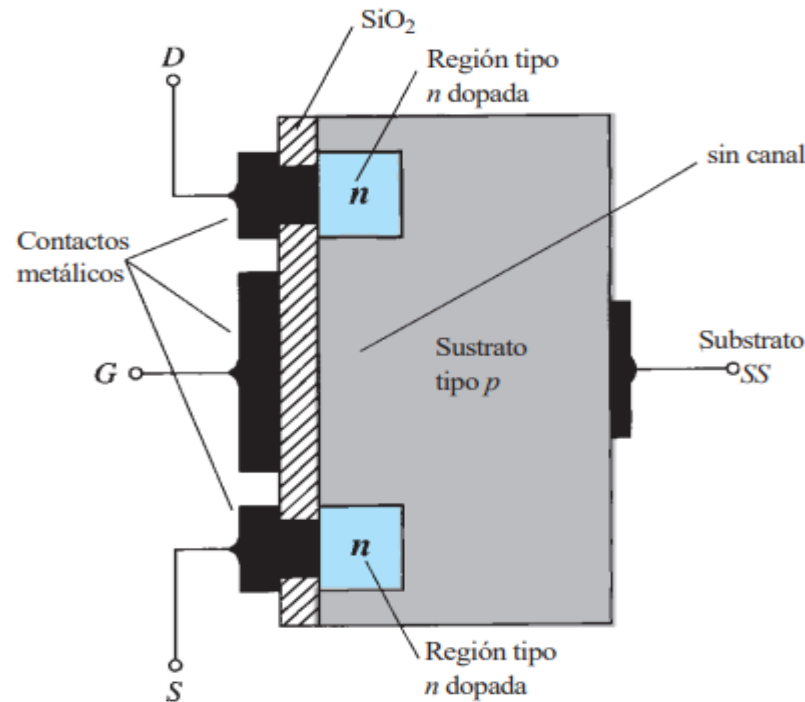
Para un JFET de canal N $r_o = 10\text{ K}\Omega$, $V_P = 6\text{ V}$

Calcular r_d para $V_{GS} = -3\text{ V}$

$$r_d = \frac{10.000}{\left(1 - \frac{-3}{-6}\right)^2} = 40\text{ K}\Omega$$

Manejo de los MOSFET.

La delgada capa de SiO_2 entre la compuerta y el canal le confiere alta impedancia de entrada pero dificulta el manejo, debido a que las cargas estaticas pueden perforarla y poner en cortocircuito el canal con la compuerta.



MOSFET tipo enriquecimiento de canal n.

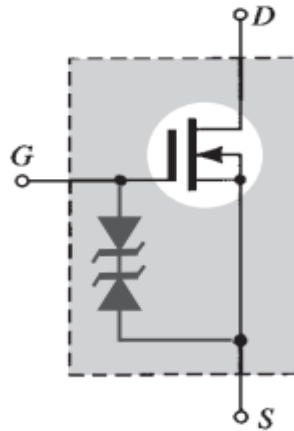
Manejo de los MOSFET.

La forma de protegerlo es poner un anillo que cortocircuite las patas y se lo retira despues de soldarlo.

De no tener anillo de proteccion manipularlo tomandolo del encapsulado.

Se debe trabajar con pulsera conectada tierra.

