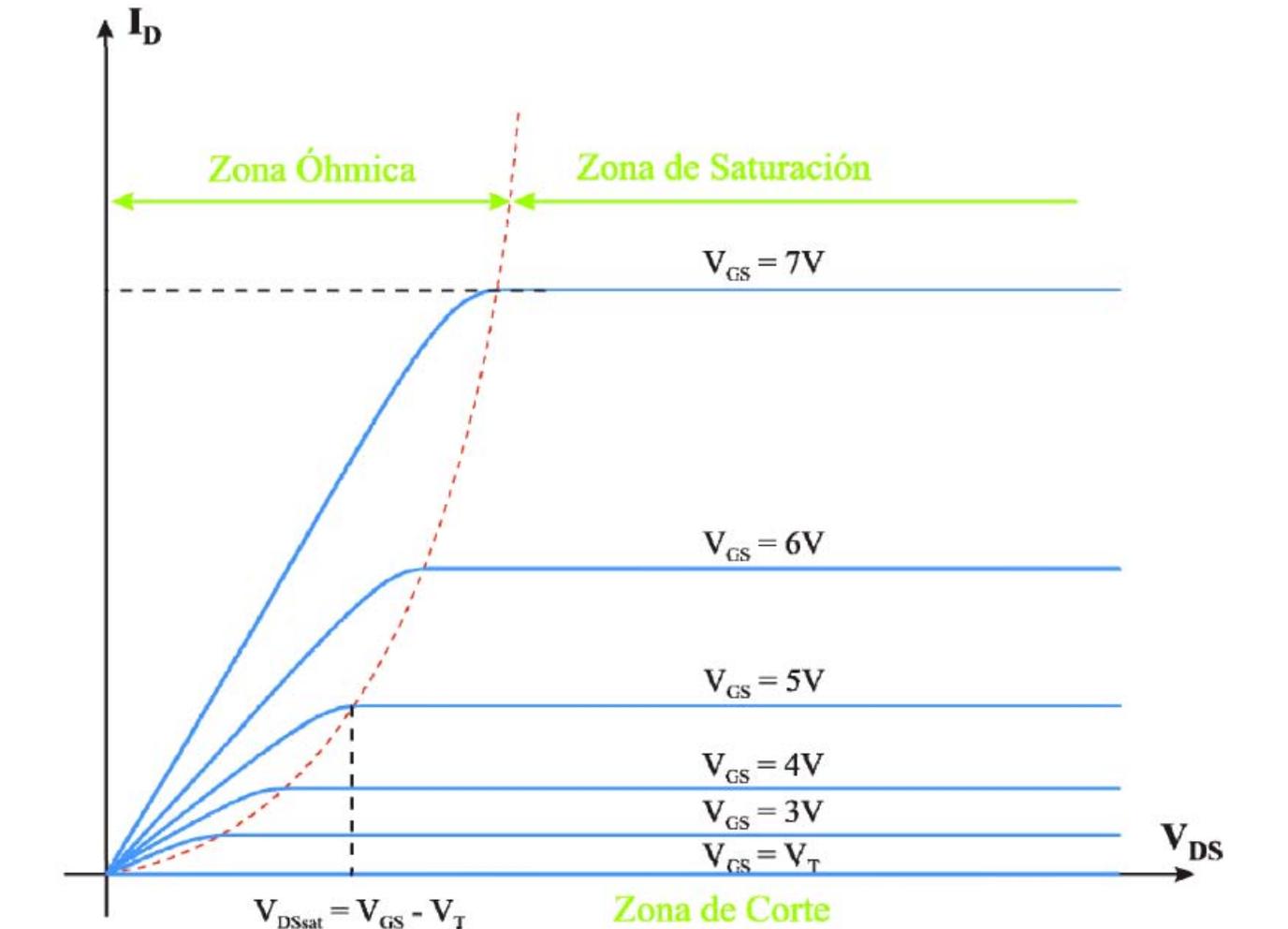


EL TRANSISTOR MOSFET

CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UN MOSFET CANAL N DE ENRIQUECIMIENTO



FORMA DE PRESENTACIÓN DE LAS ECUACIONES DEL MOSFET DE ENRIQUECIMIENTO

Se define $k'_n = \mu_n C_{ox}$

Para la región triodo (zona ohmica) $V_{GS} > V_t$ $V_{DS} < V_{GS} - V_t$ $V_{GD} > V_t$

$$i_D = k'_n \frac{W}{L} \left[(v_{GS} - V_t) v_{DS} - \frac{1}{2} v_{DS}^2 \right]$$

Para la región de saturación $V_{GS} \geq V_t$ $V_{DS} \geq V_{GS} - V_t$ $V_{GD} < V_t$

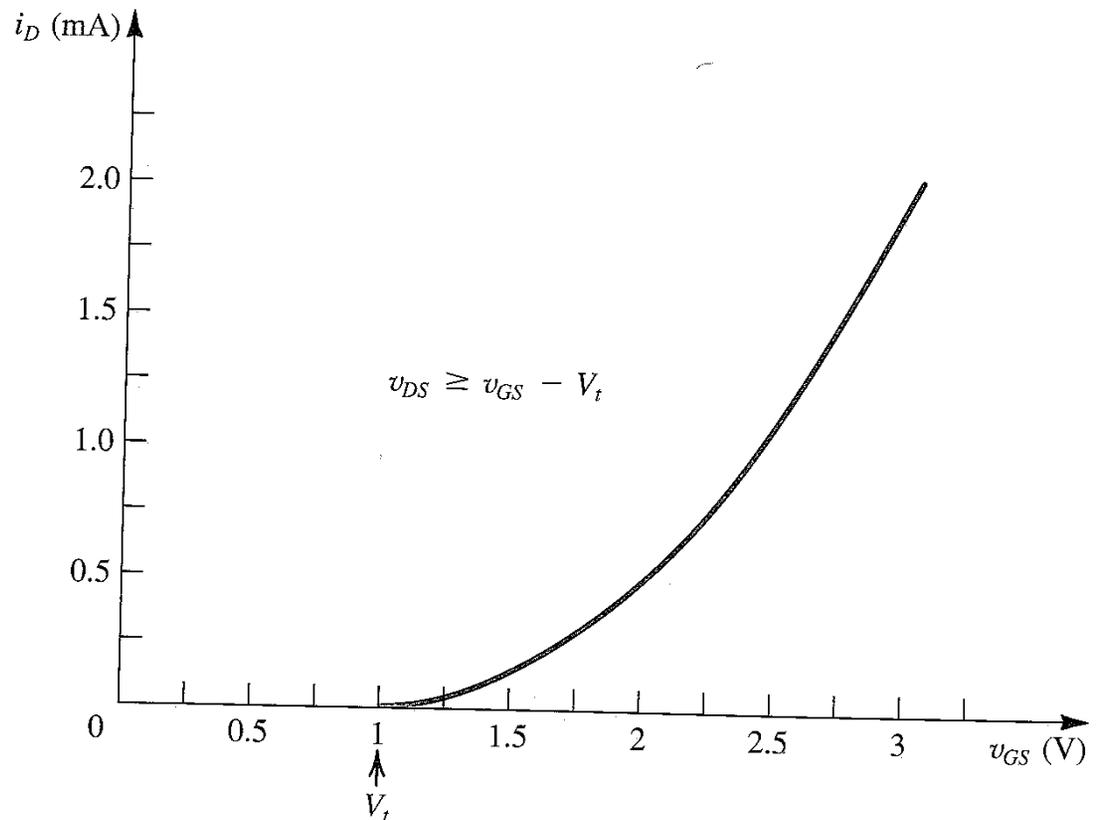
$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2$$

CARACTERÍSTICA DE TRANSFERENCIA i_D VS. V_{GS} DEL MOSFET DE ENRIQUECIMIENTO

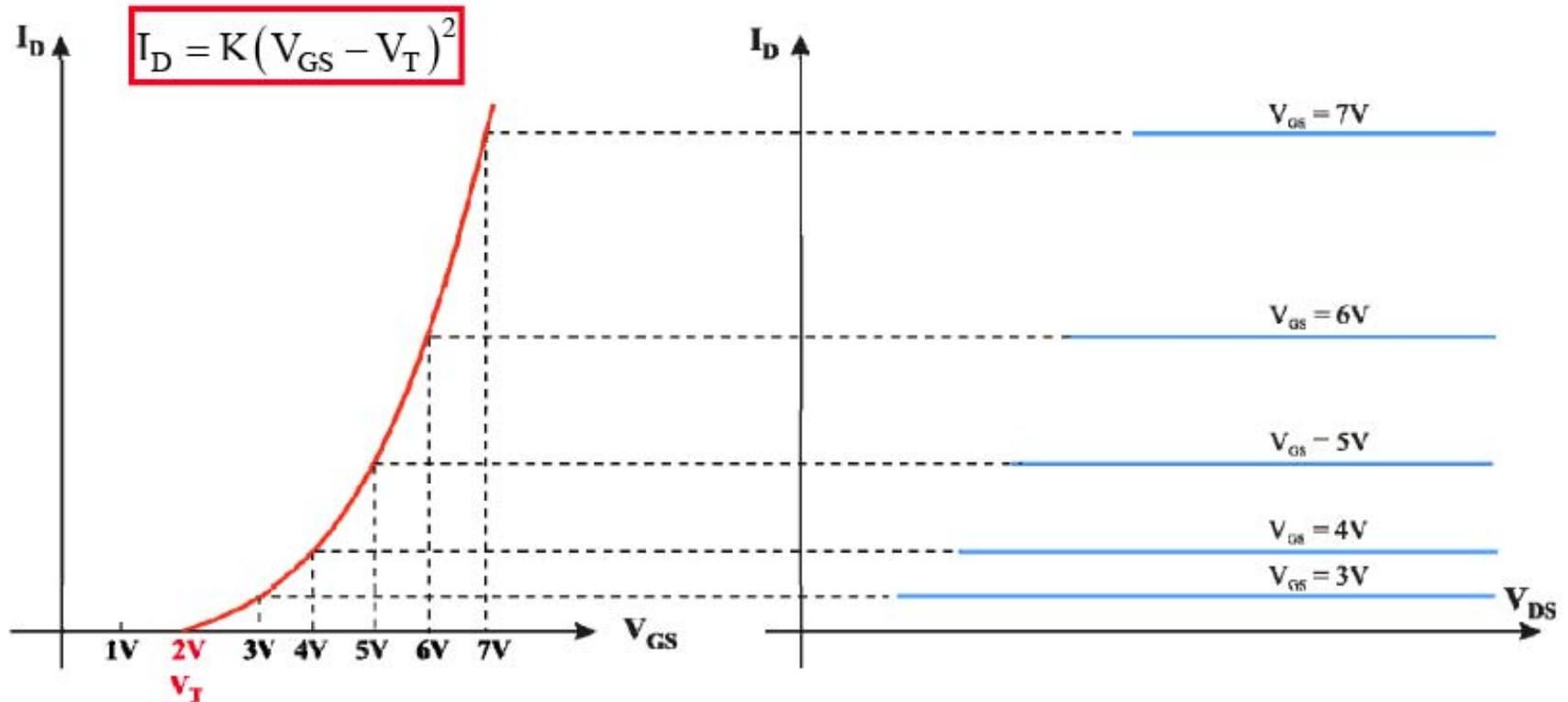
De la ecuación en la zona de saturación puede realizarse la gráfica de la corriente i_D vs. el voltaje v_{GS} en el límite entre las regiones.

