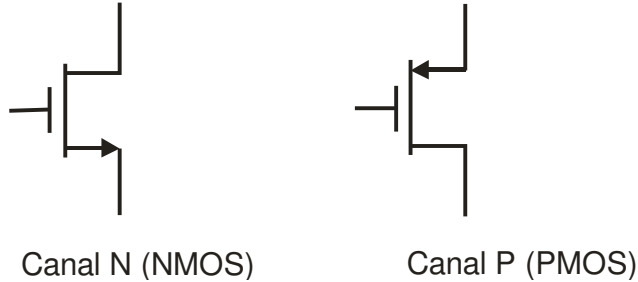


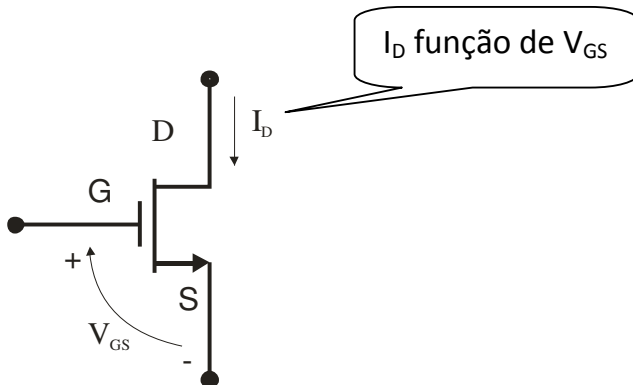
## • Transistores de Efeito de Campo (FETS)

Como no caso do TBJ, a tensão entre dois terminais do FET (field-effect transistor) controla a corrente que circula pelo terceiro terminal. Correspondentemente o FET pode ser usado tanto como amplificador quanto como uma chave. O nome do dispositivo origina-se de seu princípio de operação. O controle é baseado no campo elétrico estabelecido pela tensão aplicada no terminal de controle. O transistor **MOSFET** (acrônimo de **Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor**, ou transistor de efeito de campo de semiconductor de óxido metálico), é, de longe, o tipo mais comum de transistores de efeito de campo em circuitos tanto digitais quanto analógicos.