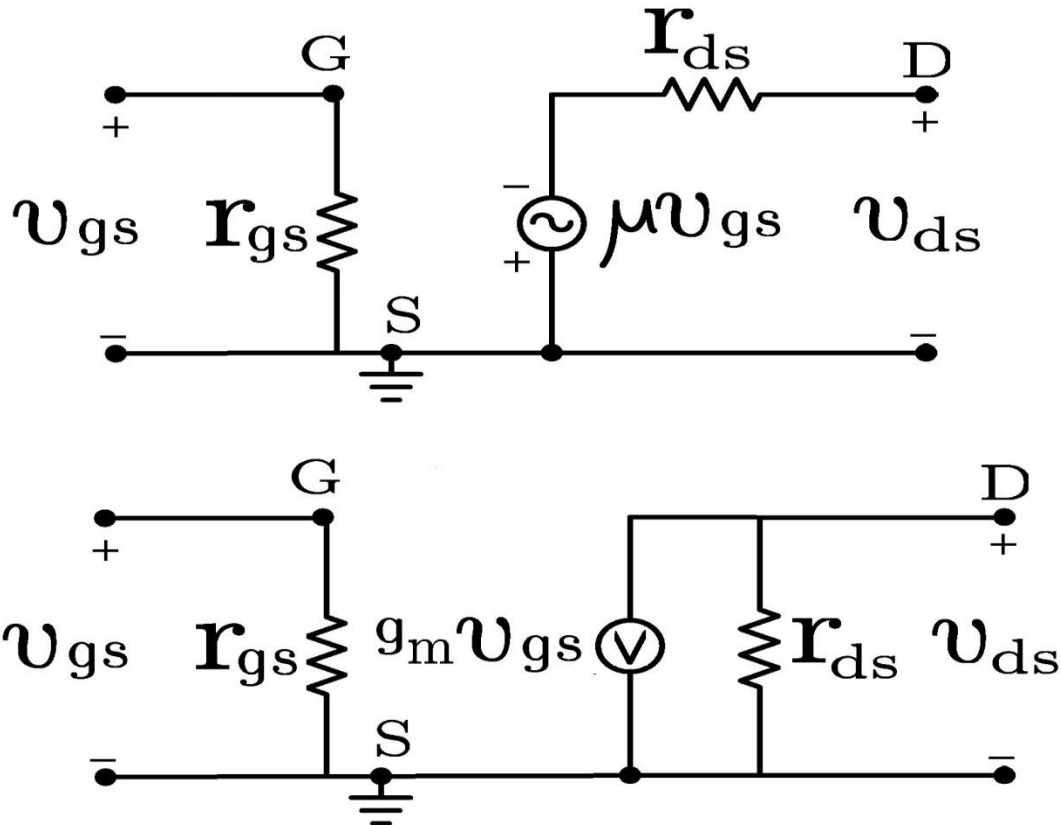
Los MOSFET de potencia vienen con proteccion en la entrada como se aprecia en la figura.



MOSFET con protección Zener.

Modelo para pequeña señal del FET.

Este modelo aplica solamente para pequeña señal. Es decir, cuando las variaciones de la corriente alterna es una pequeña fracción de la componente de corriente continua.



Parámetros internos del FET.

$$\text{Impedancia de entrada: } r_{gs} = \frac{\Delta v_{GS}}{\Delta i_G} = \left. \frac{v_{gs}}{i_g} \right|_{\text{Punto } Q} \rightarrow \infty$$

$$\text{Ganancia de voltaje: } \mu = \frac{\Delta v_{DS}}{\Delta v_{GS}} = \left. \frac{v_{ds}}{v_{gs}} \right|_{I_{DQ}=cte}$$

$$\text{Impedancia de salida: } r_{ds} = \frac{\Delta v_{DS}}{\Delta i_D} = \left. \frac{v_{ds}}{i_d} \right|_{V_{GSQ}=cte}$$