$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2$$

En la región de saturación el MOSFET se comporta como una fuente de corriente cuyo valor está controlado por v_{GS} .



CARACTERÍSTICAS COMPLETAS DEL MOSFET TIPO N DE ENRIQUECIMIENTO



El MOSFET se comporta como una fuente de corriente cuyo valor está controlado por v_{GS}

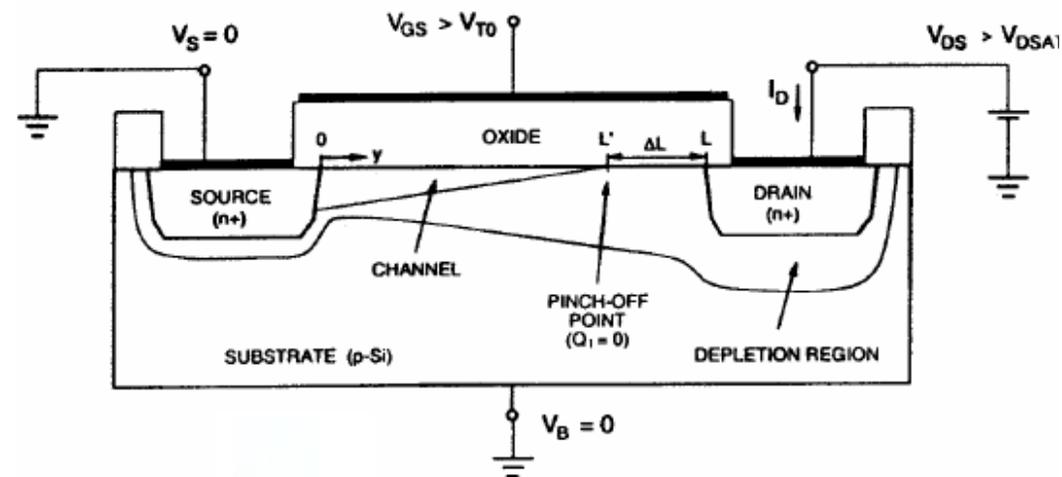
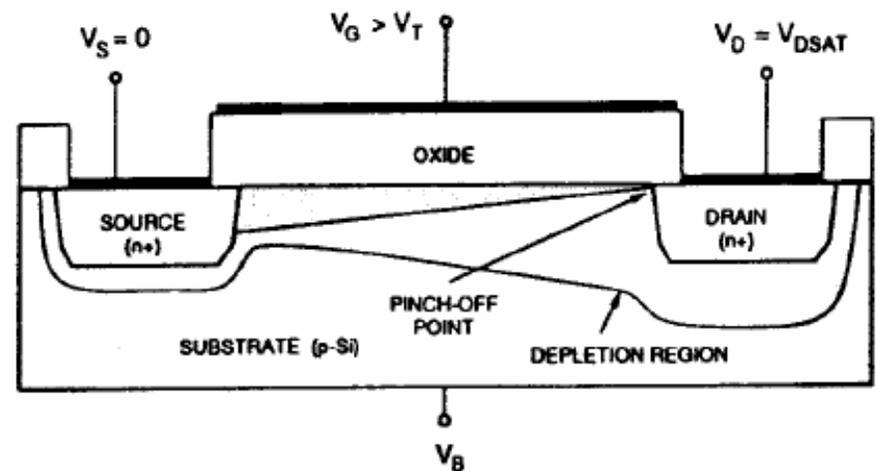
RESISTENCIA EN LA REGIÓN DE SATURACIÓN

* En la práctica, al aumentar v_{DS} se ve afectado el punto de pinch-off. La longitud del canal se reduce (**modulación de la longitud del canal**).

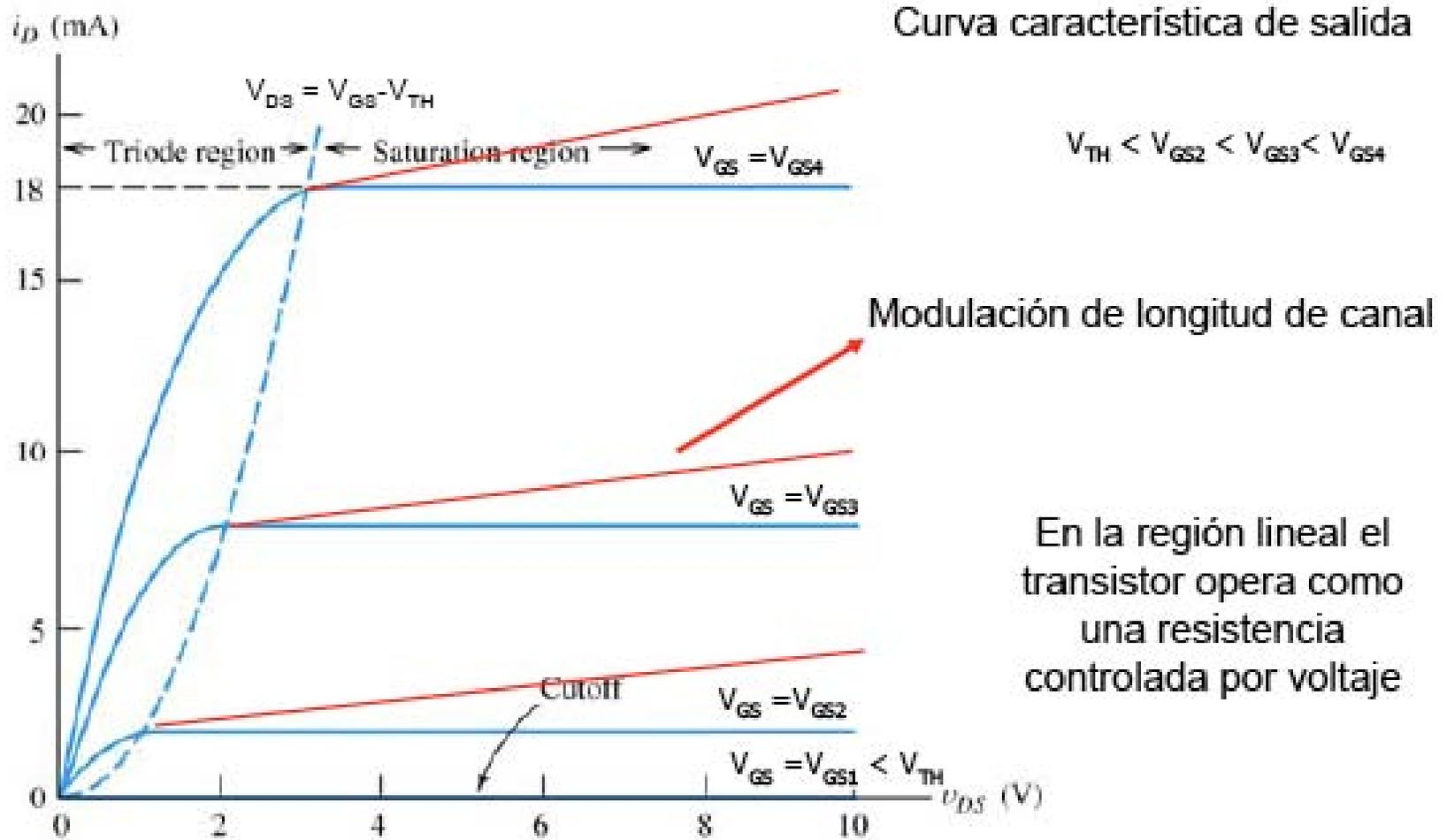
* La corriente i_D es inversamente proporcional a la longitud del canal y aumenta.

$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2 (1 + \lambda v_{DS})$$

λ es un parámetro que depende de la tecnología utilizada y es inversamente proporcional a la longitud del canal.



