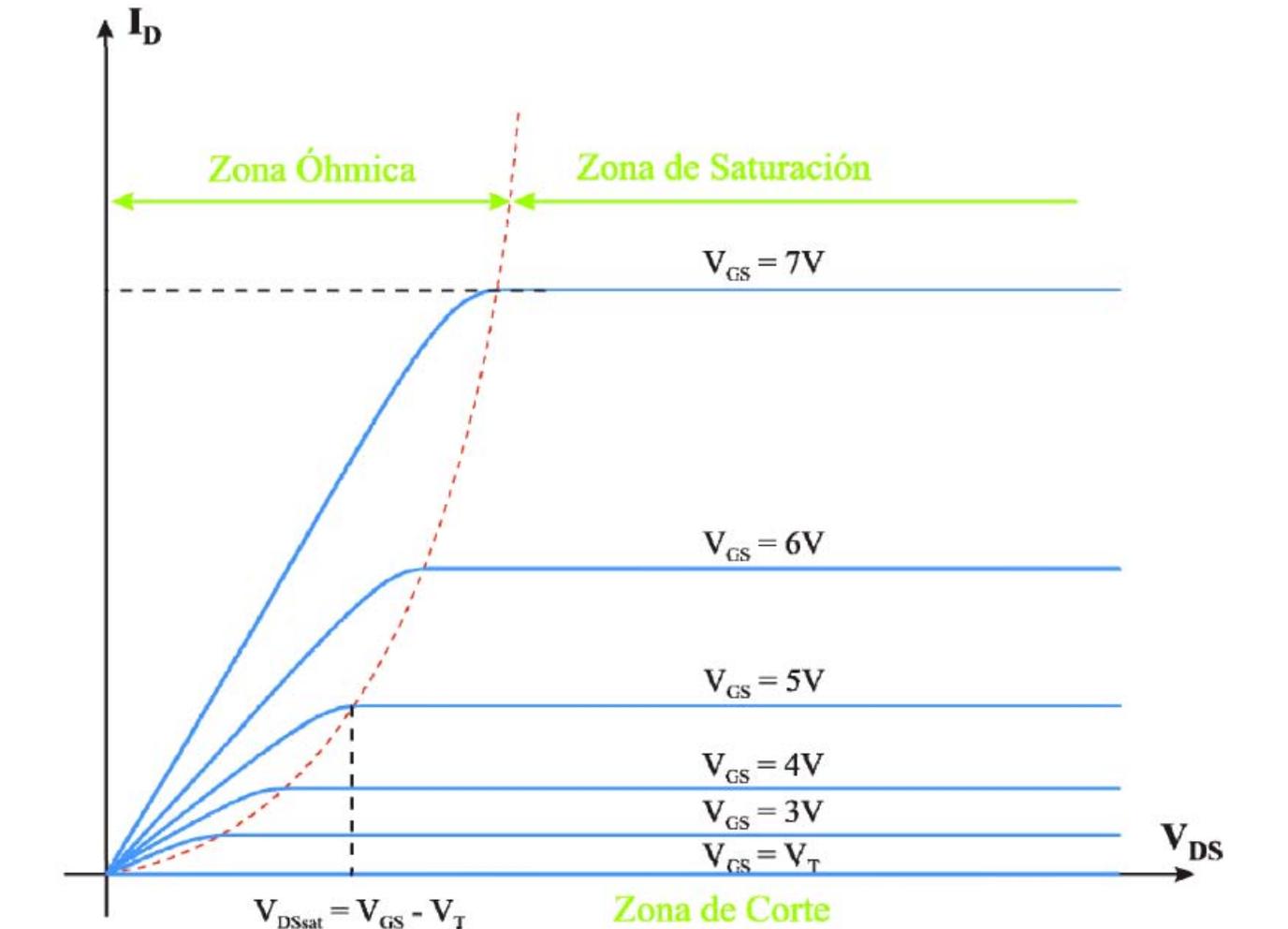


# EL TRANSISTOR MOSFET

## 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  $V_{GS} \geq V_t$      $V_{DS} \geq V_{GS} - V_t$      $V_{GD} < V_t$

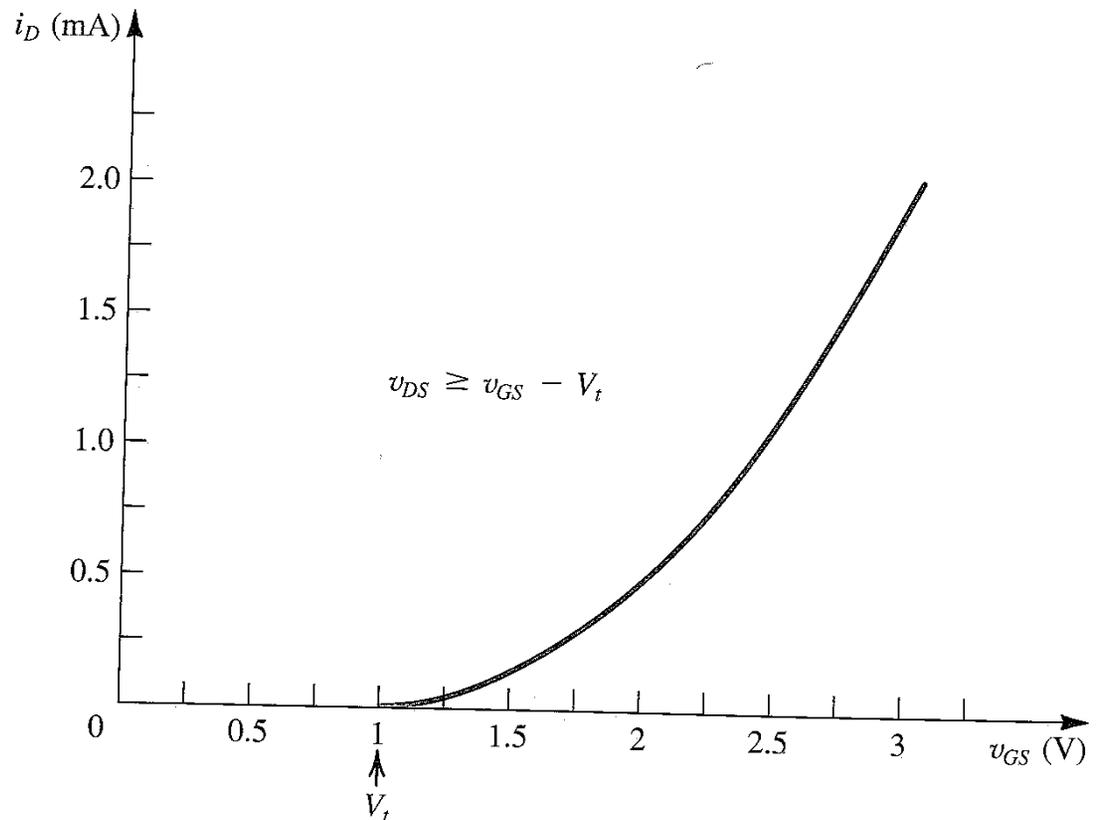
$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2$$

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

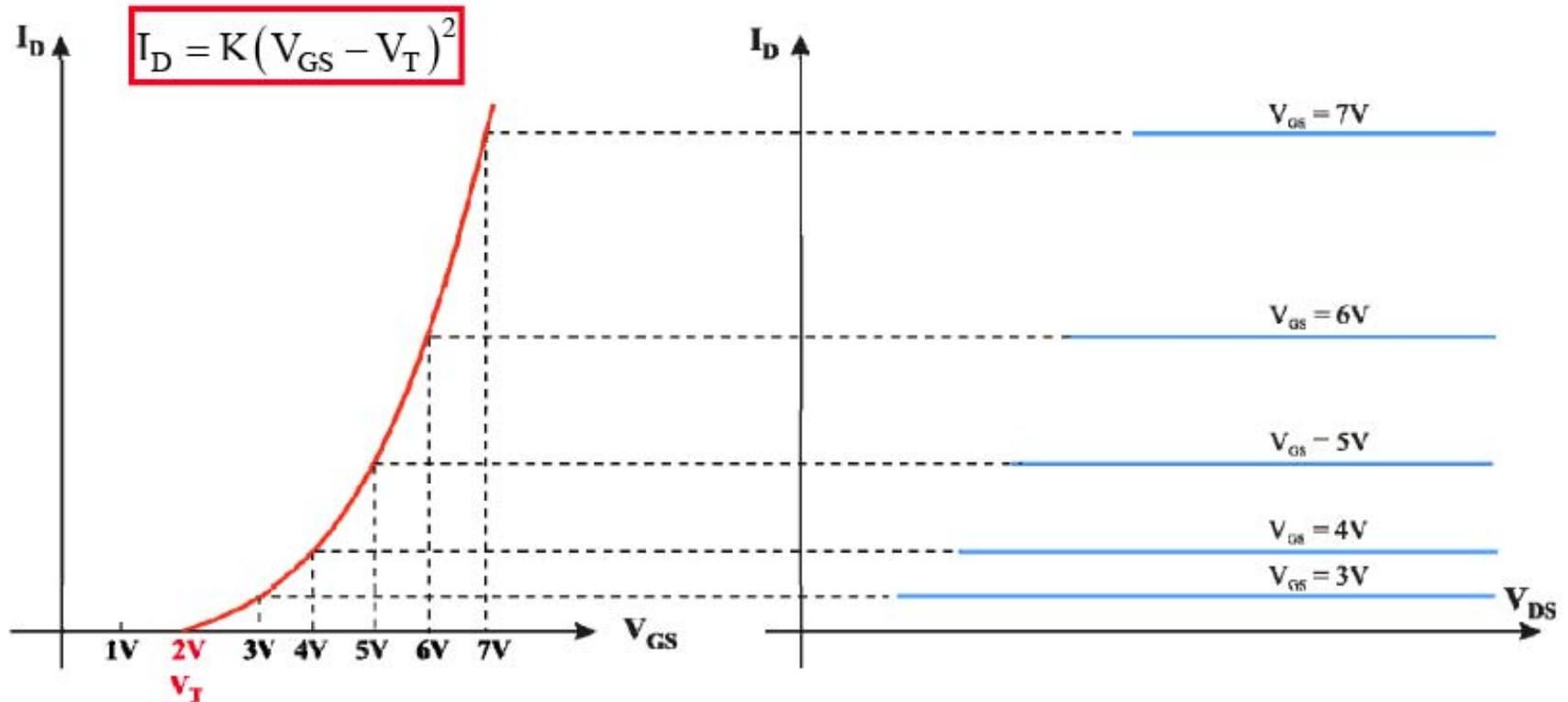
De la ecuación en la zona de saturación puede realizarse la gráfica de la corriente  $i_D$  vs. el voltaje  $v_{GS}$  en el límite entre las regiones.