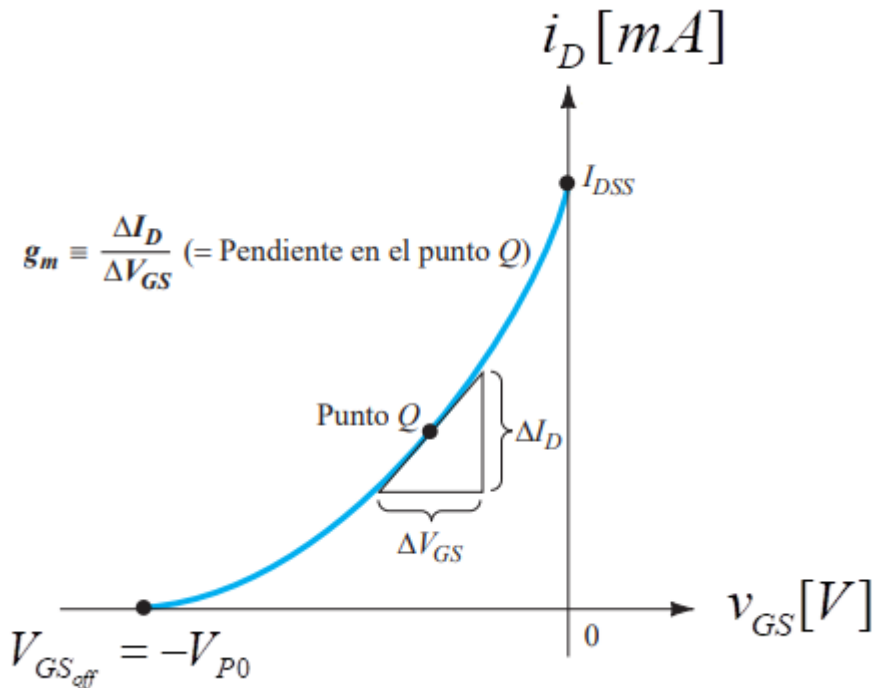
$$\text{Transconductancia: } g_m = \frac{\Delta i_D}{\Delta v_{GS}} = \left. \frac{i_d}{v_{gs}} \right|_{V_{DSQ}=cte}$$

$$\mu = \frac{\Delta v_{DS}}{\Delta v_{GS}} = \frac{\Delta v_{DS}}{\Delta v_{GS}} \times \frac{\Delta i_D}{\Delta i_D} = \frac{\Delta v_{DS}}{\Delta i_D} \times \frac{\Delta i_D}{\Delta v_{GS}} = r_{ds} g_m$$

$$\mu = r_{ds} g_m$$

Parámetros internos del FET.

Obtención gráfica de la Transconductancia apartir de la curva de transferencia.



$$g_m = \frac{\Delta i_D}{\Delta v_{GS}} = \left. \frac{i_d}{v_{gs}} \right|_{V_{DSQ}=cte}$$

$$g_m = g_{fs}$$

g_{fs} : *Conductancia de transferencia directa.*

Así figura en las hojas de especificaciones.

Parámetros internos del FET.

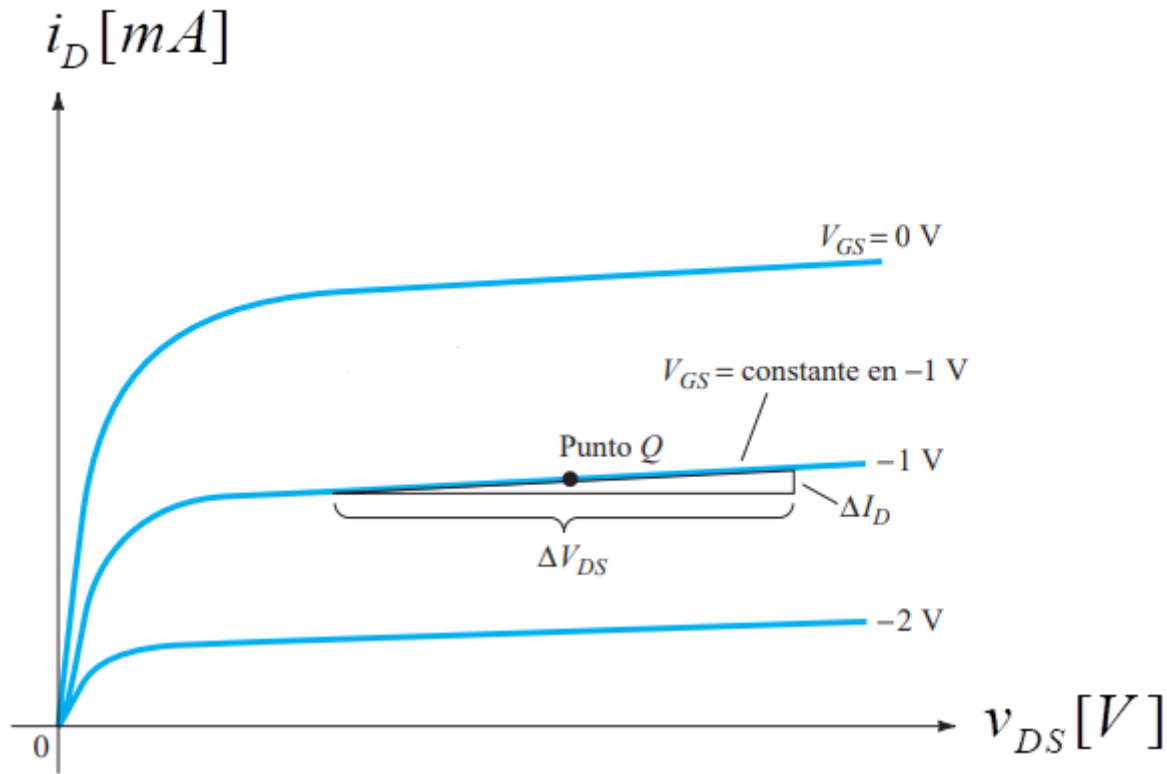
Obtención analítica de la Transconductancia apartir de la ecuación de Shokley.