CARACTERÍSTICAS REALES DE SALIDA DE UN MOSFET TIPO ENRIQUECIMIENTO CONSIDERANDO LA MODULACIÓN DEL CANAL



Curva característica de salida

$$V_{TH} < V_{GS2} < V_{GS3} < V_{GS4}$$

En la región lineal el transistor opera como una resistencia controlada por voltaje

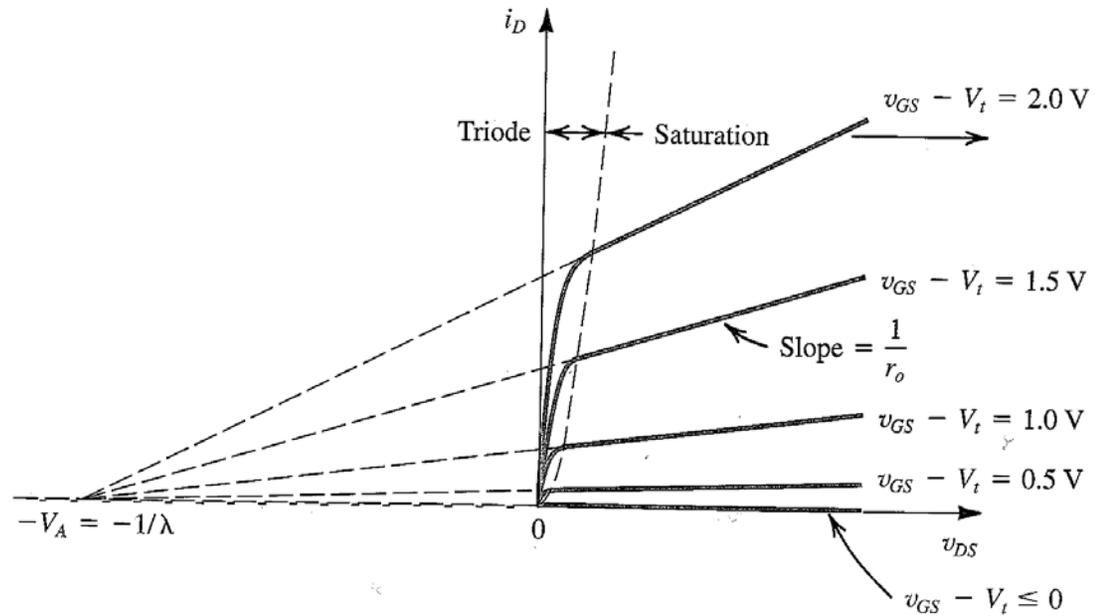
EXTRAPOLACIÓN DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DEL MOSFET

La intersección de la extrapolación de las curvas ocurre en $V_A = 1/\lambda$.

La resistencia de salida es

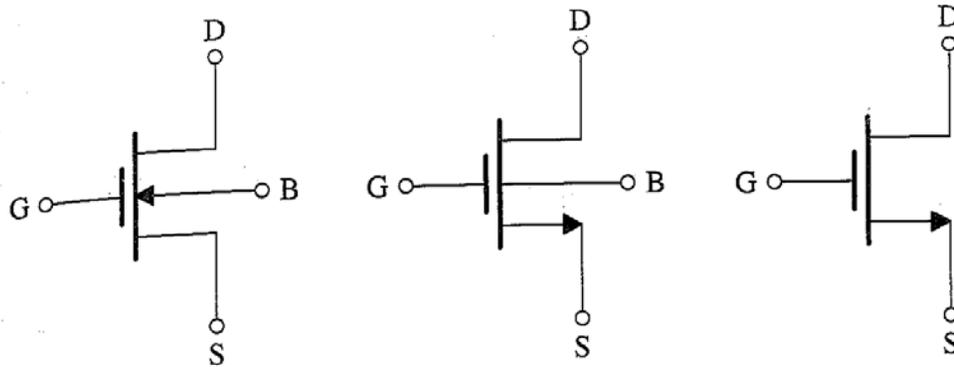
$$r_o \equiv \left[\frac{\partial i_D}{\partial v_{DS}} \right]_{v_{GS} \text{ constant}}^{-1}$$

$$r_o = \left[\lambda \frac{k'_n W}{2 L} (V_{GS} - V_t)^2 \right]^{-1} = \frac{1}{\lambda I_D} = \frac{V_A}{I_D}$$

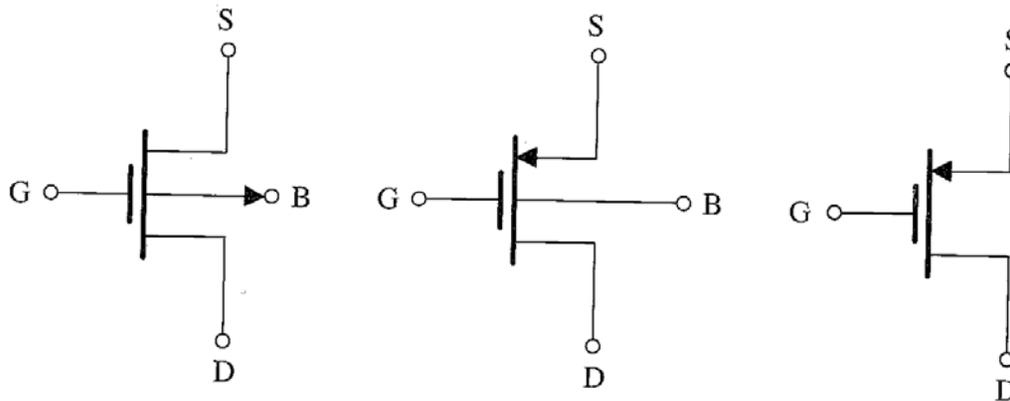


SÍMBOLOS CIRCUITALES

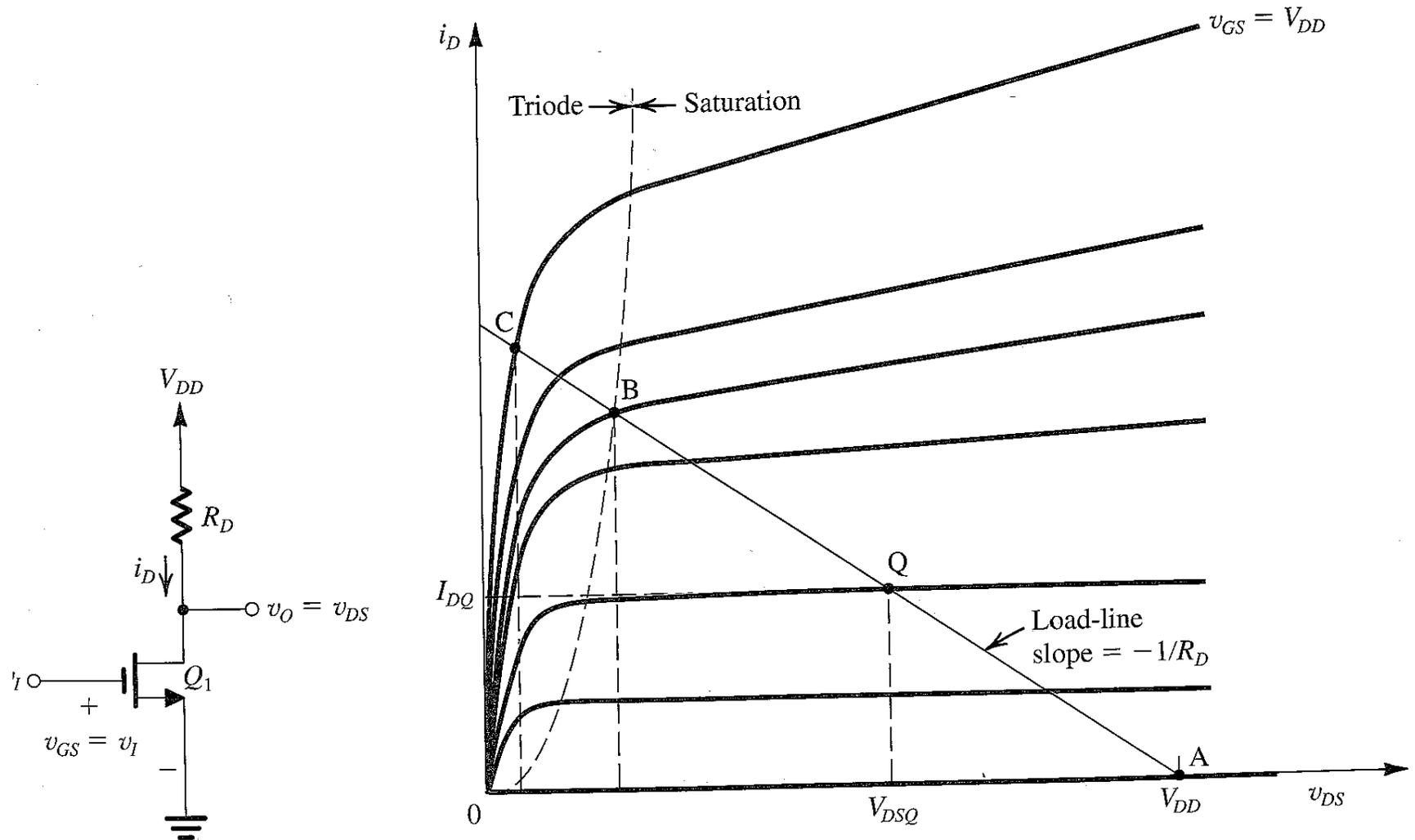
Para el NMOS de enriquecimiento (MOSTET canal N)