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

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  $v_{GS}$

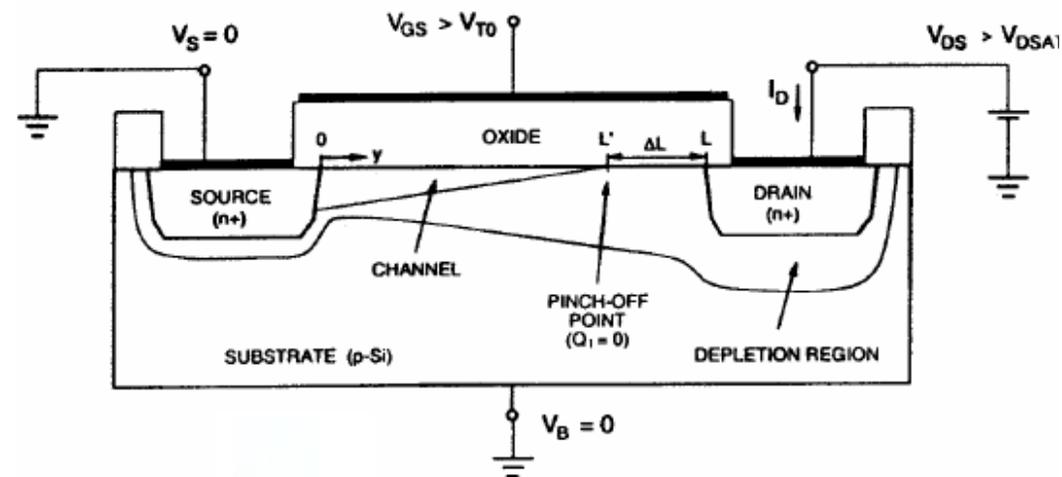
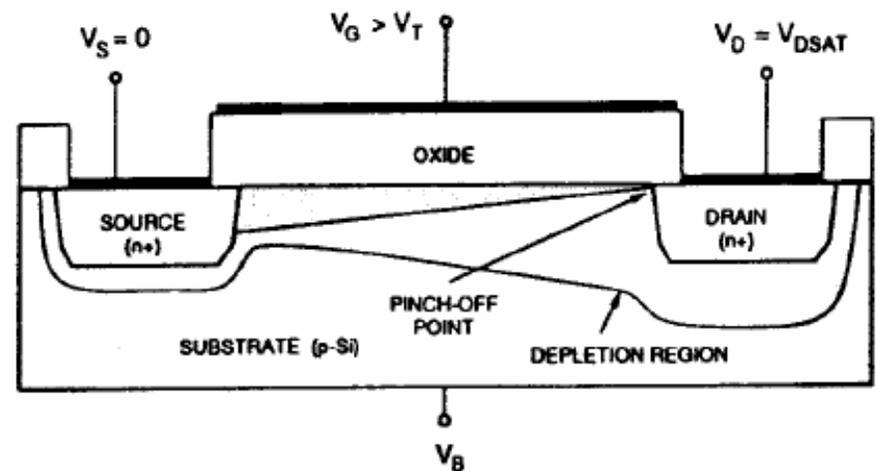
## RESISTENCIA EN LA REGIÓN DE SATURACIÓN

\* 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**).

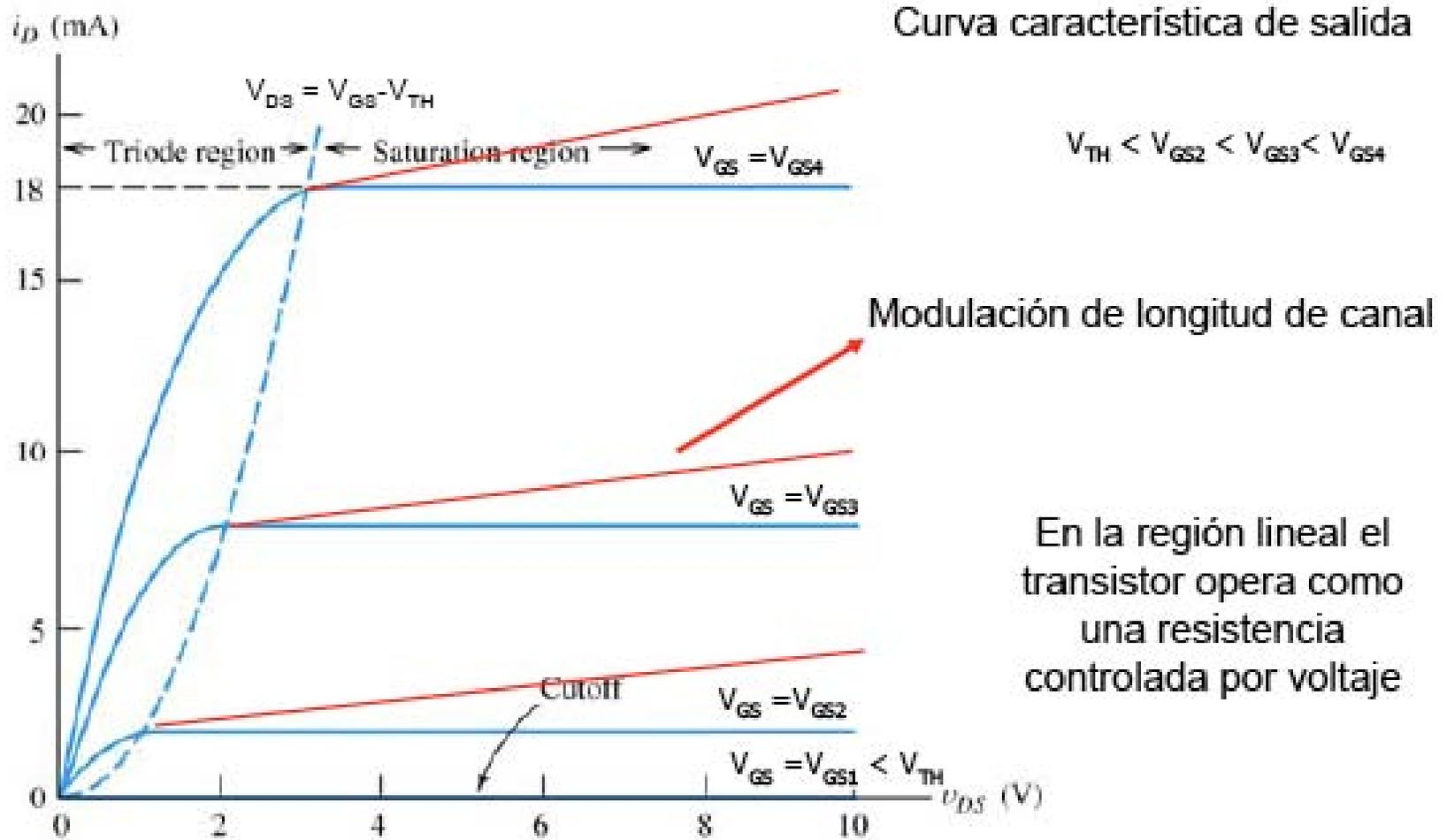
\* La corriente  $i_D$  es inversamente proporcional a la longitud del canal y aumenta.

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

$\lambda$  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



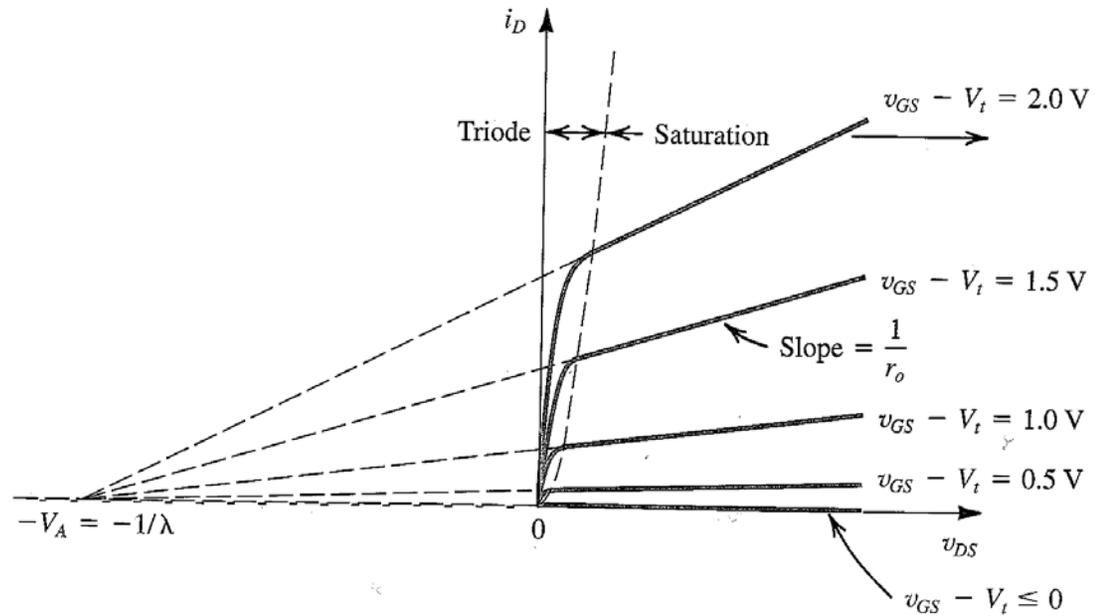
# EXTRAPOLACIÓN DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DEL MOSFET

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

La resistencia de salida es

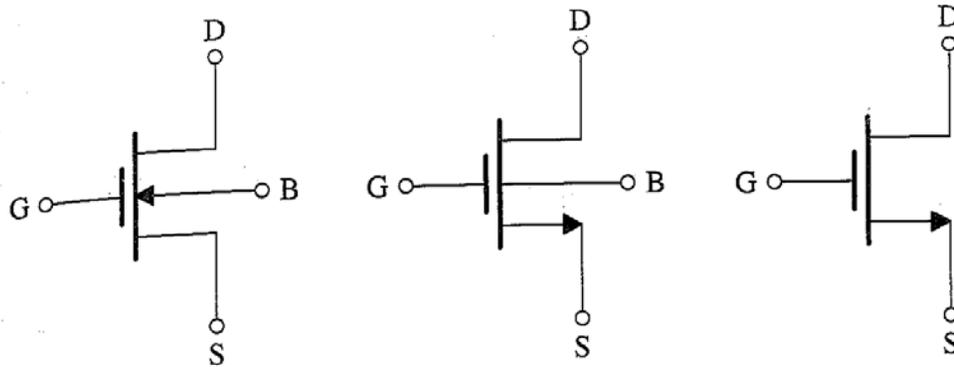
$$r_o \equiv \left[ \frac{\partial i_D}{\partial v_{DS}} \right]_{v_{GS} \text{ constant}}^{-1}$$