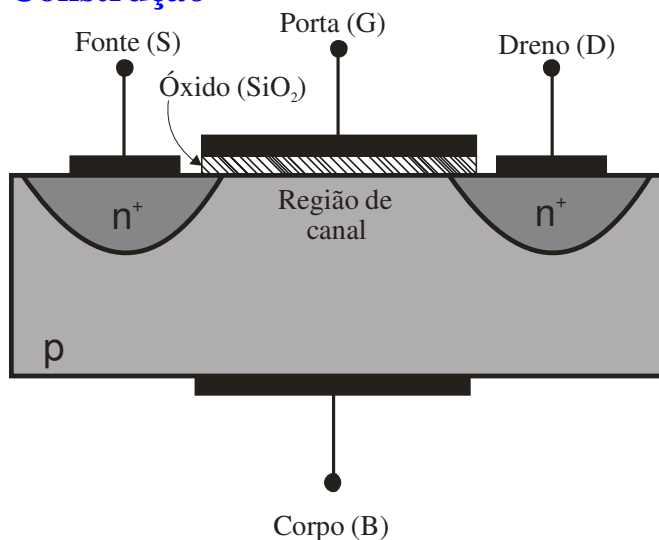
### • Símbolo



### • Função – Controlar a corrente elétrica que passa por ele.



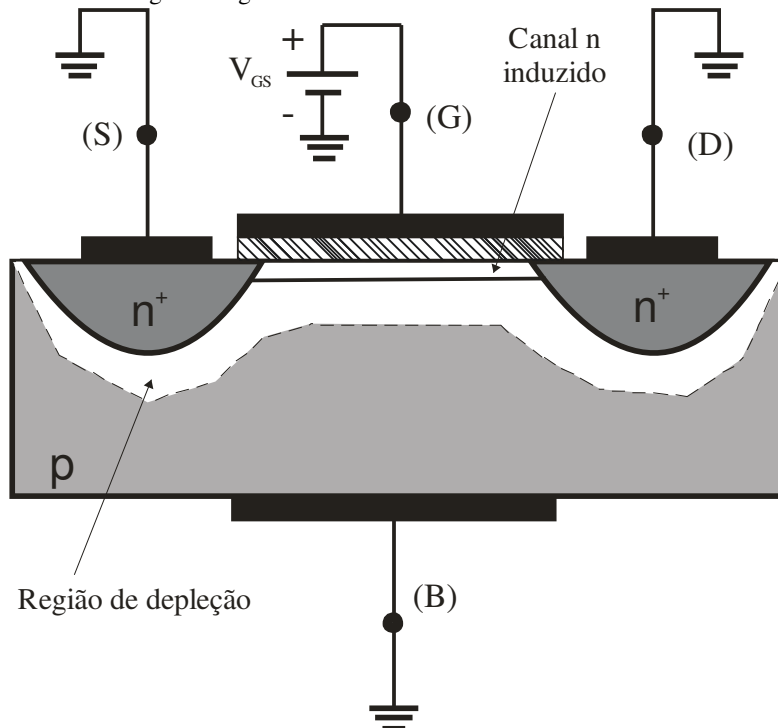
### • Construção



Geralmente o terminal corpo (B) é ligado a fonte (S).

## • Criação do canal

Considere a figura a seguir:



A tensão  $V_{GS}$ , em um primeiro momento, faz as lacunas livres da região do substrato sob a porta serem repelidas, deixando uma região de depleção. A tensão positiva sob a porta atrai elétrons das regiões  $n^+$  da fonte e do dreno para a região do canal. Quando elétrons suficientes estiverem sob a porta, o canal estará formado ligando a fonte ao dreno. O valor mínimo de  $V_{GS}$  para se formar o canal é chamado de **tensão de limiar** (*threshold*) ou  $V_t$ .

## • Operação do transistor

A operação de um MOSFET pode ser dividida em três diferentes regiões, dependendo das tensões aplicadas sobre seus terminais. Para o MOSFET **canal n**:

- **Região de Corte:** quando  $V_{GS} < V_t$ , onde  $V_{GS}$  é a tensão entre a porta (gate) e a fonte (source). O transistor permanece desligado, e não há condução entre o dreno e a fonte. Enquanto a corrente entre o dreno e fonte deve idealmente ser zero devido à chave estar desligada, há uma fraca corrente invertida.
- **Região de Triodo (ou região linear):** quando  $V_{GS} > V_t$  e  $V_{ds} < V_{GS} - V_t$  onde  $V_{ds}$  é a tensão entre dreno e fonte. O transistor é ligado, e o canal que é criado permite o fluxo de corrente entre o dreno e fonte. O MOSFET opera como um resistor, controlado pela tensão na porta. A corrente do dreno para a fonte é:

$$I_D = K[2(V_{GS} - V_t)V_{DS} - V_{DS}^2], \text{ onde } K = \frac{1}{2}\mu_n C_{ox} \frac{W}{L}$$