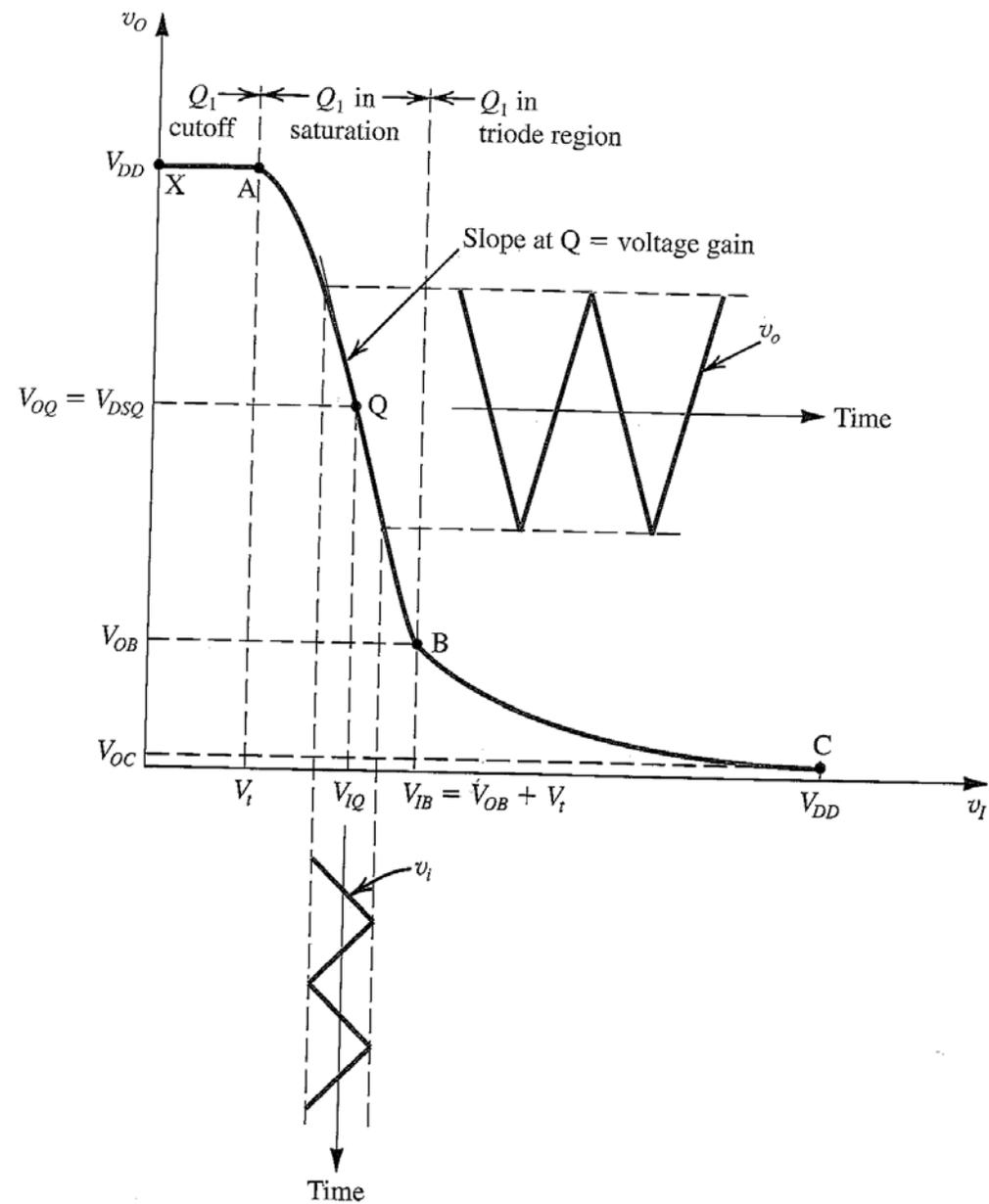
Para el PMOS de enriquecimiento (MOSTET canal P)



POLARIZACIÓN : RECTA DE CARGA



CARACTERÍSTICA DE TRANSFERENCIA. GRAN SEÑAL



EL MOSFET COMO AMPLIFICADOR

En saturación: Corriente DC (polarización)

$$I_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 \quad V_D > V_{GS} - V_t$$

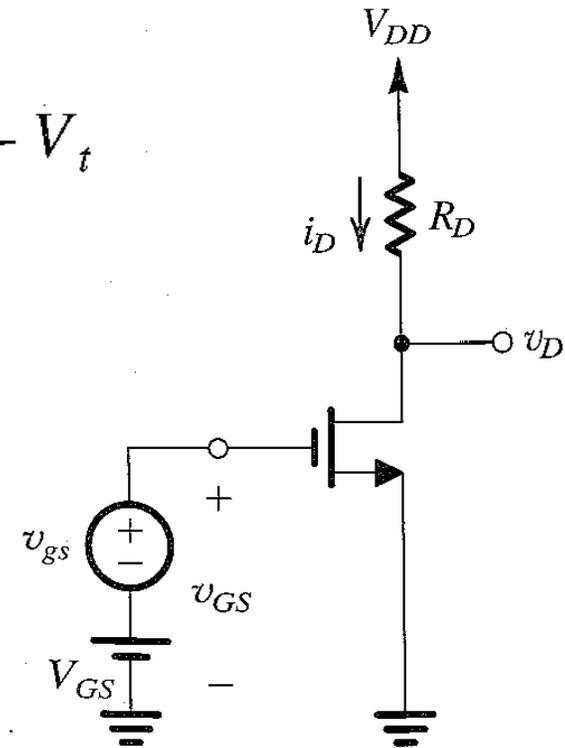
$$V_D = V_{DD} - R_D I_D$$

Al aplicar la fuente AC:

$$v_{GS} = V_{GS} + v_{gs}$$

$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} + v_{gs} - V_t)^2$$

$$= \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 + k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t) v_{gs} + \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} v_{gs}^2$$



Si v_{gs} se mantiene lo suficientemente pequeño, se pueden tomar en cuenta solo los dos primeros términos. En caso contrario: distorsión

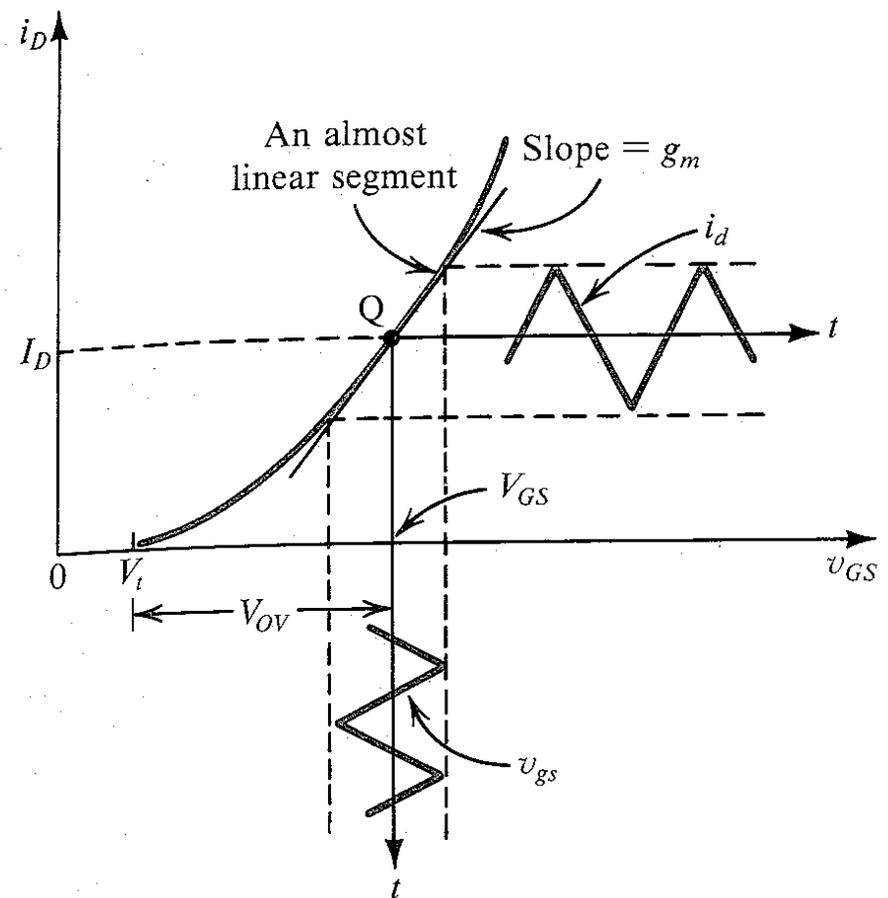
$$\frac{1}{2}k'_n \frac{W}{L} v_{gs}^2 \ll k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t) v_{gs} \quad v_{gs} \ll 2(V_{GS} - V_t)$$

Entonces: $i_D \approx I_D + i_d$

$$i_d = k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t) v_{gs}$$

$$g_m \equiv \frac{i_d}{v_{gs}} = k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)$$

$$g_m \equiv \left. \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}} \right|_{v_{GS} = V_{GS}}$$



Otras expresiones para g_m

$$I_D = \frac{1}{2} k_n' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 \quad (V_{GS} - V_t) = \sqrt{\frac{2I_D}{k_n' \frac{W}{L}}}$$

Sustituyendo en la expresión de g_m

$$g_m = k_n' \frac{W}{L} \sqrt{\frac{2I_D}{k_n' \frac{W}{L}}} = \sqrt{2k_n' \frac{W}{L} I_D}$$

Una tercera expresión:

$$k_n' \frac{W}{L} = \frac{2I_D}{(V_{GS} - V_t)^2}$$

$$g_m = \frac{2I_D}{(V_{GS} - V_t)^2} (V_{GS} - V_t) = \frac{2I_D}{(V_{GS} - V_t)}$$