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

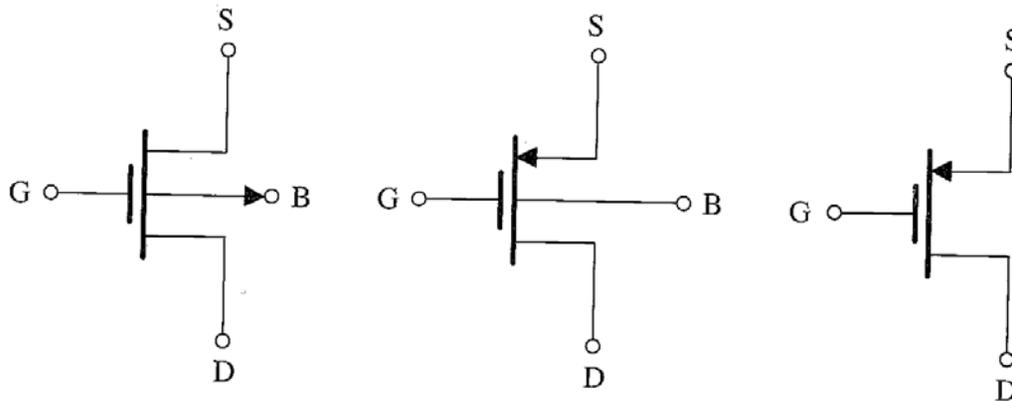


## SÍMBOLOS CIRCUITALES

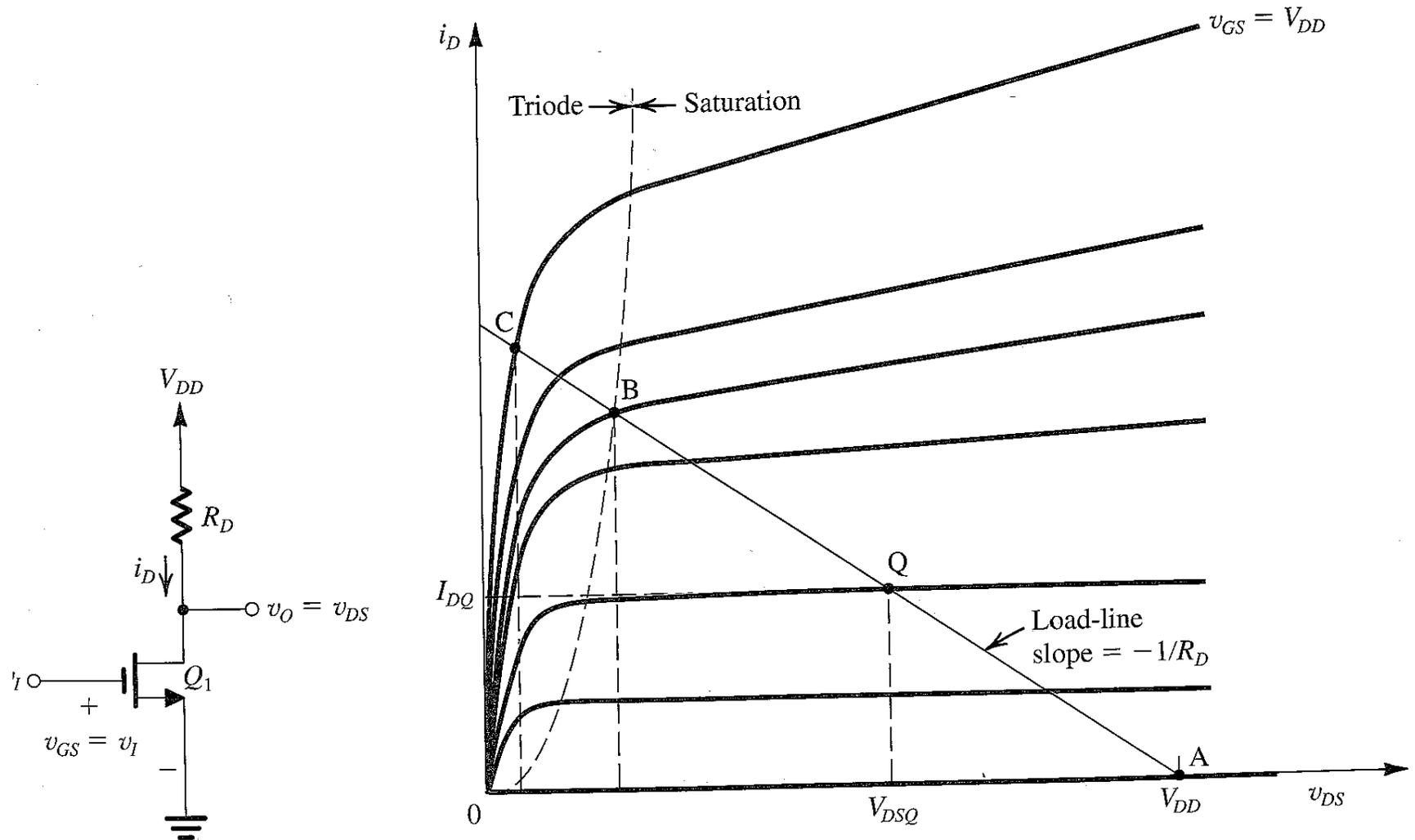
Para el NMOS de enriquecimiento (MOSTET canal N)



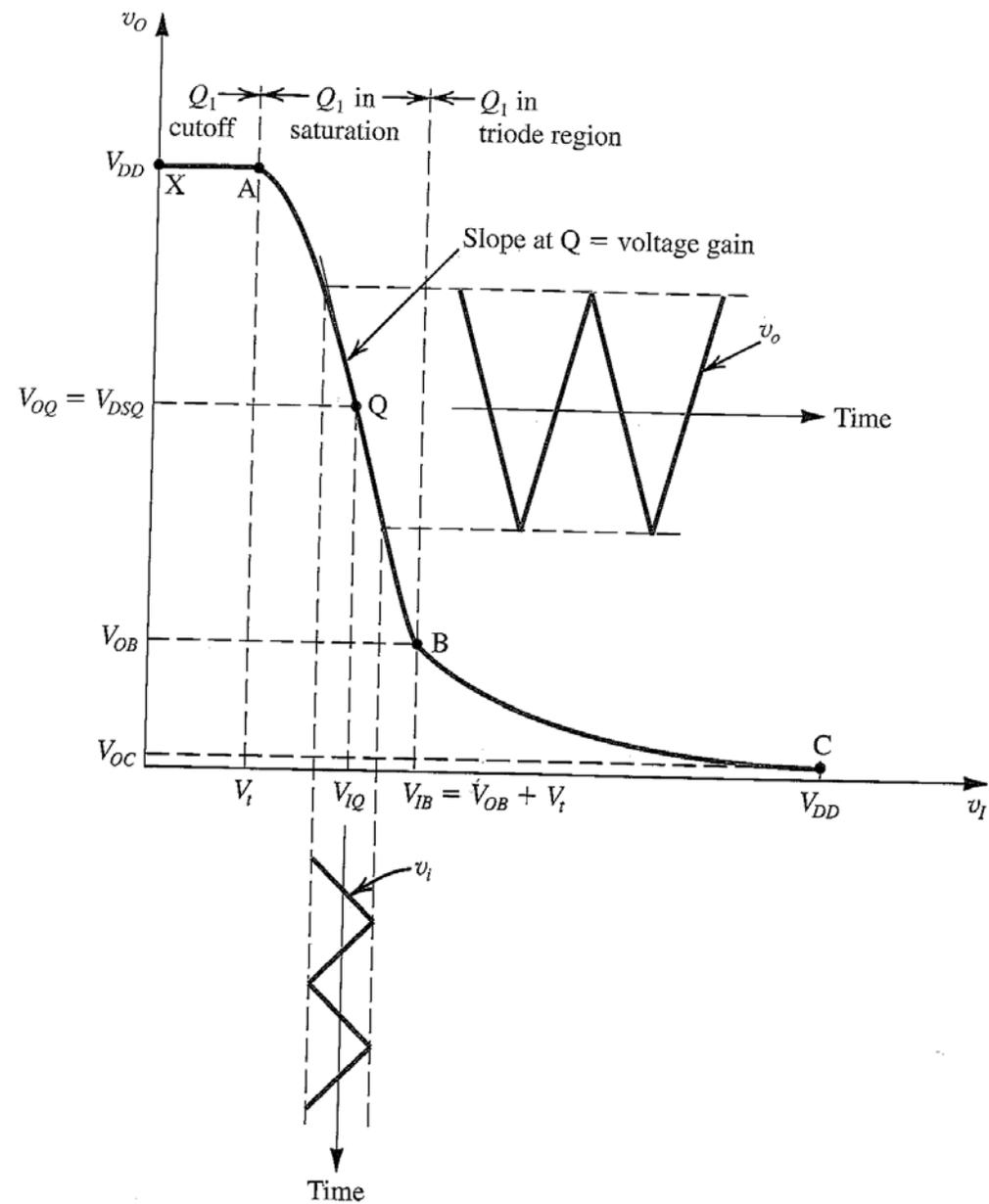
Para el PMOS de enriquecimiento (MOSTET canal P)



# POLARIZACIÓN : RECTA DE CARGA



# CARACTERÍSTICA DE TRANSFERENCIA. GRAN SEÑAL



## EL MOSFET COMO AMPLIFICADOR

En saturación: Corriente DC (polarización)

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

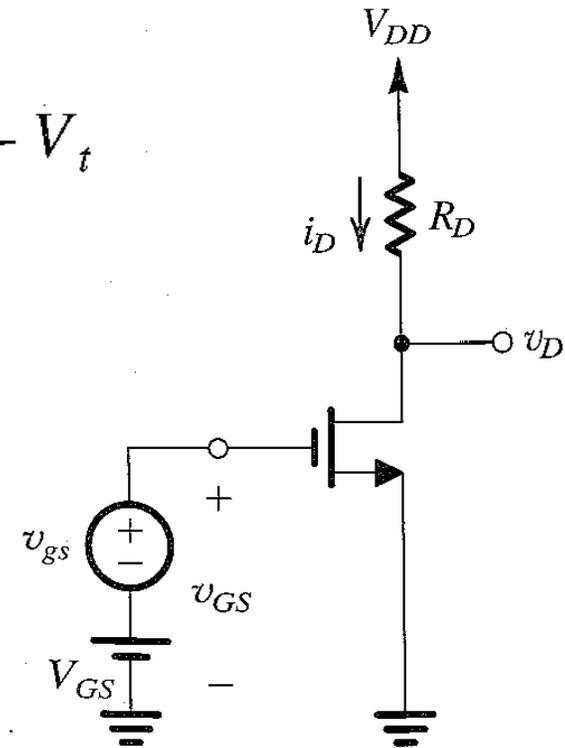
$$V_D = V_{DD} - R_D I_D$$

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

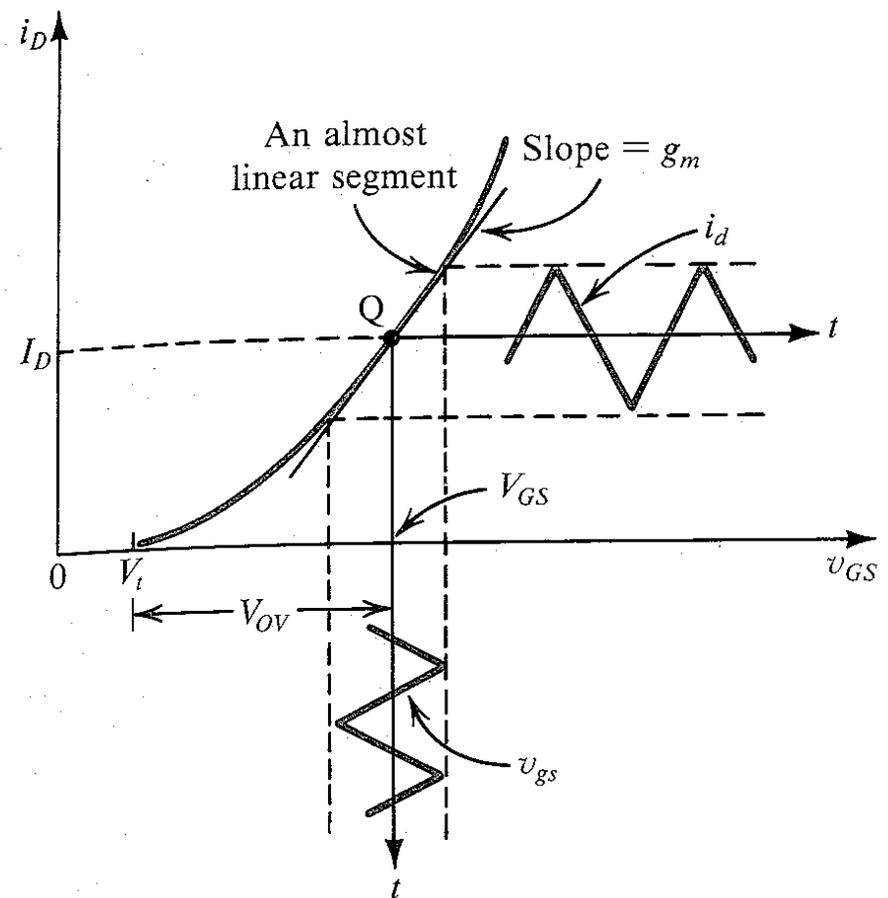
$$\frac{1}{2}k'_n \frac{W}{L} v_{gs}^2 \ll k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t) v_{gs} \quad v_{gs} \ll 2(V_{GS} - V_t)$$