$$\begin{aligned} g_m &= \left. \frac{di_D}{dv_{GS}} \right|_{\text{Punto } Q} = \frac{d}{dv_{GS}} \left[I_{DSS} \left(1 - \frac{v_{GS}}{V_{GS,off}} \right)^2 \right] = I_{DSS} \frac{d}{dv_{GS}} \left(1 - \frac{v_{GS}}{V_{GS,off}} \right)^2 \\ &= 2I_{DSS} \left(1 - \frac{v_{GS}}{V_{GS,off}} \right) \frac{d}{dv_{GS}} \left(1 - \frac{v_{GS}}{V_{GS,off}} \right) \\ &= 2I_{DSS} \left(1 - \frac{v_{GS}}{V_{GS,off}} \right) \left[\frac{d}{dv_{GS}} (1) - \frac{1}{V_{GS,off}} \frac{dv_{GS}}{dv_{GS}} \right] \\ &= 2I_{DSS} \left(1 - \frac{v_{GS}}{V_{GS,off}} \right) \left[0 - \frac{1}{V_{GS,off}} \right] = -\frac{2I_{DSS}}{V_{GS,off}} \left(1 - \frac{v_{GS}}{V_{GS,off}} \right) \\ g_m &= -\frac{2I_{DSS}}{V_{GS,off}} \left(1 - \frac{v_{GSQ}}{V_{GS,off}} \right) \end{aligned}$$

Parámetros internos del FET.