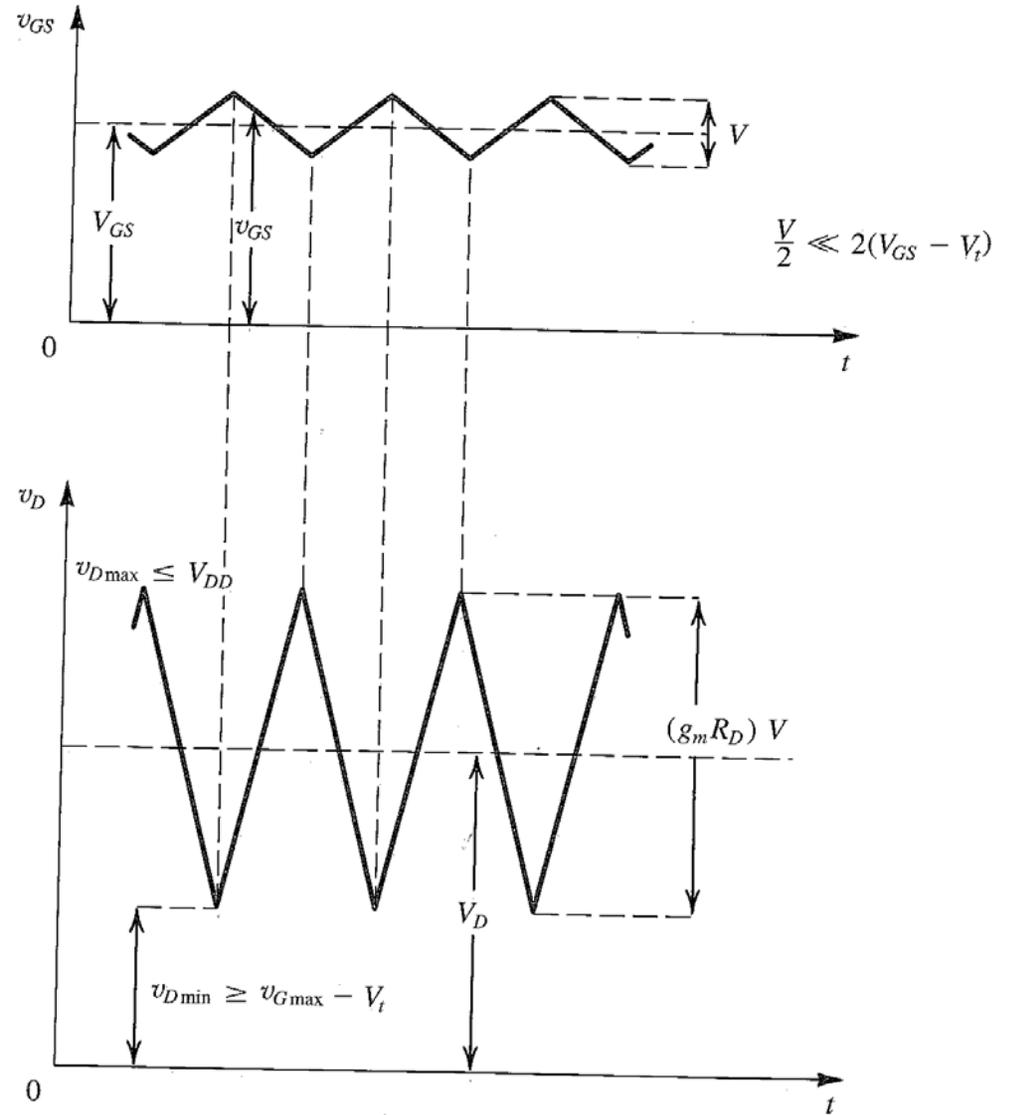
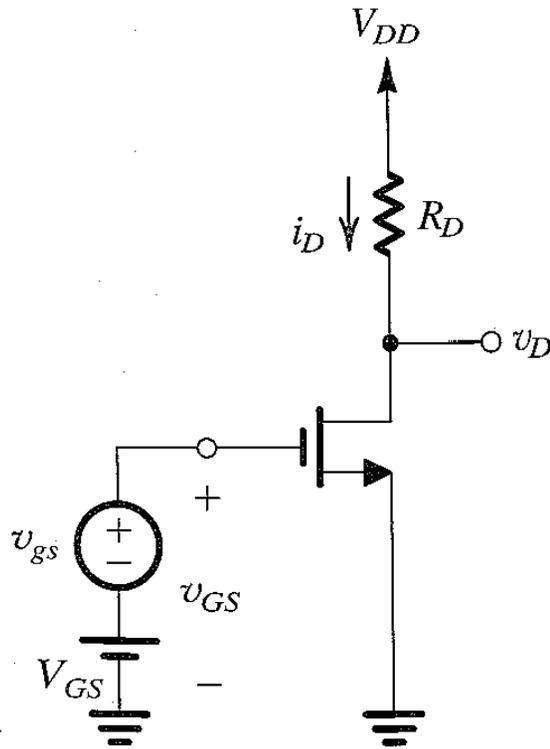
Ganancia de voltaje

$$v_D = V_{DD} - R_D i_D \quad v_D = V_{DD} - R_D (I_D + i_d)$$

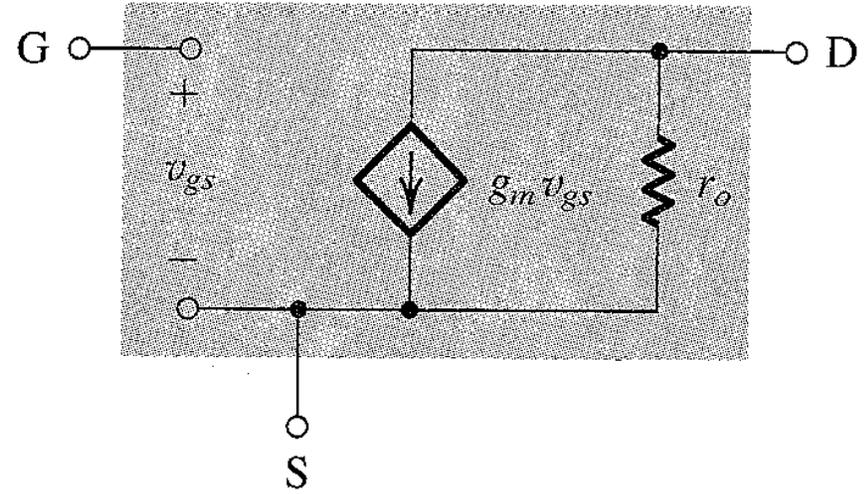
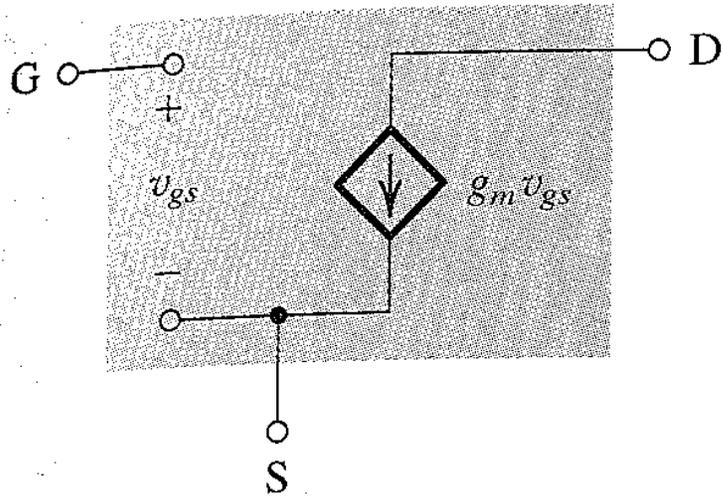
$$v_D = V_D - R_D i_d$$