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:

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

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

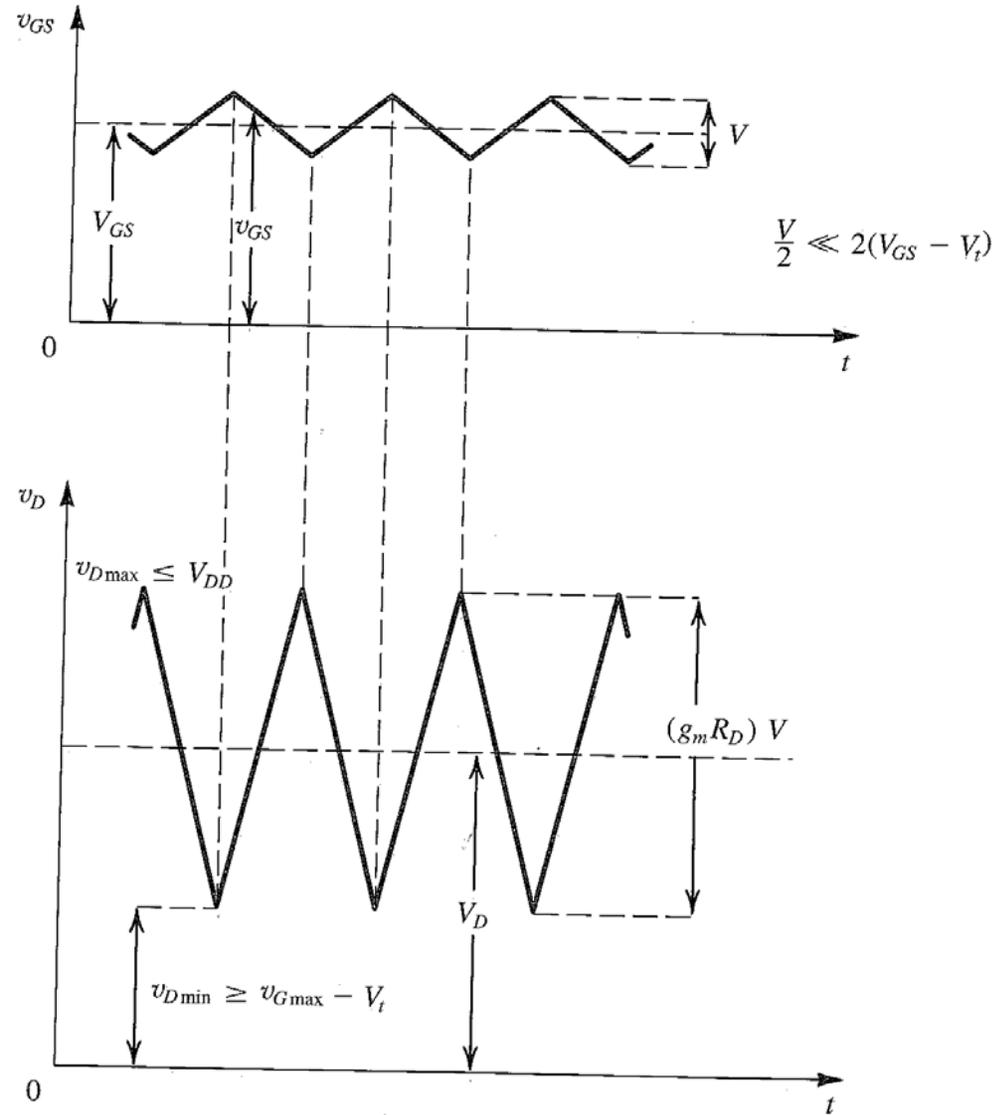
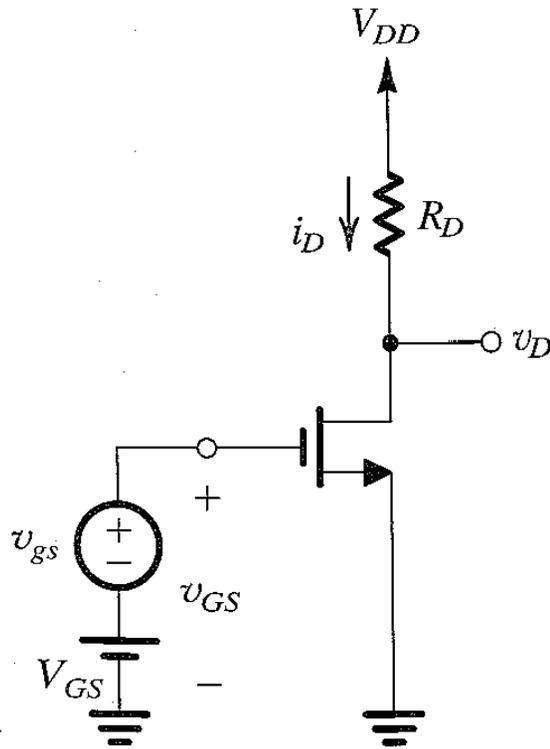
# Ganancia de voltaje

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

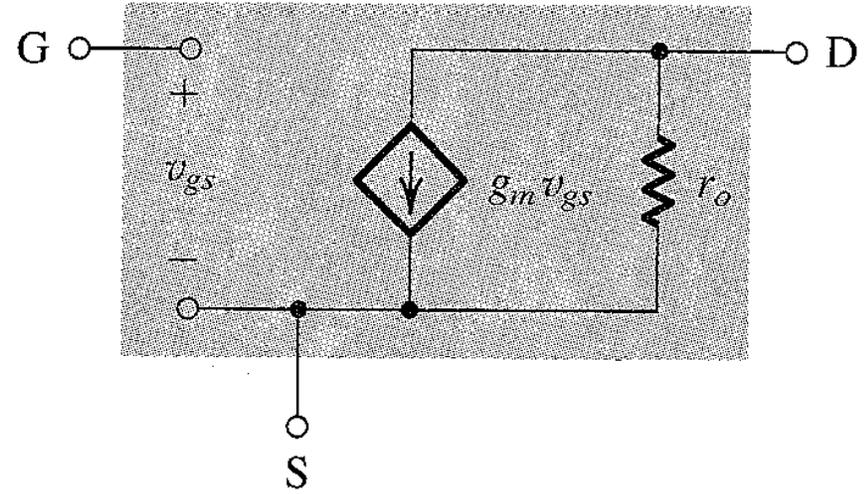
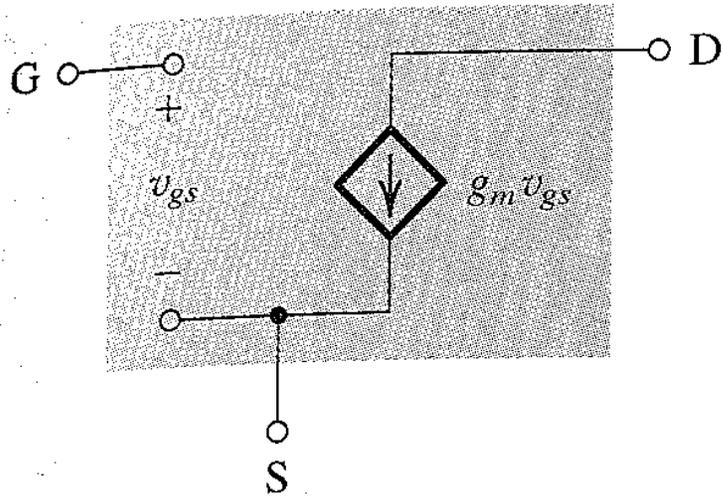
$$v_D = V_D - R_D i_d$$

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

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



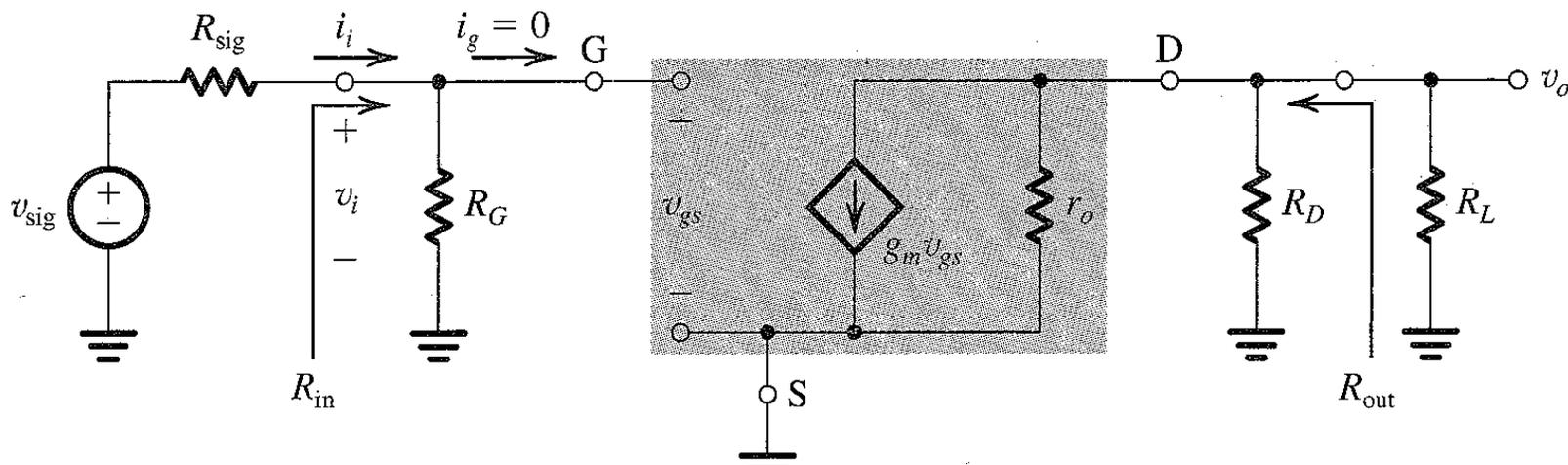
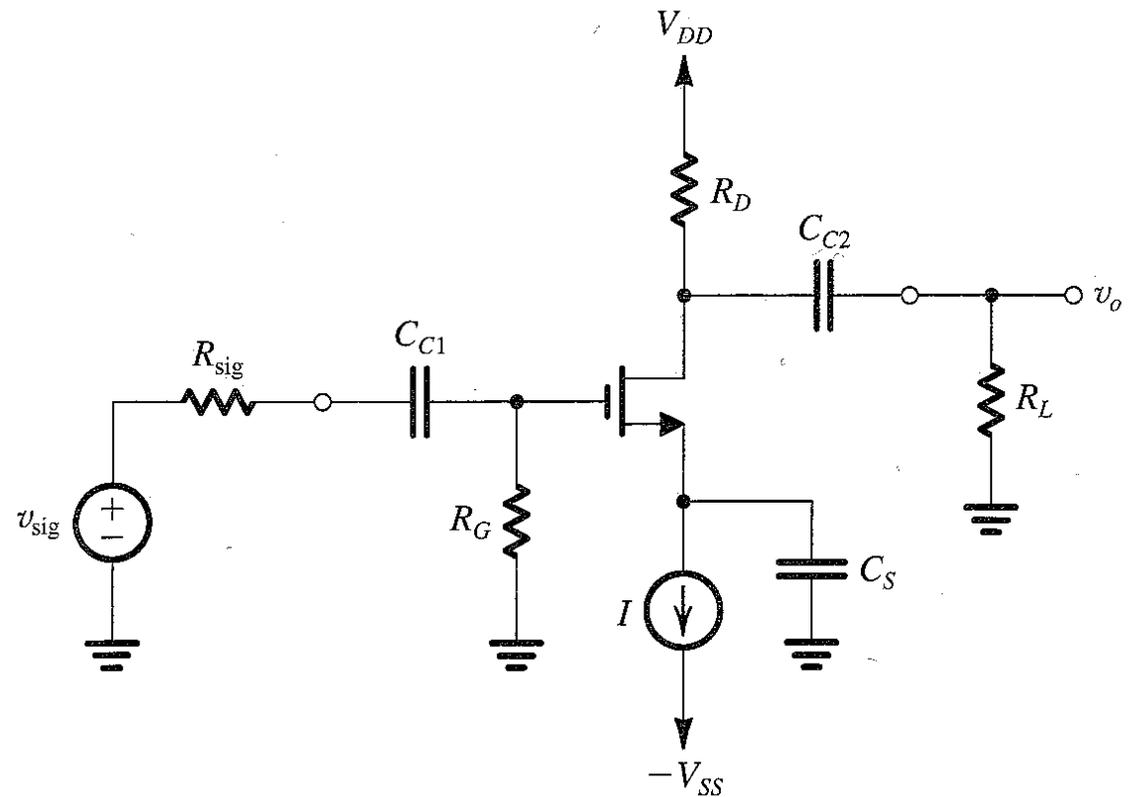
# MODELO EQUIVALENTE DE PEQUEÑA SEÑAL