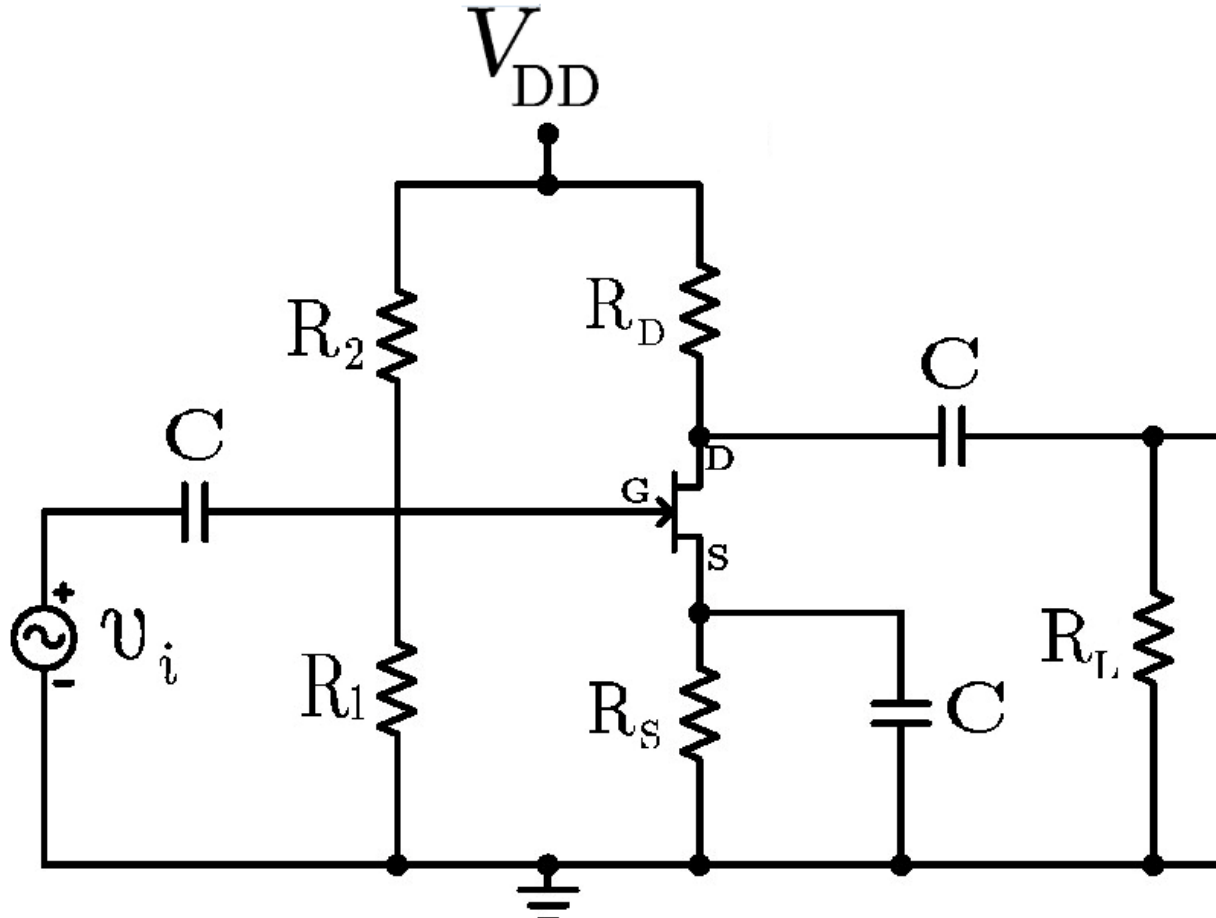
Impedancia de salida del JFET $r_{ds} = \frac{1}{y_{os}}$.

y_{os} : Admitancia de salida. Figura en las hojas de especificaciones.