$$v_d = -i_d R_D = -g_m v_{gs} R_D$$

$$A_v \equiv \frac{v_d}{v_{gs}} = -g_m R_D$$



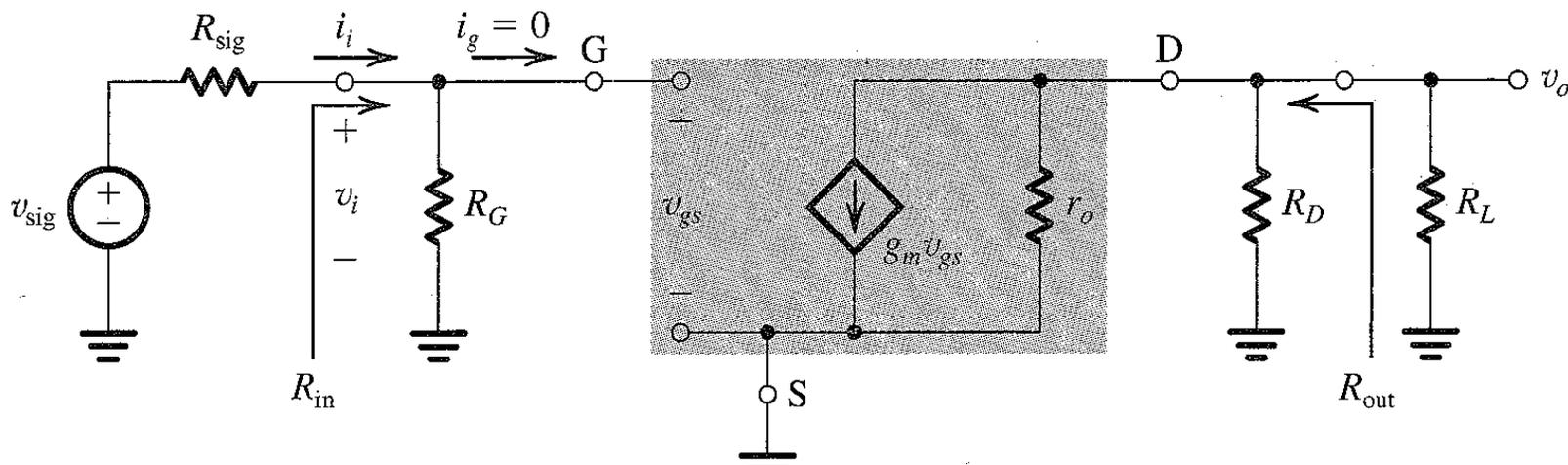
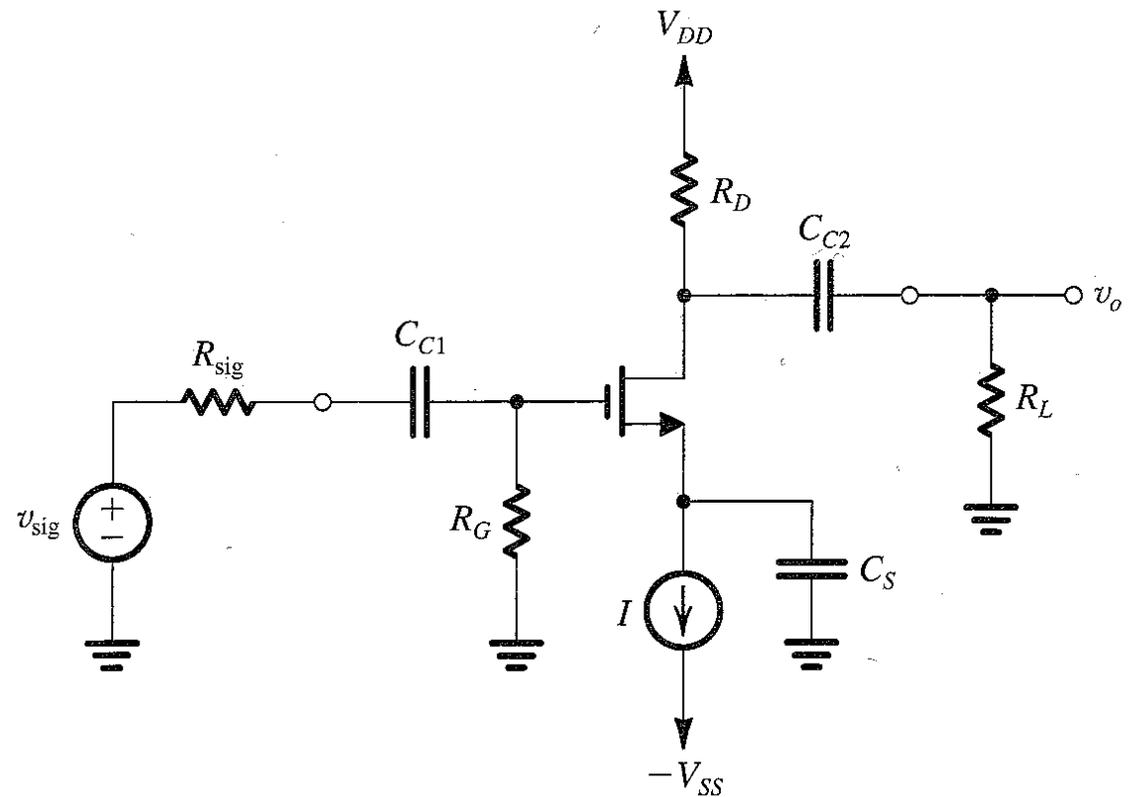
MODELO EQUIVALENTE DE PEQUEÑA SEÑAL



AMPLIFICADOR SOURCE COMÚN

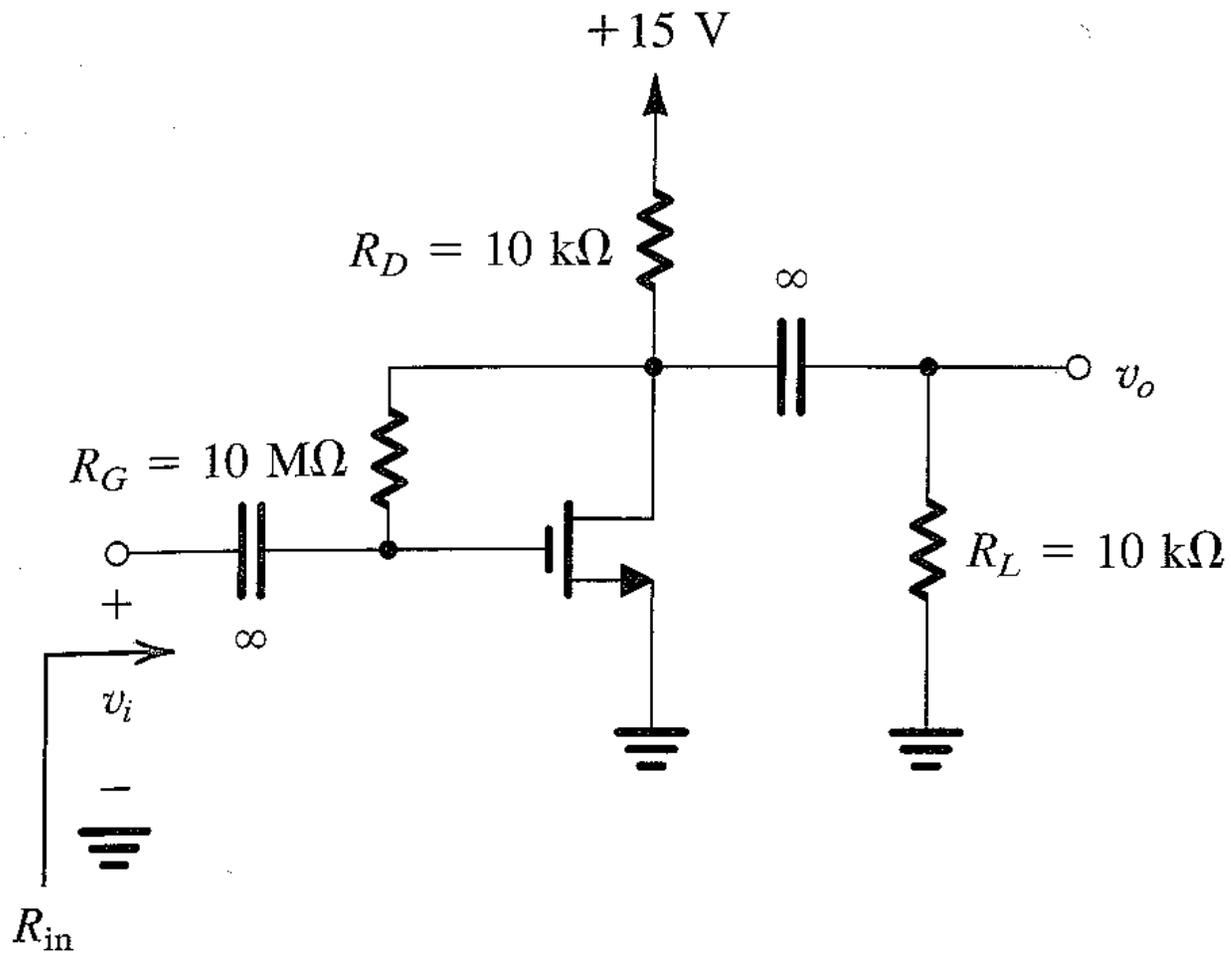
En DC: Punto de
operación Q

En AC: Ganancia de
voltaje, ganancia de
corriente, impedancia
de entrada e
impedancia de salida.



Ejercicio de Amplificador Source Común

$V_{th} = 1,5V$ $k'(W/L) = 0,25 \text{ mA/V}^2$, $V_A = 50V$



Punto de operación. Suponemos que el MOSFET está en saturación

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 \quad I_D = \frac{1}{2} \times 0.25 (V_{GS} - 1.5)^2$$

Como la corriente de Gate es cero no hay caída de voltaje en R_G , por lo tanto $V_D = V_G$. El voltaje de Source es cero. Entonces $V_{GS} = V_G = V_D$

$$I_D = 0.125 (V_D - 1.5)^2 \quad V_D = 15 - R_D I_D = 15 - 10 I_D$$

Resolviendo $I_D = 1.06 \text{ mA}$ $V_D = 4.4 \text{ V}$

Cálculo de los parámetros

$$g_m = k_n' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t) = 0.25 (4.4 - 1.5) = 0.725 \text{ mA/V}$$

$$r_o = \frac{V_A}{I_D} = \frac{50}{1.06} = 47 \text{ k}\Omega$$

Resolución de la ecuación de segundo grado

$$I_D = 0,125 (V_D - 1,5)^2 \quad V_D = 15 - 10I_D$$

$$I_D = 0,125 (15 - 10I_D - 1,5)^2 \quad I_D = 0,125 (13,5 - 10I_D)^2$$

$$8I_D = (13,5 - 10I_D)^2 \quad 8I_D = 182,25 - 270I_D + 100I_D^2$$

$$100I_D^2 - 278I_D + 182,25 = 0 \quad I_D^2 - 2,78I_D + 1,8225 = 0$$

$$I_D = \frac{2,78 \pm \sqrt{(2,78)^2 - 4 \times 1,8225}}{2} = \frac{2,78 \pm 0,66212}{2}$$