# AMPLIFICADOR SOURCE COMÚN

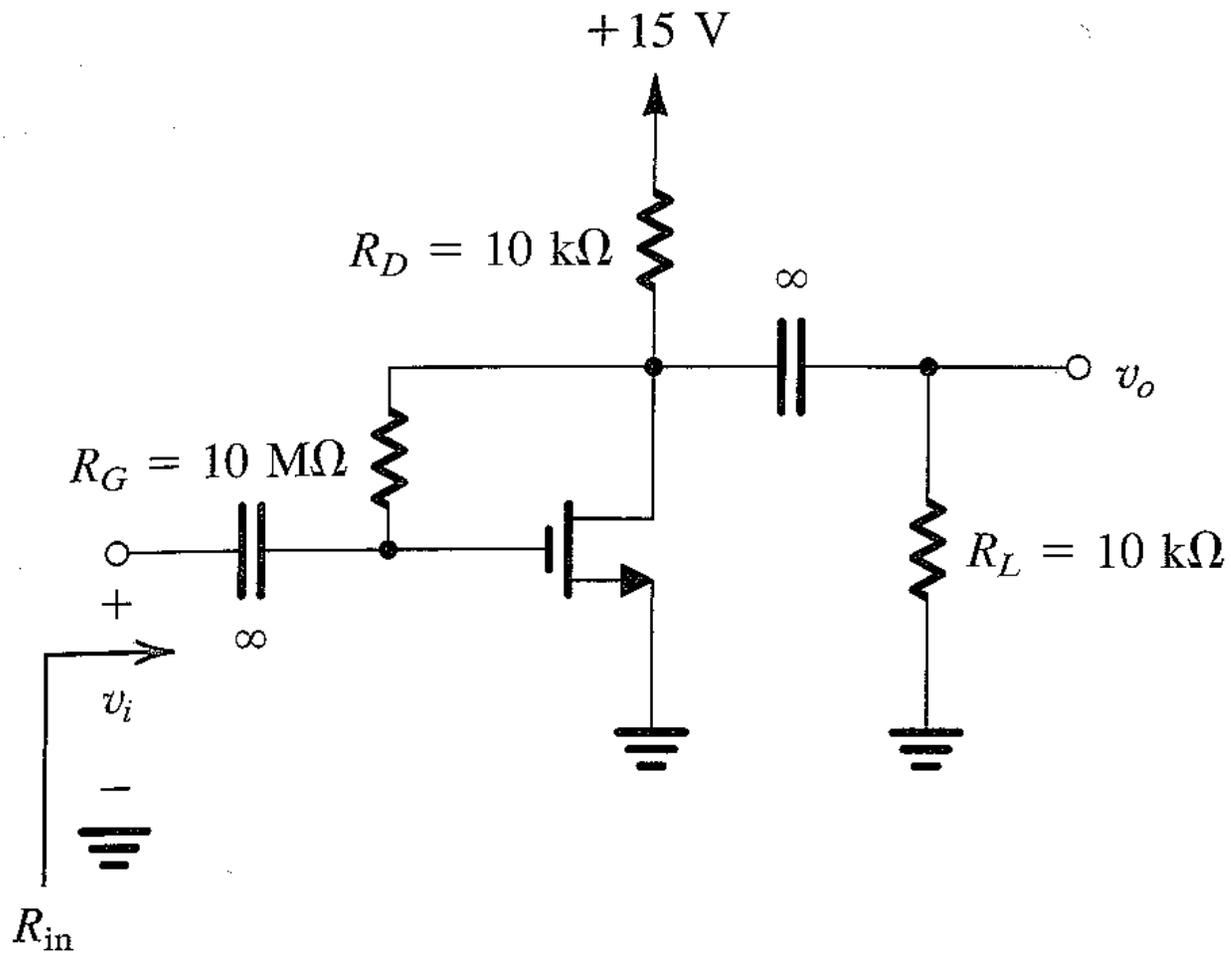
En DC: Punto de  
operación Q

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

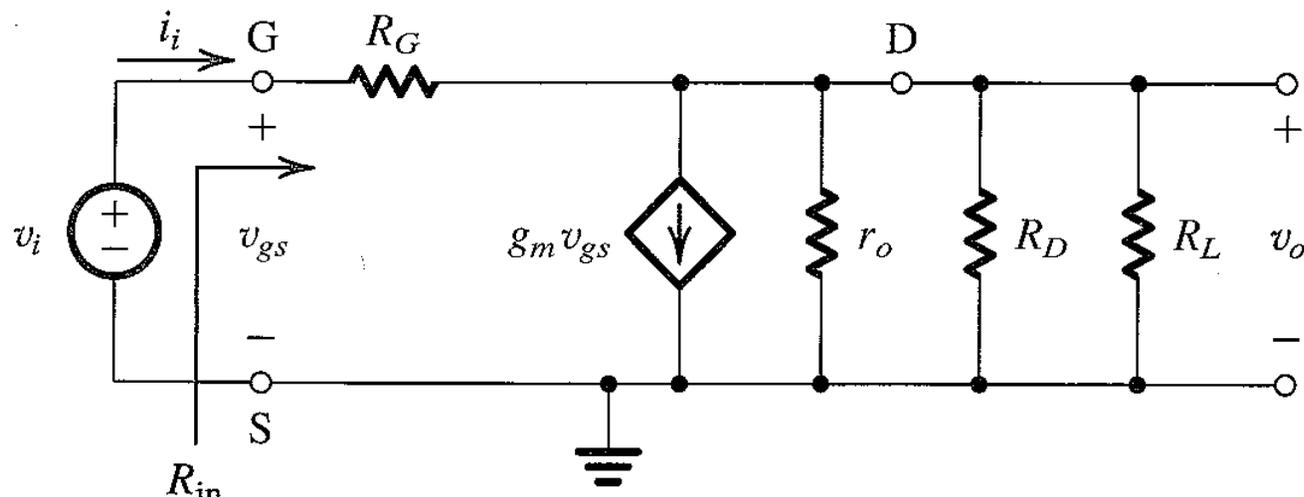
$$V_{GS} = V_D = 15 - 10 I_{D1} = -2,2 \text{ V} \quad \text{No válido}$$

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 pequeña señal



## 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  $R_{in} = v_i/i_i$**

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

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

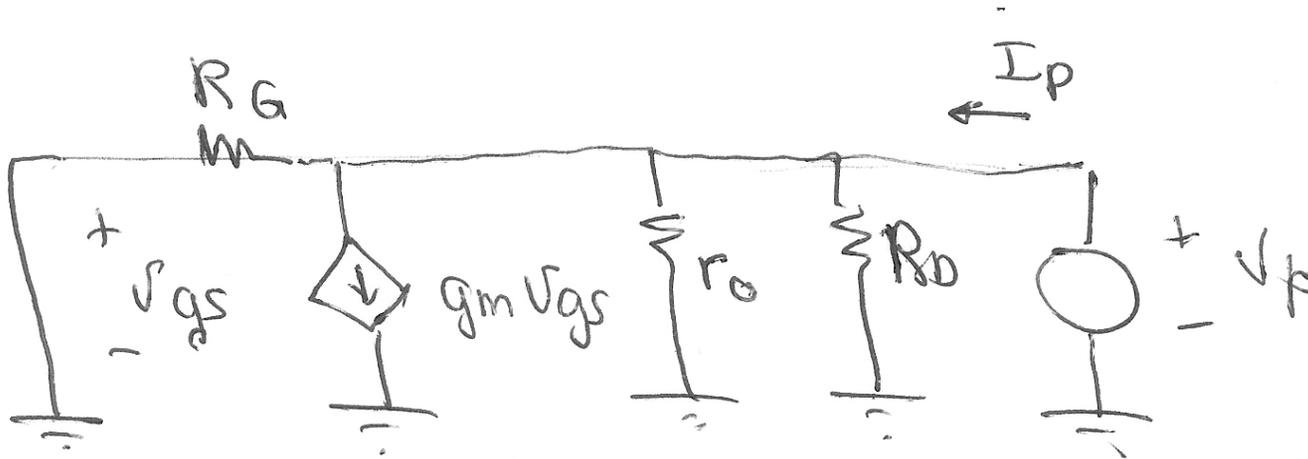
$$R_{in} = \frac{v_{in}}{i_{in}} = \frac{R_G}{1 + g_m R_p} = 2,33 \text{ M}\Omega$$