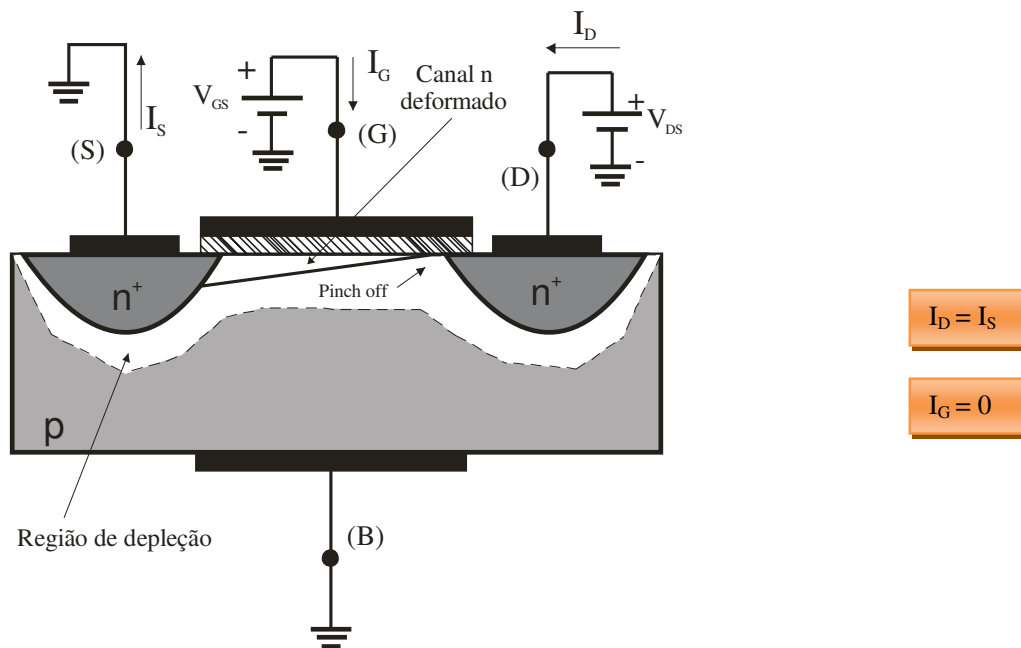
- **Região de Saturação:** quando  $V_{GS} > V_t$  e  $V_{ds} > V_{GS} - V_t$ . O transistor fica ligado, e um canal que é criado permite o fluxo de corrente entre o dreno e a fonte. Como a tensão de dreno é maior do que a tensão na porta, uma parte do canal é desligado. A criação dessa região é chamada de “pinch-off”. A corrente de dreno é agora relativamente independente da tensão de dreno (numa primeira aproximação) e é controlada somente pela tensão da porta de tal forma que:

$$I_D = K(V_{GS} - V_t)^2$$

OBS: Para o transistor PMOS as equações são idênticas, lembrando que  $V_t$  é negativo e as inequações são inversas.

Em circuitos digitais, os MOSFETs são usados somente em modos de corte e de triodo. O modo de saturação é usado em aplicações de circuitos analógicos.

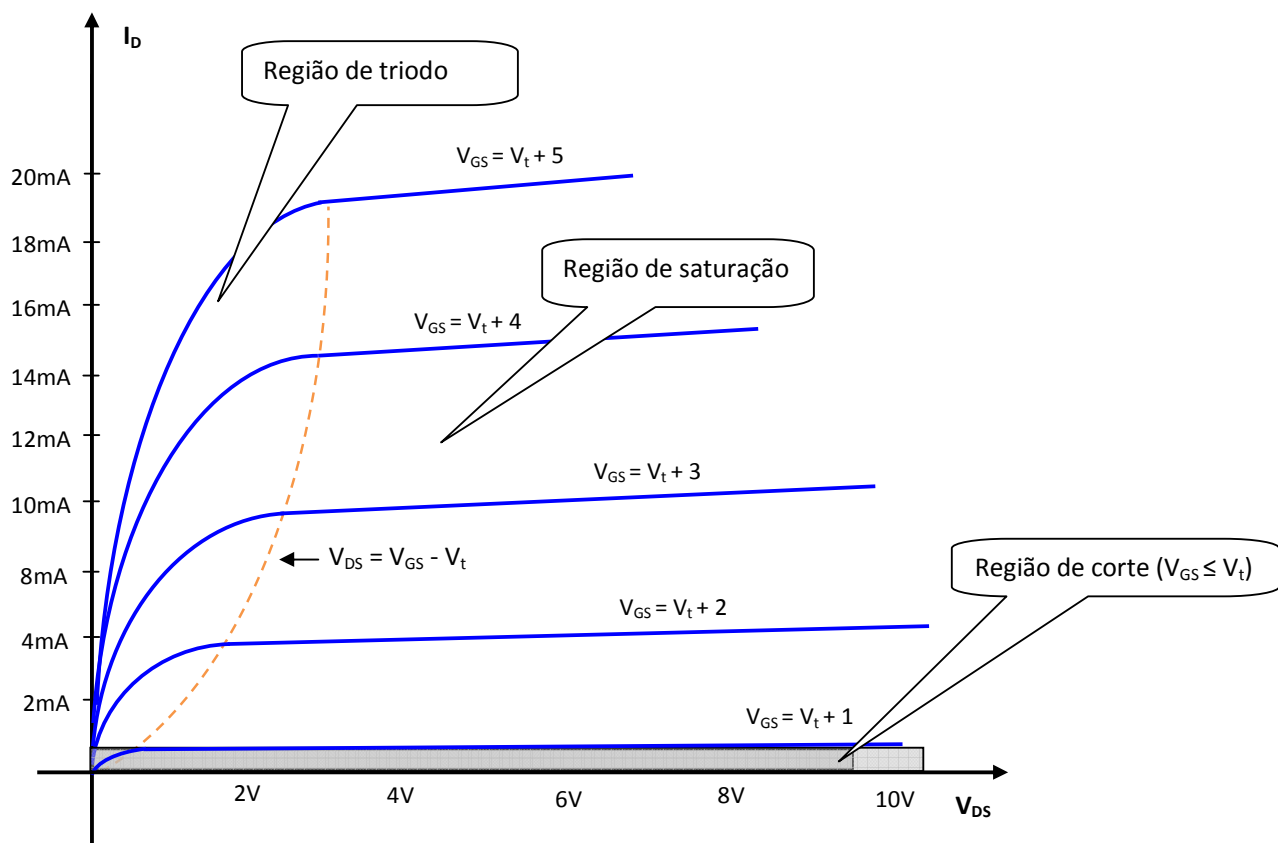
- O transistor NMOS operando na saturação com o canal estrangulado.