$$I_{D1} = 1,72 \text{ mA} \quad I_{D2} = 1,06 \text{ mA}$$

Para $I_{D1} = 1,72 \text{ mA}$

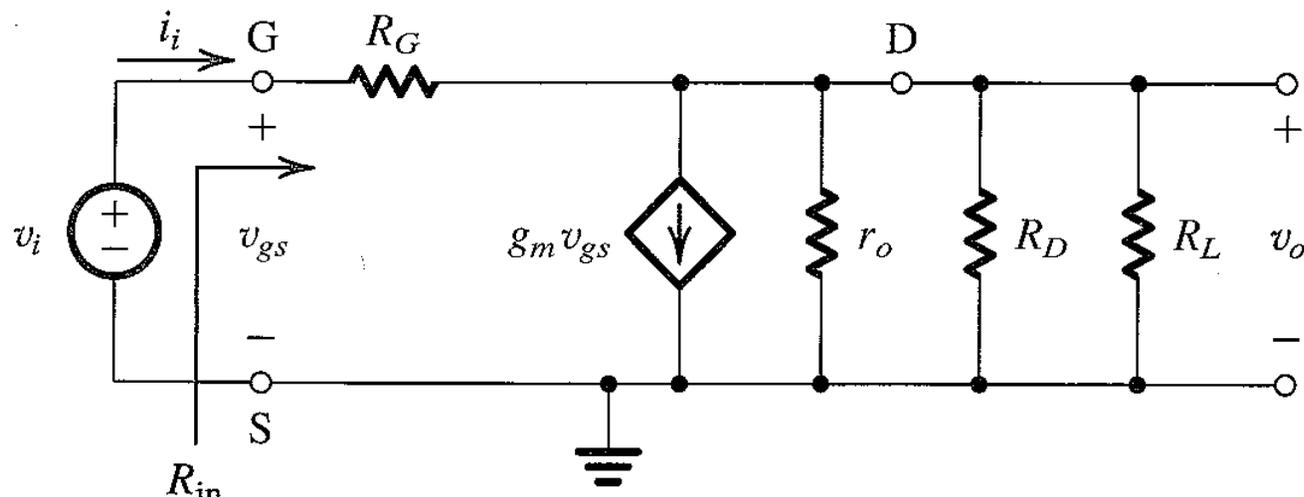
$$V_{GS} = V_D = 15 - 10 I_{D1} = -2,2 \text{ V} \quad \text{No v\u00e1lido}$$

Para $I_{D2} = 1,06 \text{ mA}$

$$V_{GS} = V_D = 15 - 10 I_{D2} = +4,4 \text{ V}$$

$$V_{GD} = 0 < V_T$$

* Circuito de peque\u00f1a se\u00f1al



Cálculo de A_v

$$R_p = r_o \parallel R_D \parallel R_L \quad \frac{v_i - v_o}{R_G} = g_m v_{gs} + \frac{v_o}{R_p}$$

$$v_{gs} = v_i \quad \frac{v_i}{R_G} - \frac{v_o}{R_G} = g_m v_i + \frac{v_o}{R_p}$$

$$v_i \left(-g_m + \frac{1}{R_G} \right) = v_o \left(\frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_G} \right)$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-g_m + \frac{1}{R_G}}{\frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_G}}$$

Para R_G con valor elevado (en este caso $R_G = 10M\Omega$)

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -g_m R_p$$

Es la solución del libro

¿Es aceptable la aproximación?

$$R_p = 10 \parallel 10 \parallel 47 = 4,5 \text{ k}$$

$$A_{v_1} = \frac{-0,725 + \frac{1}{10.000}}{\frac{1}{4,5} + \frac{1}{10.000}} = -3,26$$

$$A_{v_2} = -g_m R_p = -3,262$$

Es aceptable. Si R_G tiene un valor elevado, puede despreciarse esta resistencia en los cálculos de la ganancia de voltaje.

Resistencia de entrada $R_{in} = v_i/i_i$

$$i_{in} = \frac{v_{in} - v_o}{R_G} \quad v_o = -g_m R_p v_{in}$$

$$i_{in} = \frac{v_{in} + g_m R_p v_{in}}{R_G} = \frac{v_{in} (1 + g_m R_p)}{R_G}$$

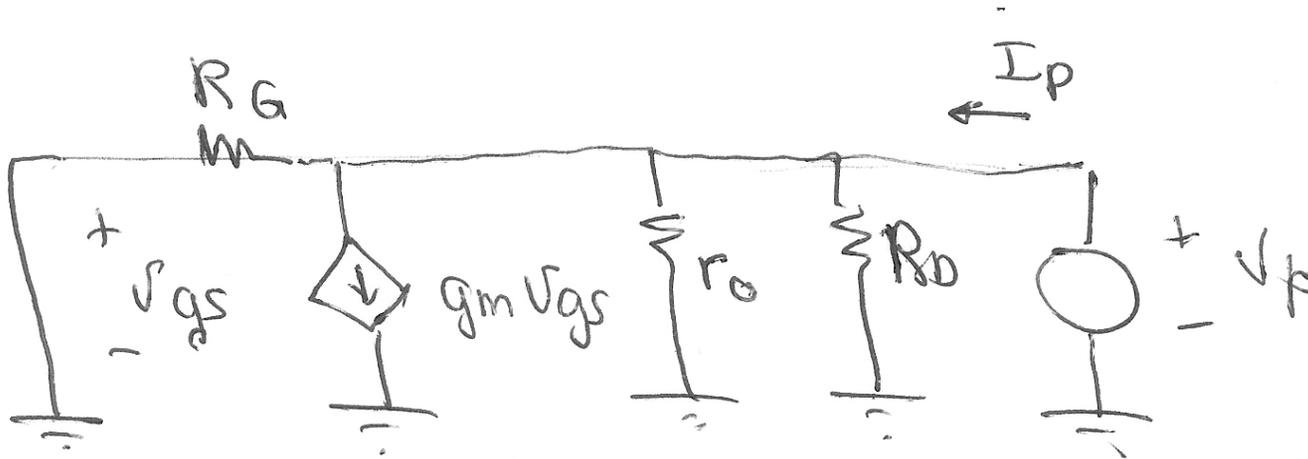
$$R_{in} = \frac{v_{in}}{i_{in}} = \frac{R_G}{1 + g_m R_p} = 2,33 \text{ M}\Omega$$

De otra forma:

$$i_i = (v_i - v_o)/R_G = \frac{v_i}{R_G} \left(1 - \frac{v_o}{v_i}\right) = \frac{v_i}{R_G} [1 - (-3.3)] = \frac{4.3 v_i}{R_G}$$

$$R_{in} \equiv \frac{v_i}{i_i} = \frac{R_G}{4.3} = \frac{10}{4.3} = 2.33 \text{ M}\Omega$$

Resistencia de salida



$$R_o = V_p / I_p \quad v_{gs} = 0$$

$$R_o = R_D // r_o = 47 // 10 = 8,25 \text{ k}\Omega$$

*** Ganancia de corriente**

$$i_{in} = \frac{v_{in}}{R_{in}} \quad i_o = \frac{v_o}{R_L}$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_{in}} = \frac{v_o}{R_L} \cdot \frac{R_{in}}{v_{in}} = A_v \frac{R_{in}}{R_L}$$

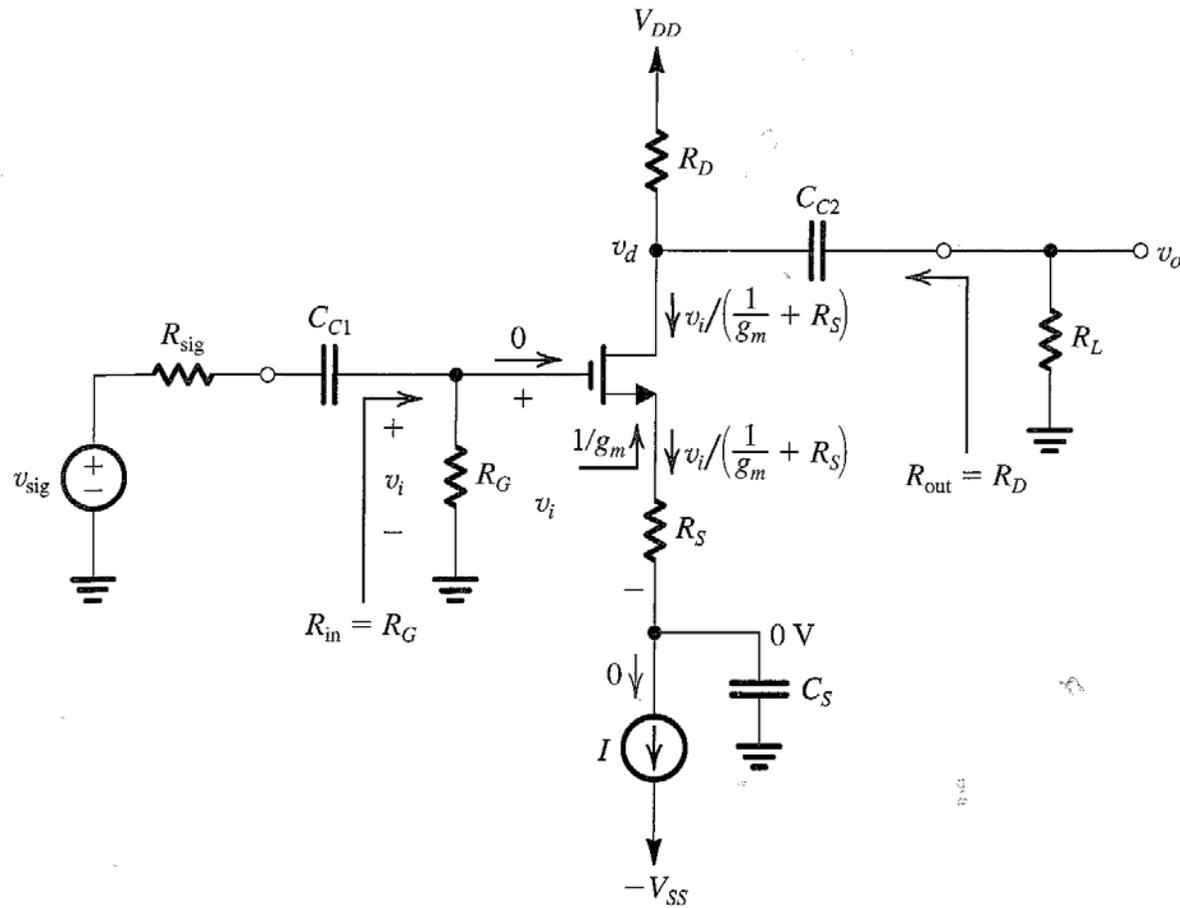
$$A_i = (-3,26) \frac{2,33 \times 10^3}{10} = -759,3$$