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**

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

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

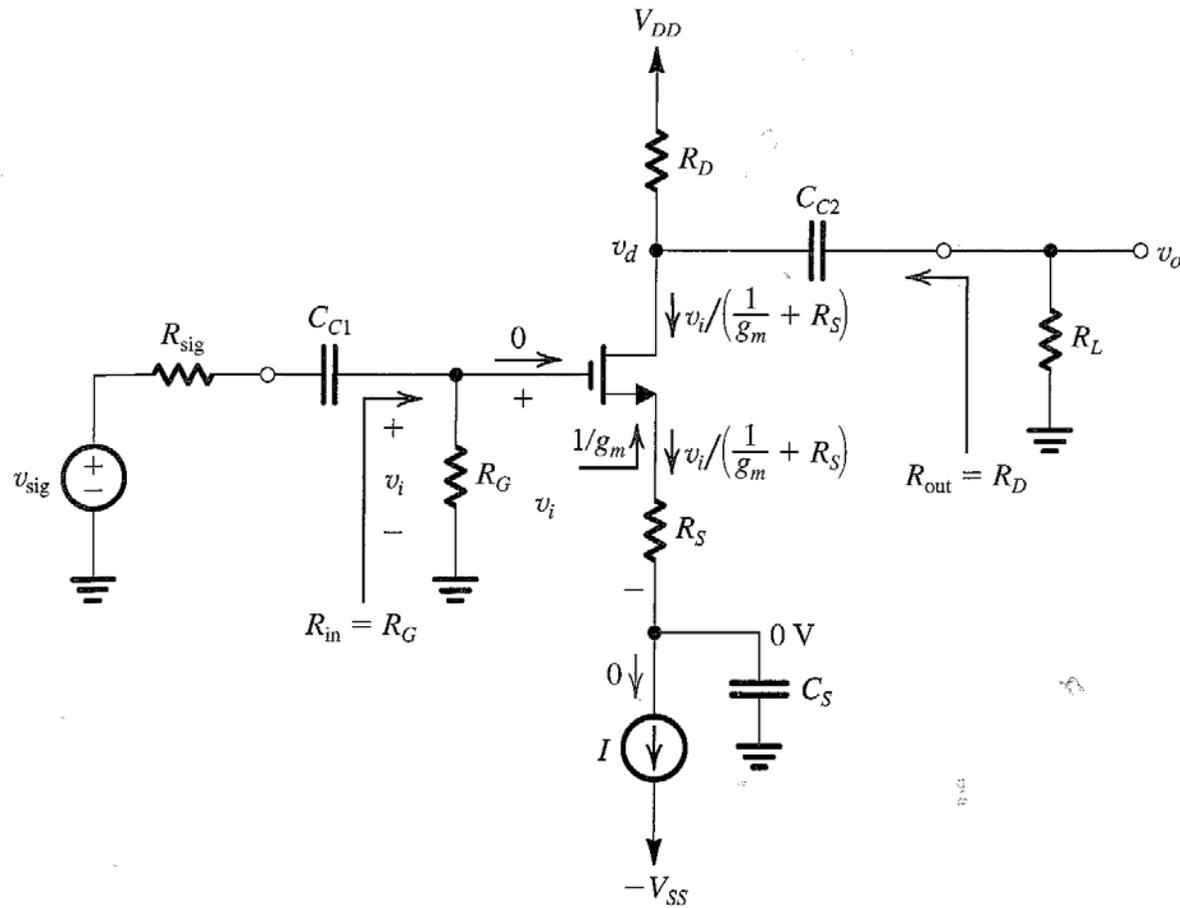
$$A_i = (-3,26) \frac{2,33 \times 10^3}{10} = -759,3$$

Es muy elevada

## CONCLUSIONES SOBRE EL AMPLIFICADOR SOURCE COMÚN

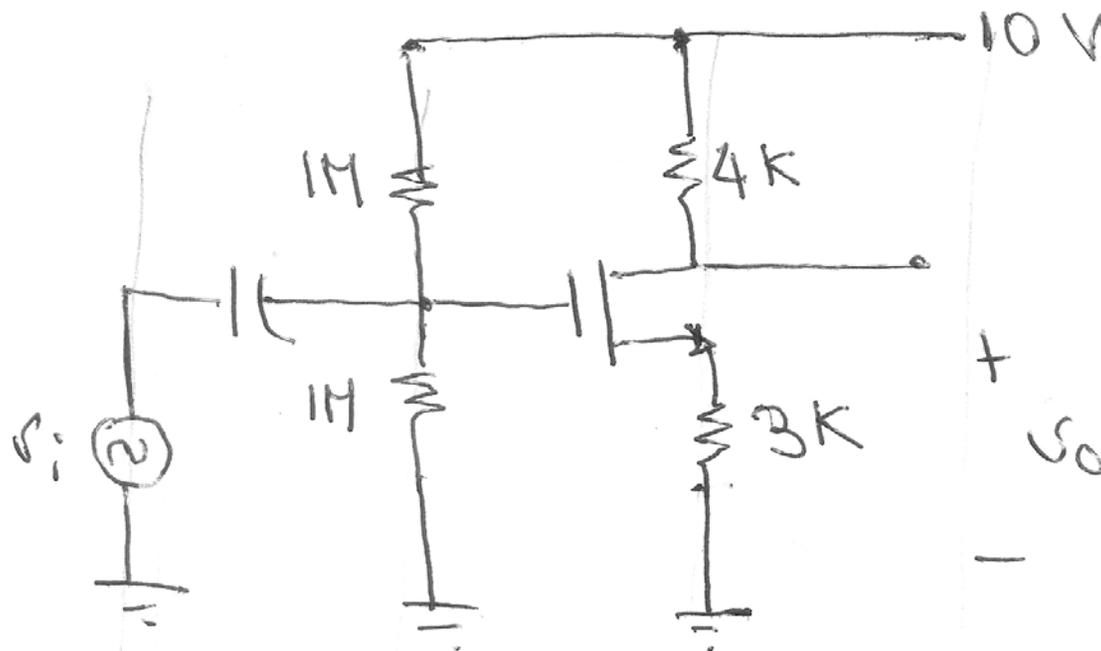
- \* La ganancia del amplificador Source Común es relativamente elevada, y la señal de salida presenta un desfase de  $180^\circ$  con respecto a la de entrada, según indica el signo negativo que se obtiene en la relación de  $A_v$ .
- \* La impedancia de entrada depende de las resistencias de polarización, 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.



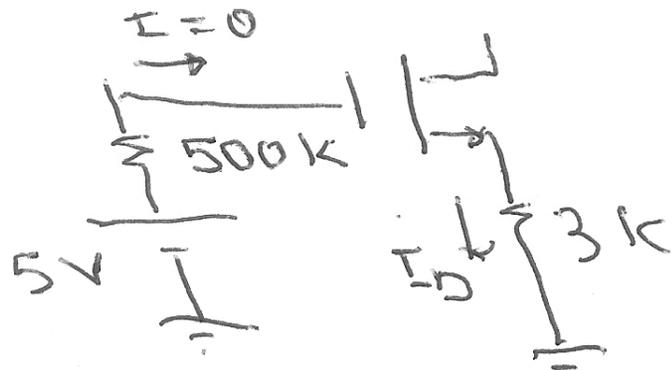
$$K_n' \frac{W}{L} = 2 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

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

## 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

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

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

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

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

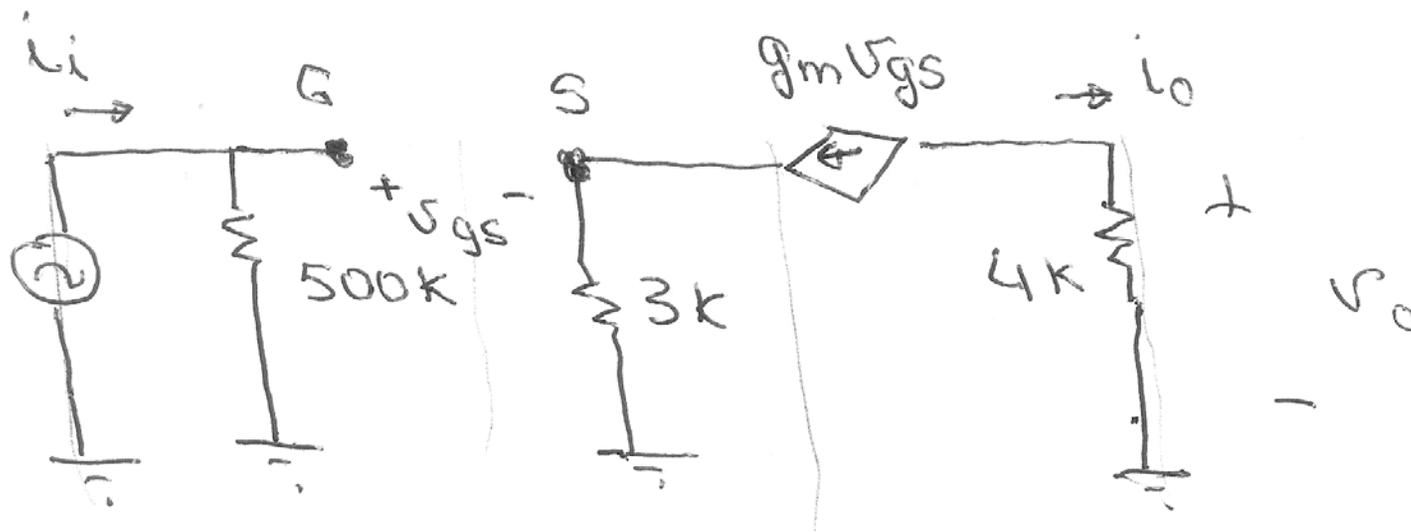
$$I_{D2} = 1 \text{ mA} \quad V_{GS2} = 5 - 3I_D = 2 \text{ Válido}$$

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

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

**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

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

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

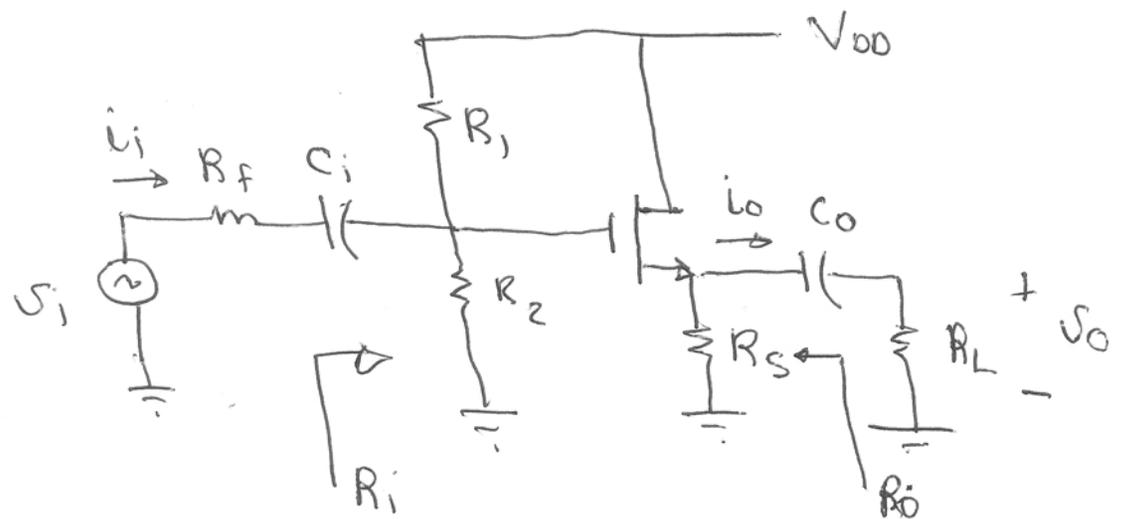
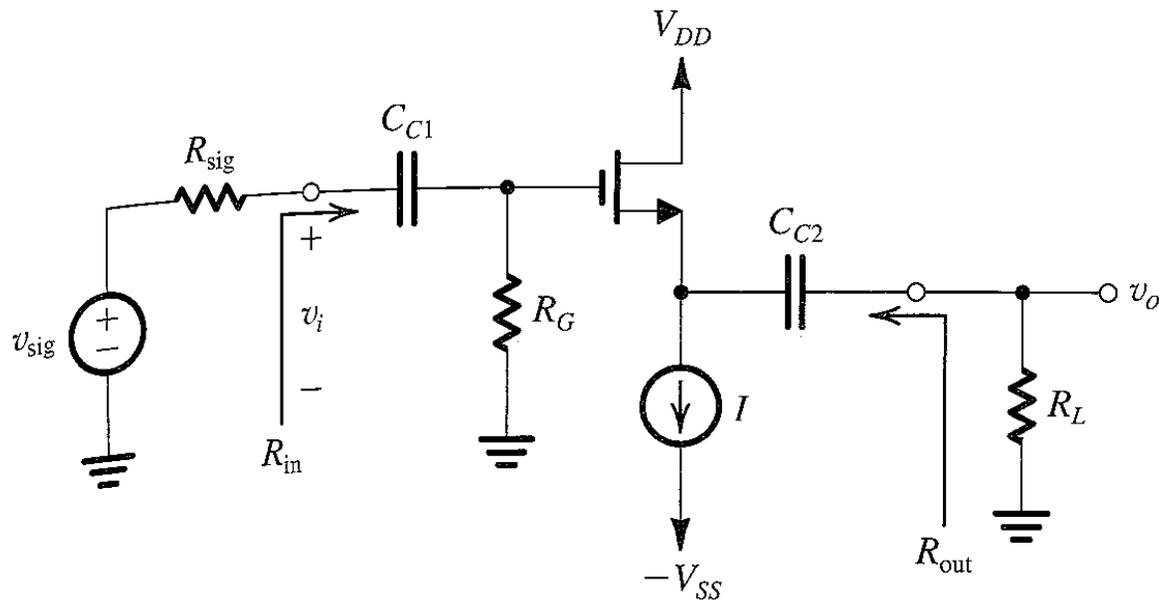
**Resistencia de entrada:** Por inspección