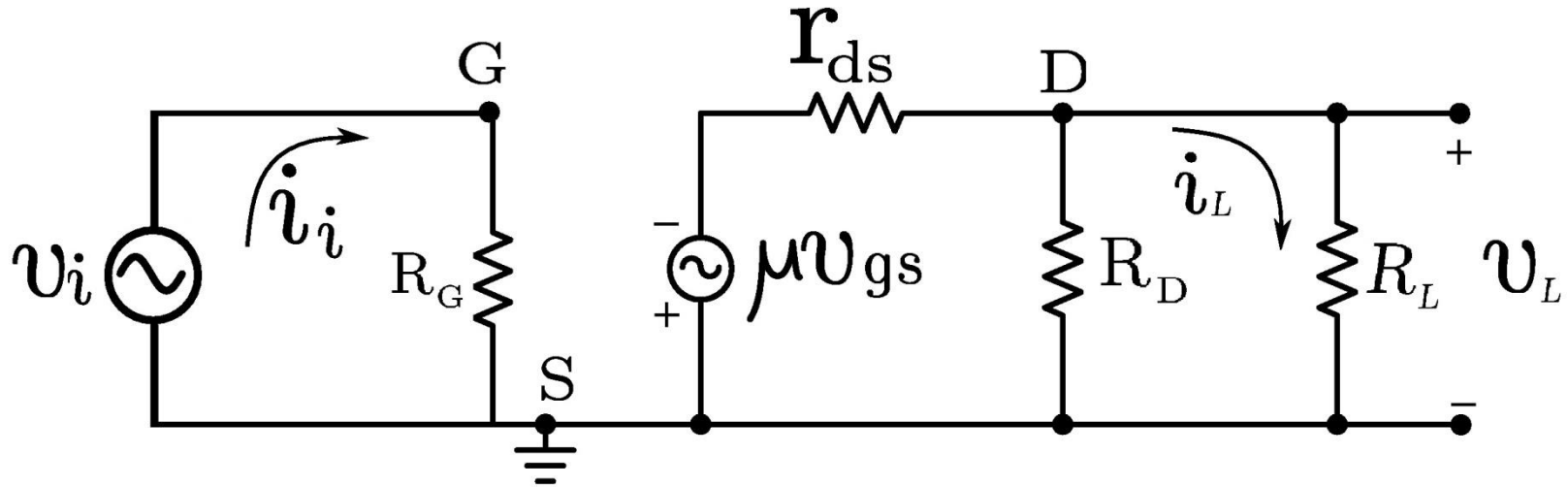


$$r_{ds} = \left. \frac{\Delta v_{DS}}{\Delta i_{DS}} \right|_{v_{GS} = Cte}$$

Etapa amplificadora surtidor Común.



Circuito equivalente amplif. Surtidor Común.



Impedancia de entrada y salida

$$Z_i = R_G = R_1 // R_2$$

$$Z_o|_{v_i=0} = R_D // r_{ds}$$

Ganancia tensión en surtidor común.

$$A_V = \frac{v_L}{v_i} = \frac{v_L}{v_{gs}} \times \frac{v_{gs}}{v_i}$$

$$v_L = \frac{-\mu v_{gs}}{r_{ds} + R_D // R_L} \times R_D // R_L \Rightarrow \frac{v_L}{v_{gs}} = \frac{-\mu}{r_{ds} + R_D // R_L} \times R_D // R_L$$

$$v_{gs} = v_i \quad \Rightarrow \quad \frac{v_{gs}}{v_i} = 1$$

$$A_V = \frac{-\mu}{r_{ds} + R_D // R_L} \times R_D // R_L \times 1 = \frac{-\mu}{r_{ds} + R_D // R_L} \times R_D // R_L$$

Ganancia tensión en surtidor común.

Si $r_{ds} \ll R_D // R_L$

$$A_V = \frac{-\mu}{\underbrace{r_{ds} + R_D // R_L}_{\text{despreciamos}}} \times R_D // R_L \cong \frac{-\mu}{R_D // R_L} \times R_D // R_L = -\mu$$

Si $r_{ds} \gg R_D // R_L$

$$A_V = \frac{-\mu}{r_{ds} + \underbrace{R_D // R_L}_{\text{despreciamos}}} \times R_D // R_L \cong -\frac{\mu}{r_{ds}} \times R_D // R_L = -\frac{\overset{\mu}{g_m} r_{ds}}{r_{ds}} \times R_D // R_L = -g_m \times R_D // R_L$$

Si $R_L \ll R_D$

$$A_V = -g_m \frac{R_D \times R_L}{R_D + \underbrace{R_L}_{\text{despreciamos}}} \simeq -g_m \frac{R_D \times R_L}{R_D} = -g_m R_L$$

Ganancia corriente en surtidor común.

$$A_i = A_V \frac{Z_i}{R_L} = -\mu \frac{R_D // R_L}{r_{ds} + R_D // R_L} \times \frac{R_G}{R_L}$$

$$\text{Si } R_D // R_L \ll r_{ds}$$

$$R_L \ll R_D$$

$$A_i = -\mu \frac{R_G}{r_{ds} + \underbrace{R_D // R_L}_{\text{despreciamos}}} \times \frac{R_D \times R_L}{\underbrace{R_D + R_L}_{\text{despreciamos}}} \times \frac{1}{R_L}$$

$$A_i \cong -\mu \frac{R_G}{r_{ds}} \times \frac{R_D}{R_D} = -\frac{\mu}{r_{ds}} R_G = -\frac{g_m r_{ds}}{r_{ds}} R_G = -g_m R_G$$

Reflexión de impedancia en transistores Bipolares y FET. Comparativa.