- ✓ O terminal da porta (G), por ser eletricamente isolado através do óxido, possui corrente nula.
- ✓ A corrente do dreno é igual a corrente da fonte.

## • Curvas Características

- Característica  $I_D - V_{DS}$  parametrizada por  $V_{GS}$

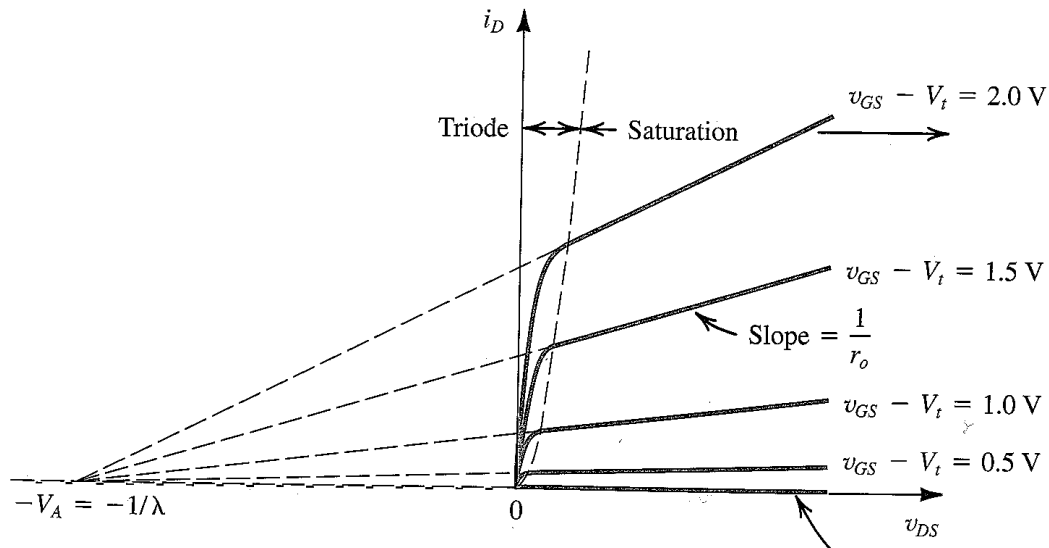


Observação:

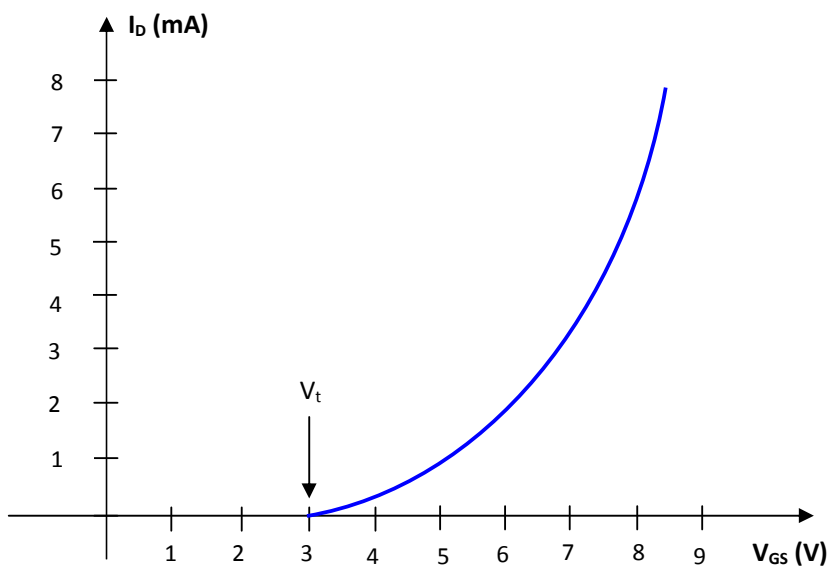
O gráfico da característica  $I_D - V_{DS}$  mostra que a corrente do dreno possui uma leve dependência linear com  $V_{DS}$  na região de saturação. Essa dependência pode ser considerada analiticamente pela incorporação do fator  $(1 + \lambda V_{DS})$  na equação de  $I_D$ , onde  $\lambda = 1/V_A$ , como se segue:

$$I_D = K(V_{GS} - V_t)^2(1 + \lambda V_{DS})$$

Onde  $\lambda$  é um parâmetro do MOSFET.  $V_A$  é uma tensão positiva semelhante a tensão Early do TBJ, como mostra seguinte figura:



- Característica  $I_D - V_{GS}$



## • Polarização

*O termo polarização significa a aplicação de tensões DC em um circuito para estabelecer valores fixos de corrente e tensão. O Ponto de polarização (ponto quiescente) deve ser localizado na região ativa e dentro dos valores máximos permitido.*

- Equações importantes no projeto do circuito de polarização.

$$I_D = K(V_{GS} - V_t)^2$$

$$I_D = I_S$$

$$I_G = 0$$

- Para a polarização do MOSFET em uma sua região de saturação, as seguintes condições devem ser satisfeitas:

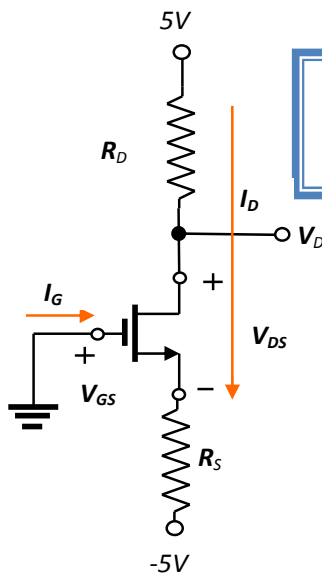
$$V_{GS} > V_t$$

$$V_{DS} > V_{GS} - V_t$$

**OBS:** A equação da corrente de dreno pode fornecer dois valores de  $V_{GS}$ . Desses valores, apenas um atenderá as condições para a polarização da região de saturação, o outro valor não tem significado físico. Se os dois valores de  $V_{GS}$  não atenderem as condições, significa que o transistor não está em sua região de saturação.

## • Circuitos de Polarização

- Exemplo 1:



Projete o circuito de modo que o transistor opere com  $I_D = 0,4 \text{ mA}$  e  $V_D = +1\text{V}$ . O transistor NMOS tem  $V_t = 2\text{V}$  e  $K = 0,4 \text{ mA/V}^2$ . Suponha que  $\lambda = 0$ .

Temos que:

$$V_D = 5 - R_D I_D$$

$$1 = 5 - R_D \times 0,4 \times 10^{-3}$$

$$R_D = 10k\Omega$$

o que significa operação na região de saturação, portanto:

$$I_D = K(V_{GS} - V_t)^2$$

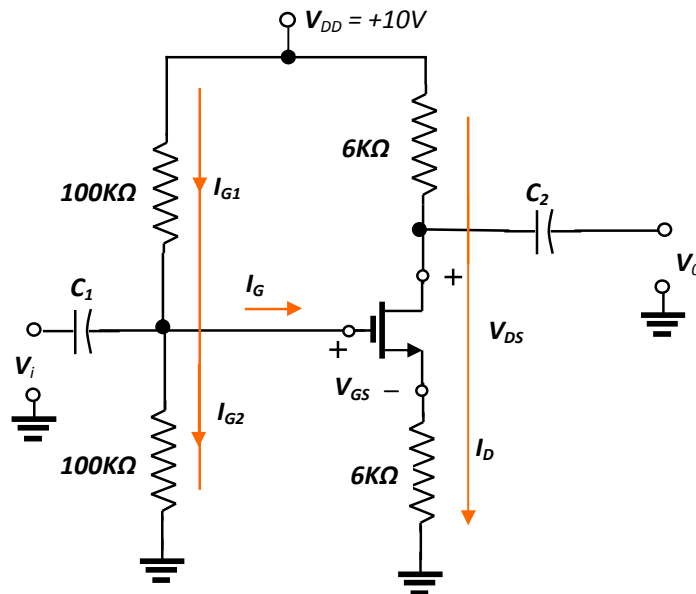
$$0,4 = 0,4(V_{GS} - 2)^2$$

Essa equação do segundo grau produz dois valores de  $V_{GS}$ , 1V e 3V. O primeiro valor não tem significado físico, pois ele é menor que  $V_t$ . Portanto  $V_{GS} = 3V$ . Desse modo temos que:

$$R_S = \frac{V_S - V_{SS}}{I_D}$$

$$= \frac{-3 - (-5)}{0,4 \times 10^{-3}} = 5k\Omega$$

- Exemplo 2:



Determine todas as tensões dos nós e as correntes nas malhas. Suponha  $V_t = 1V$  e  $K = 0,5 \text{ mA/V}^2$ . Suponha  $\lambda = 0$ .

Para análise DC,  $X_{C1} = X_{C2} \rightarrow \infty$

Como a corrente na porta é nula, podemos fazer o divisor de tensão  $R_{G1}$  e  $R_{G2}$ :

$$V_G = 10 \times \frac{100}{100 + 100} = 5V$$

$$I_{G1} = I_{G2} = \frac{10}{100 + 100} = 0,05mA$$

Com essa tensão positiva na porta, o transistor NMOS está em condução. Mas não podemos determinar se ele opera na região de triodo ou saturação. Podemos supor uma operação na região de saturação e verificar a validade da suposição.

A tensão na fonte é:

$$V_{GS} = 5 - 6I_D$$

Portanto,  $I_D$  é dado por:

$$I_D = K(V_{GS} - V_t)^2$$

$$I_D = 0,5 \times 10^{-3} (5 - 6I_D - 1)^2$$

$$18I_D^2 - 25I_D + 8 = 0$$

A equação de segundo grau produz dois valores para  $I_D$ : 0,89 mA e 0,5 mA. O primeiro valor não tem significado físico pois produz uma tensão de fonte maior que a tensão de porta. Portanto:

$$I_D = 0,5 \text{ mA}$$

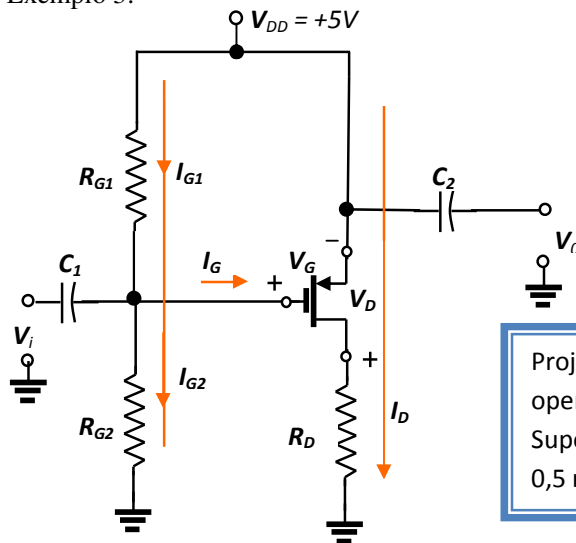
$$V_S = 0,5 \times 6 = 3 \text{ V}$$

$$V_{GS} = 5 - 3 = 2 \text{ V}$$

$$V_D = 10 - 6 \times 0,5 = 7 \text{ V}$$

Como  $V_{DS} > V_{GS} - V_t$ , o transistor está realmente operando na saturação.