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

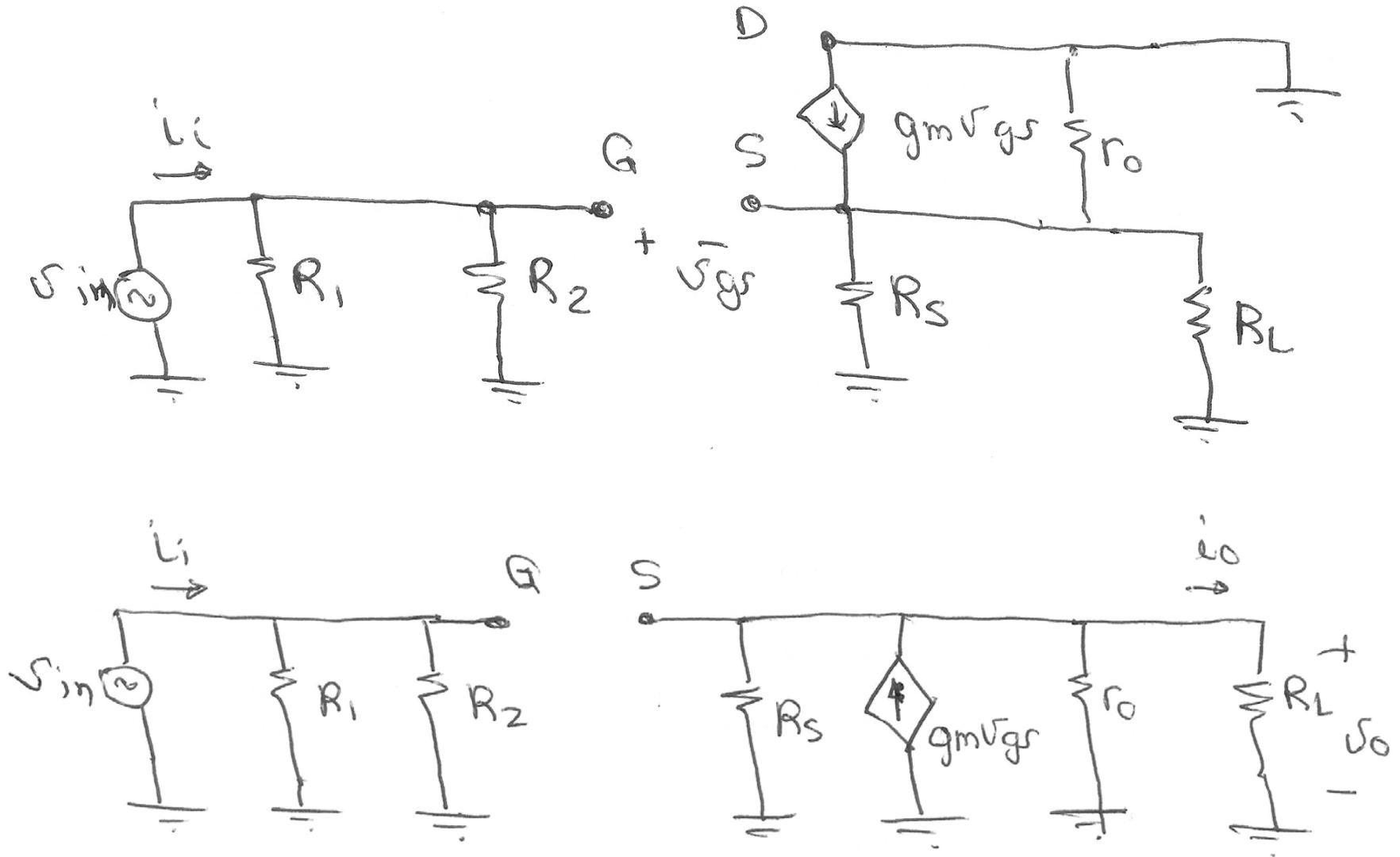
**Resistencia de salida:** Si  $v_{gs} = 0$  resulta

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

# AMPLIFICADOR DRAIN COMÚN



**\* Circuito equivalente con el modelo  $\pi$  incluyendo  $r_o$**



**\* Ganancia de voltaje**

**Se define  $R_p = R_C // R_L // r$**

$$v_o = g_m v_{gs} R_p \quad v_{in} = v_{gs} + v_o = v_{gs}(1 + g_m R_p)$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_{in}} = \frac{g_m R_p}{1 + g_m R_p}$$

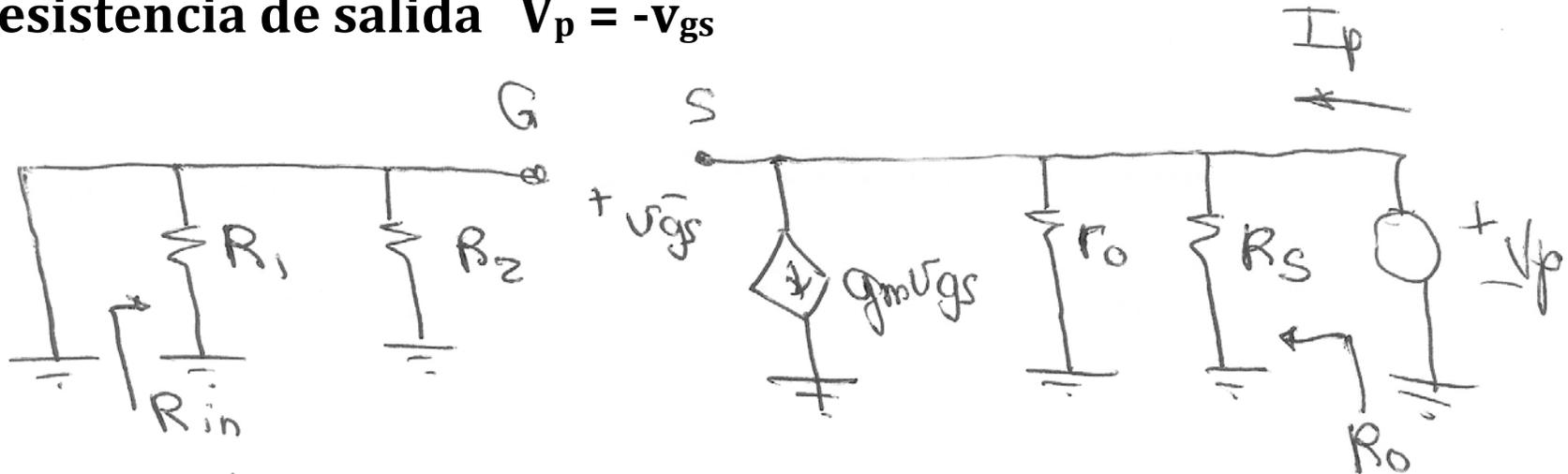
**Es menor que 1**

**La salida está en fase con la entrada**

**Resistencia de entrada**

$$R_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = R_1 \parallel R_2$$

**Resistencia de salida  $V_p = -V_{gs}$**



$$R_o = \frac{V_p}{I_p} \quad I_p = \frac{V_p}{R_S} + \frac{V_p}{r_o} - g_m V_{gs}$$

$$I_p = \frac{V_p}{R_S} + \frac{V_p}{r_o} + V_p g_m = V_p \left( \frac{1}{R_S} + \frac{1}{r_o} + g_m \right)$$

$$R_o = \frac{V_p}{I_p} = \frac{1}{\left( \frac{1}{R_S} + \frac{1}{r_o} + g_m \right)}$$

$$R_o = R_S \parallel r_o \parallel (1/g_m)$$

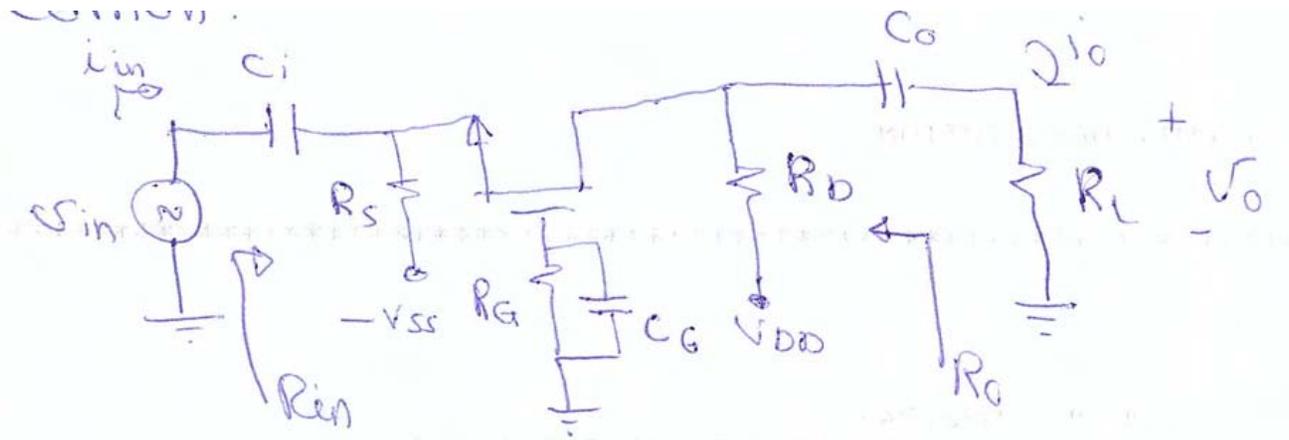
## Ganancia de corriente

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

$$A_{in} = \frac{i_o}{i_{in}} = \frac{v_o}{R_L} \cdot \frac{R_{in}}{v_{in}} = \frac{g_m R_p}{g_m R_p + 1} \frac{R_{in}}{R_L}$$