Es muy elevada

CONCLUSIONES SOBRE EL AMPLIFICADOR SOURCE COMÚN

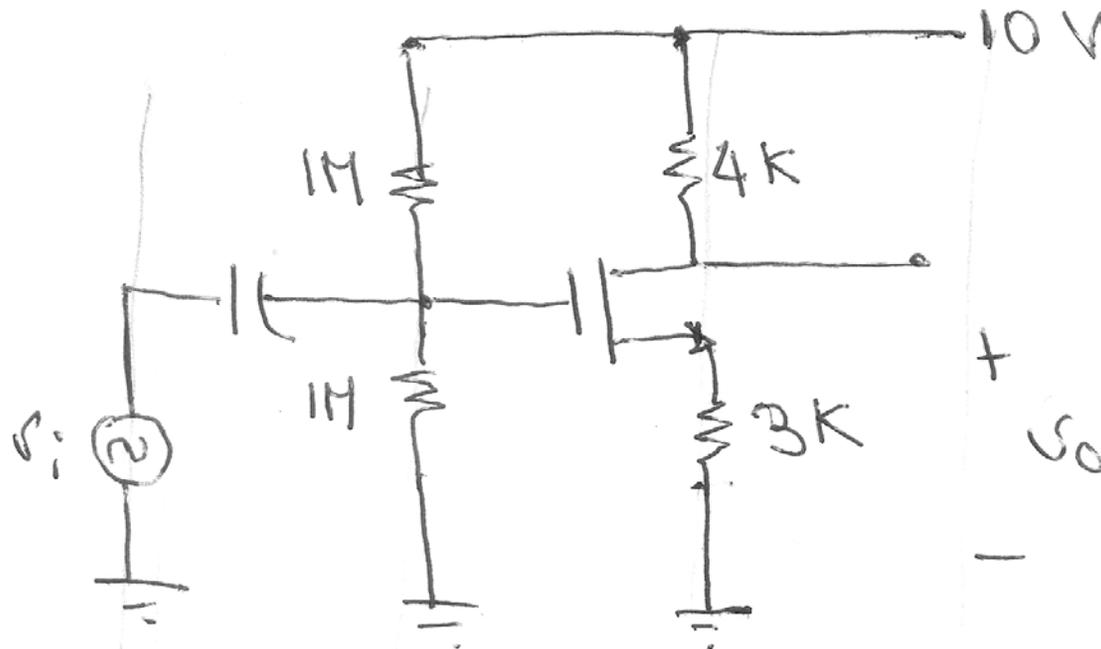
- * La ganancia del amplificador Source Común es relativamente elevada, y la señal de salida presenta un desfase de 180° con respecto a la de entrada, según indica el signo negativo que se obtiene en la relación de A_v .
- * La impedancia de entrada depende de las resistencias de polarización, por lo que se seleccionan valores elevados, del orden de las unidades o decenas de $M\Omega$, para obtener la resistencia de entrada mas alta posible.
- * La impedancia de salida depende de la resistencia de Drain, lo cual hace que presente un valor relativamente alto.

EL AMPLIFICADOR SOURCE COMÚN CON RESISTENCIA DE SOURCE



EJEMPLO DE AMPLIFICADOR SOURCE COMÚN CON RESISTENCIA DE SOURCE

Para el siguiente amplificador, determine la ganancia de voltaje, la ganancia de corriente, la resistencia de entrada y la resistencia de salida.



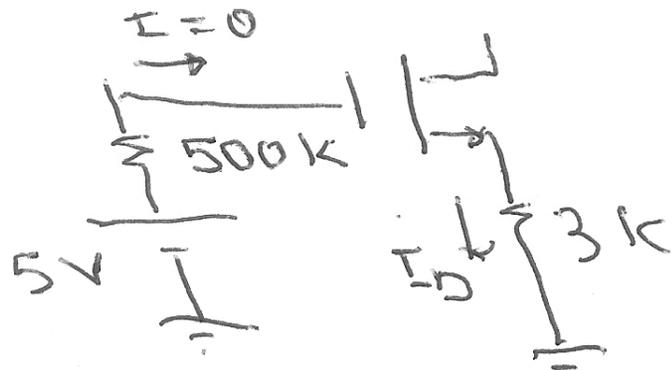
$$K_n' \frac{W}{L} = 2 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$V_t = 1\text{V}$$

Análisis del circuito Gate-Source

$$V_{GG} = \frac{1M}{2M} \times 10V = 5V$$

$$R_{GG} = 1M \parallel 1M = 500k\Omega$$



$$5V = V_{GS} + 3k I_D$$

$$V_{GS} = 5 - 3I_D$$

Si el MOSFET está en saturación:

$$I_D = \frac{1}{2} k_n' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2$$

$$I_D = \frac{1}{2} 2 (5 - 3I_D - 1)^2 = (4 - 3I_D)^2$$

Resolución de la ecuación

$$I_D = 16 - 24 I_D + 9 I_D^2$$

$$9 I_D^2 - 25 I_D + 16 = 0$$

$$I_D = \frac{25 \pm \sqrt{625 - 576}}{2 \times 9} = \frac{25 \pm 7}{18}$$

$$I_{D1} = 1,78 \text{ mA} \quad V_{GS1} = 5 - 3I_D = -1,06 \text{ No válido}$$

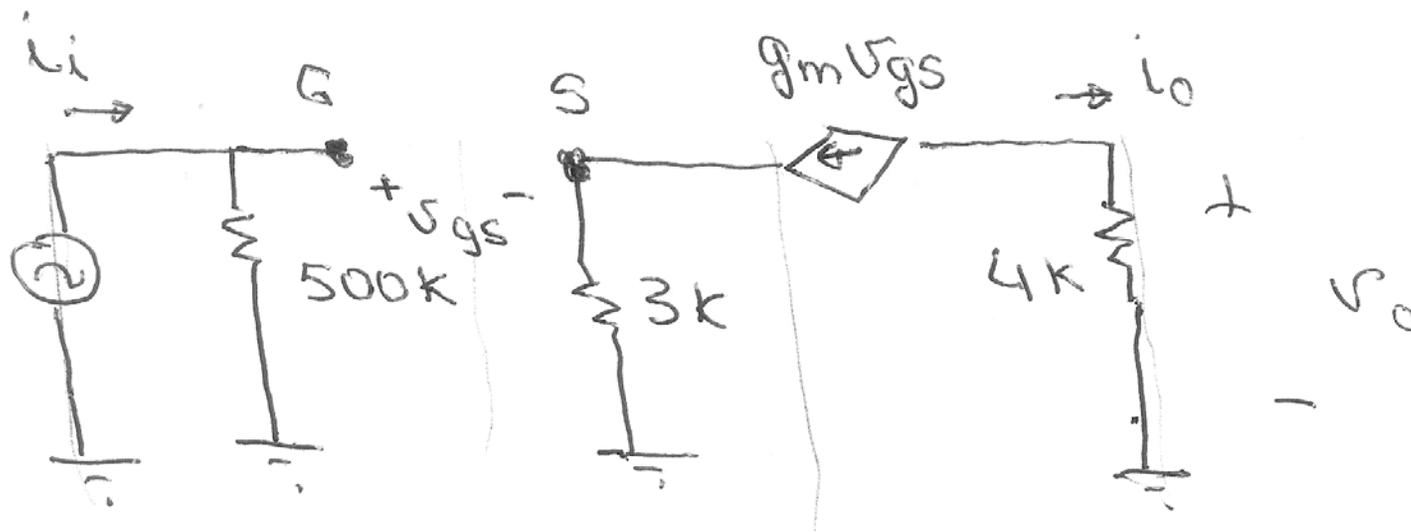
$$I_{D2} = 1 \text{ mA} \quad V_{GS2} = 5 - 3I_D = 2 \text{ Válido}$$

$$V_D = 10 - 4I_D = 6 \text{ V}$$

$$V_{DS} = 10 \text{ V} - (R_D + R_E)I_D = 3 \text{ V}$$

Punto de operación: $I_D = 1 \text{ mA}$, $V_{DS} = 3 \text{ V}$, $V_{GS} = 2 \text{ V}$

Modelo de pequeña señal



Cálculo del parámetro g_m

$$g_m = k_n' \frac{W}{L} (V_{gs} - V_t) = 2 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2} (2\text{V} - 1\text{V}) = 2 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$g_m = \sqrt{2 k_n' \frac{W}{L} I_D} = \sqrt{2 \times 2 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2} \times 1\text{mA}} = 2 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

Ganancia de voltaje

$$v_o = -g_m v_{gs} 4k$$

$$v_g = v_i$$

$$v_s = 3k g_m v_{gs}$$

$$v_{gs} = v_i - 3 g_m v_{gs}$$

$$v_{gs} (1 + 3 g_m) = v_i$$

$$v_{gs} = \frac{v_i}{(1 + 3 g_m)}$$

$$v_o = - \frac{g_m 4}{1 + 3 g_m} v_i$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-2 \times 4}{1 + 3 \times 2} = -\frac{8}{7} = -1,14$$

Ganancia de corriente

$$i_o = \frac{v_o}{4} \quad i_i = \frac{v_i}{500}$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{v_o}{4} \frac{500}{v_i} = -1,14 \times \frac{500}{4} = \sim 142,9$$

Resistencia de entrada: Por inspección

$$R_i = 500 \text{ k}\Omega$$

Resistencia de salida: Si $v_{gs} = 0$ resulta

$$R_o = 4 \text{ k}\Omega$$