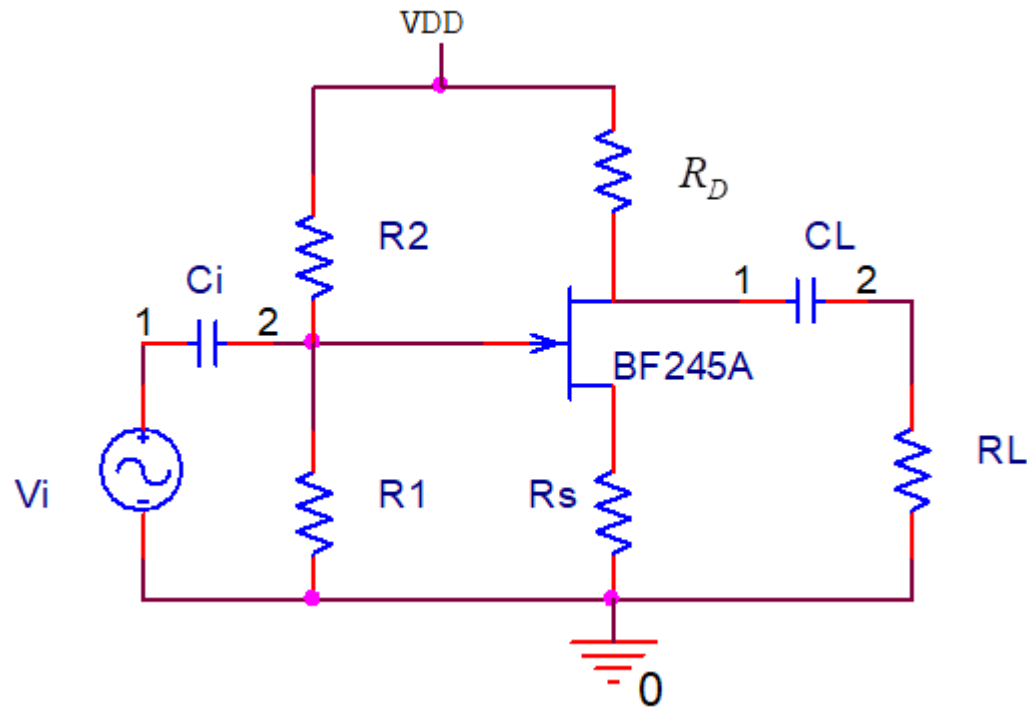
	Reflexión	Regla
BJT	$E - B$ $i_e \gg i_b$ $h_{fe} + 1$	<p><i>Visto desde el emisor. Las flechas indican lo que sucede en el circuito de base cuando lo reflejamos hacia el emisor.</i></p> $v = cte = \underbrace{I \times R}_{\begin{array}{c} \uparrow \quad \downarrow \\ \downarrow \quad \uparrow \end{array}}$ <p><i>Visto desde la base. Las flechas indican lo que sucede en el circuito de emisor cuando lo reflejamos hacia la base.</i></p>
FET	$D - S$ $v_d \gg v_s$ $\mu + 1$	$i = cte = \left. \frac{V \uparrow}{R \uparrow} \right\} a = \left. \frac{V \downarrow}{R \downarrow} \right\} b$

a : Cuando reflejamos lo que hay en el Surtidor hacia el Drenador

b : Cuando reflejamos lo que hay en el Drenador hacia el Surtidor

Configuración surtidor común sin capacitor de desacople de surtidor.