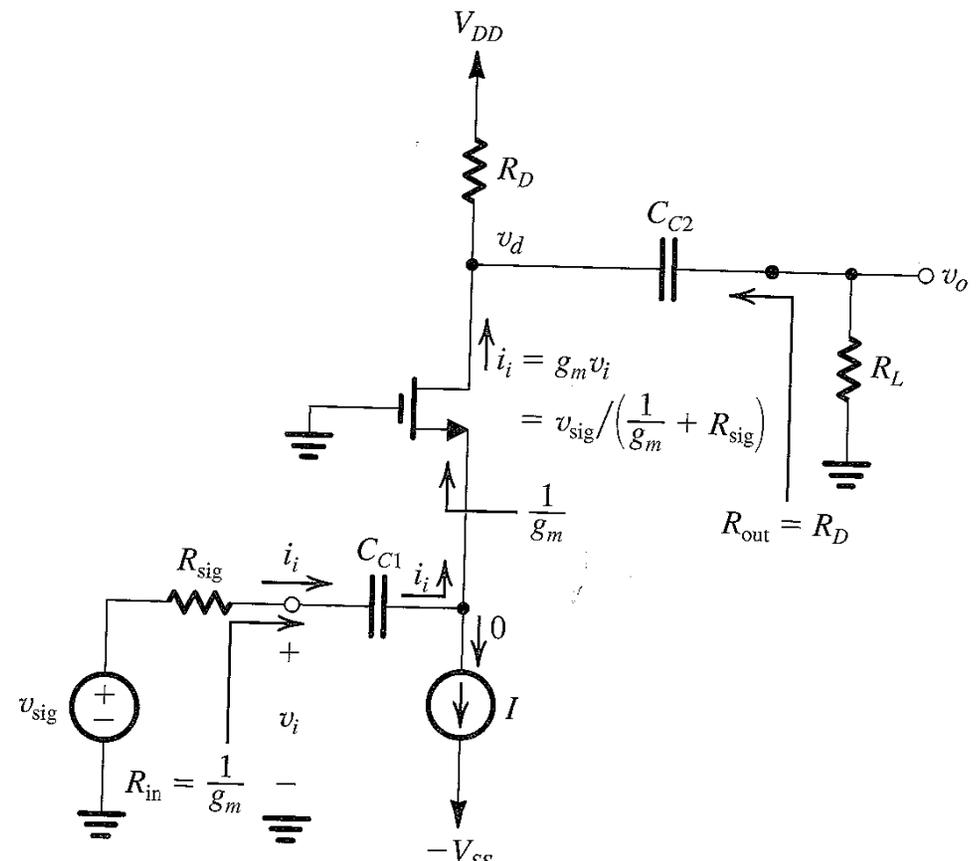
Depende del valor de las resistencias de polarización

## AMPLIFICADOR GATE COMÚN



La resistencia  $R_G$  evita la acumulación de carga estática en Gate, y el condensador  $C_G$  asegura que Gate esté a tierra para el análisis de pequeña señal.

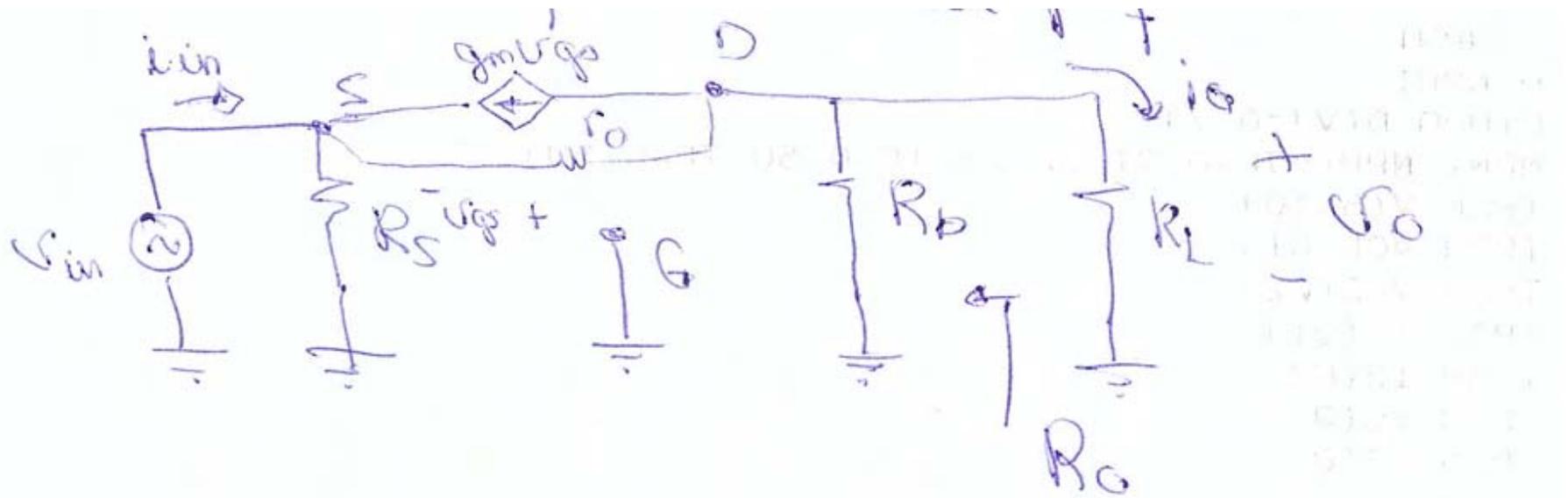
Hay que calcular el punto de operación y los parámetros del modelo de pequeña señal.



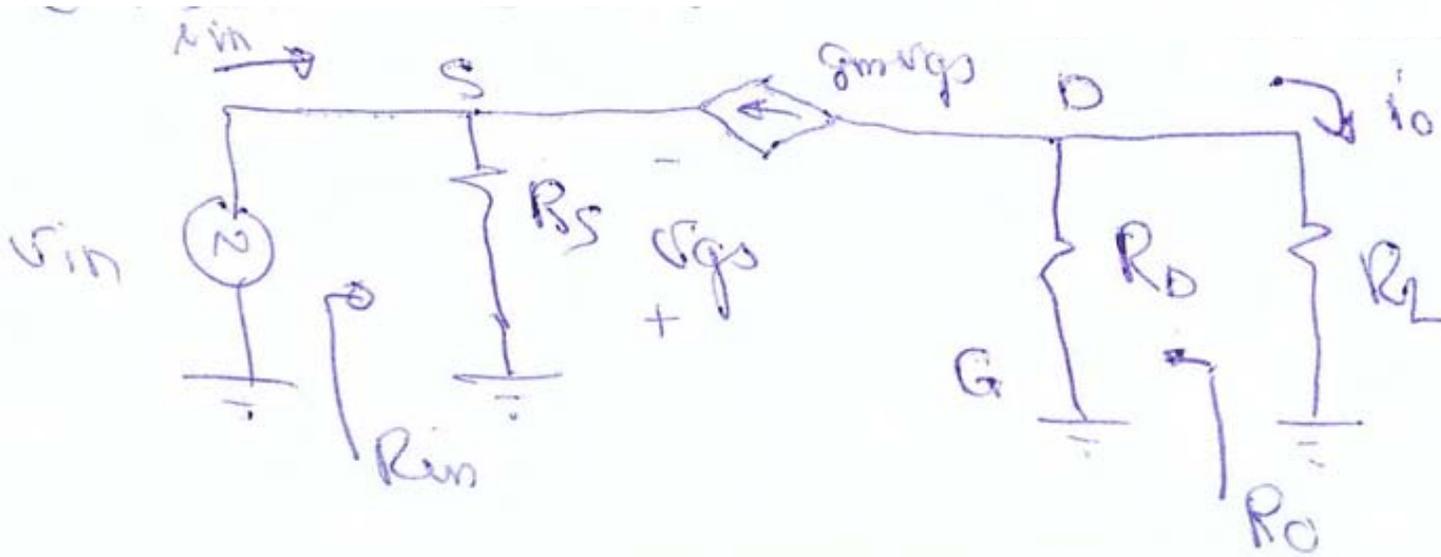
## MODELO DE PEQUEÑA SEÑAL

Con modelo  $\pi$

$r_o$  no se va a tomar en cuenta



**\* Del modelo  $\pi$  simplificado:**



**\* Ganancia de voltaje:**

$$V_o = -g_m v_{gs} (R_D \parallel R_L) = -g_m v_{gs} R_p$$

$$v_{gs} = -v_{in} \quad V_o = +g_m R_p v_{in}$$

$$A_v = g_m R_p$$

## Ganancia de corriente

$$i_{in} + g_m v_{gs} = -\frac{v_{gs}}{R_s}$$

$$i_o = \frac{R_D}{R_D + R_L} (-g_m v_{gs})$$

$$i_{in} = -v_{gs} \left( g_m + \frac{1}{R_s} \right)$$

$$v_{gs} = -\frac{i_{in}}{g_m + \frac{1}{R_s}}$$

$$i_o = \frac{R_D}{R_D + R_L} \left( g_m \frac{i_{in}}{g_m + \frac{1}{R_s}} \right)$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_{in}} = \frac{R_D}{R_D + R_L} \frac{g_m}{g_m + \frac{1}{R_s}}$$

Es menor que 1

## Resistencia de entrada

$$i_{in} + g_m v_{gs} = -\frac{v_{gs}}{R_s}$$

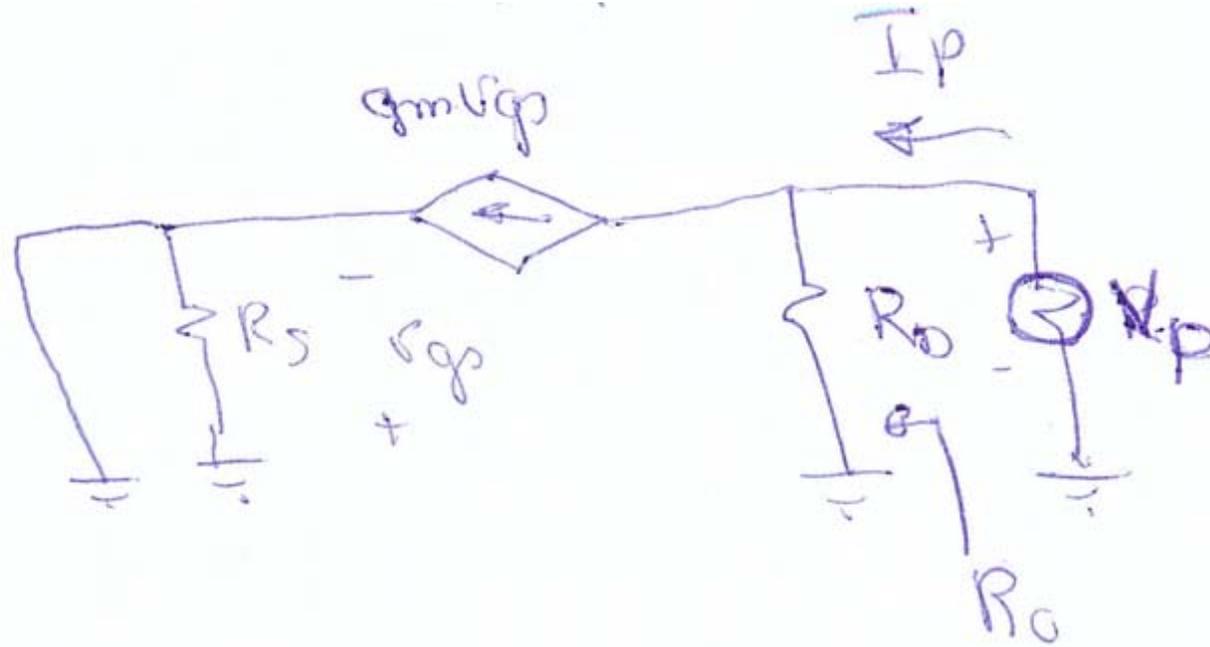
$$-v_{gs} = v_{in}$$

$$i_{in} = v_{in} \left( g_m + \frac{1}{R_s} \right)$$

$$R_{in} = \frac{v_{in}}{i_{in}} = \frac{1}{g_m + \frac{1}{R_s}}$$

Esta configuración tiene una baja resistencia de entrada.

## \* Resistencia de salida



$$v_{gs} = 0$$

$$R_o = R_D$$