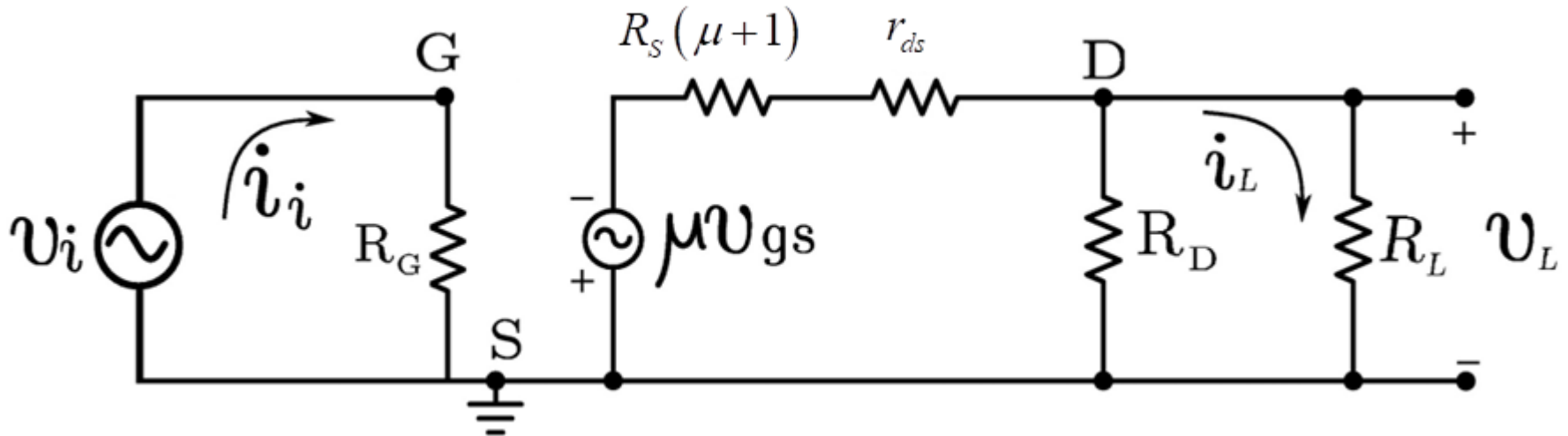
Finalidad : Aplicacion de la reflexion de impedancia en el FET.



Surtidor Común sin capacitor de desacople.

Impedancias de entrada y salida.

- *Observamos desde el drenador.*
- *Reflejamos lo que hay en el surtidor hacia el Drenador multiplicado por $\mu + 1$.*



$$Z_i = R_G = R_1 // R_2$$

$$Z_o|_{v_i=0} = R_D // [r_{ds} + R_S(\mu + 1)]$$

Surtidor Común sin capacitor de desacople.

Ganancia de tensión y corriente.

$$A_V = \frac{v_L}{v_i}$$

$$v_L = \frac{-\mu v_{gs}}{R_S(\mu+1) + r_{ds} + R_D // R_L} \times R_D // R_L \Rightarrow \frac{v_L}{v_{gs}} = -\mu \times \frac{R_D // R_L}{R_S(\mu+1) + r_{ds} + R_D // R_L}$$

como $v_{gs} = v_i$

$$A_V = -\mu \times \frac{R_D // R_L}{R_S(\mu+1) + r_{ds} + R_D // R_L}$$

$$A_i = \frac{i_L}{i_i} = \frac{\frac{v_L}{R_L}}{\frac{v_i}{Z_i}} = \frac{v_L}{R_L} \times \frac{Z_i}{v_i} = \frac{v_L}{v_i} \times \frac{Z_i}{R_L} = A_V \times \frac{Z_i}{R_L}$$

Bibliografía

- **Circuitos Electrónicos Discretos e Integrados,**
- Donald L. Schilling-Charles Belove.
- **Dispositivos Electrónicos,**
- Thomas L. Floyd.
- **Electrónica: Teoría de Circuitos y Dispositivos Electrónicos,**
- Robert L. Boylestad-Louis Nashelsky.
- **1100 Problemas de Electrónica Resueltos.**
- Ing Alberto Muhana