- Exemplo 3:



Projete o circuito de modo que o transistor opere na saturação com  $I_D = 0,5 \text{ mA}$  e  $V_D = 3 \text{ V}$ . Suponha o transistor PMOS tendo  $V_t = -1 \text{ V}$  e  $K = 0,5 \text{ mA/V}^2$ . Suponha  $\lambda = 0$ .

Para análise DC,  $X_{C1} = X_{C2} \rightarrow \infty$

Podemos escrever:

$$I_D = K(V_{GS} - V_t)^2$$

$$0,5 = 0,5[V_{GS} - (-1)]^2$$

Como  $V_{GS}$  deve ser negativo ( $V_{GS} < V_t$ ), a única solução que faz sentido físico é  $V_{GS} = -2V$ . Como a tensão na fonte é 5V, a tensão na porta deve ser 3V. Dessa forma, temos o divisor de tensão:

$$3 = 5 \frac{R_{G2}}{R_{G2} + R_{G1}}$$

$$3R_{G1} = 2R_{G2}$$

Uma possível solução seria  $R_{G1} = 2M\Omega$  e  $R_{G2} = 3M\Omega$ .

O valor de  $R_D$  pode ser encontrado por:

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{3}{0,5} = 6k\Omega$$

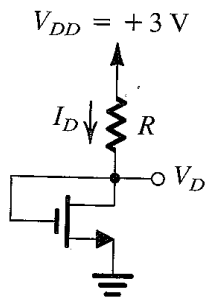
A operação no modo de saturação será mantida até o ponto em que  $V_D$  exceder  $V_G$  por  $|V_{tl}|$ , que é:

$$V_{Dmax} = 3 + 1 = 4V$$

A máxima resistência será dada por:

$$R_D = \frac{4}{0,5} = 8k\Omega$$

• Exemplo 4:



Projete o circuito para obter uma corrente  $I_D = 80 \mu A$ . Suponha o transistor NMOS tendo  $V_t = 0,6V$  e  $K = 0,5 \text{ mA/V}^2$ . Suponha  $\lambda = 0$ .

Como  $V_{DG} = 0$ ,  $V_D = V_G$  o transistor está operando na saturação, dessa forma:

$$I_D = K(V_{GS} - V_t)^2$$

$$V_{GS} = V_t + \sqrt{\frac{I_D}{K}}$$

$$V_{GS} = 0,6 + \sqrt{\frac{0,08}{0,5}} = 1V$$

A tensão de dreno será:

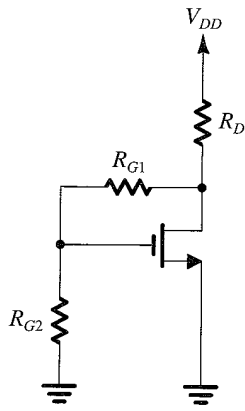
$$V_D = V_G = 1V$$

O valor de R será:

$$R = \frac{V_{DD} - V_D}{I_D} = \frac{3 - 1}{0,08} = 25k\Omega$$



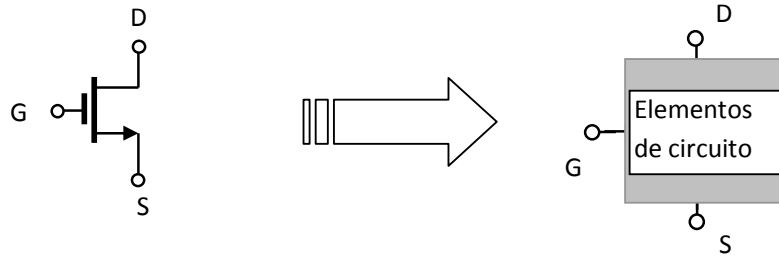
- Exercício:



Projete o circuito para polarizar o transistor com corrente de dreno  $I_D = 2 \text{ mA}$  e  $V_{DS}$  grande o suficiente para permitir uma excursão máxima do sinal de 2 V no dreno. Suponha que o transistor NMOS tenha  $V_t = 1,2 \text{ V}$  e  $K = 1,6 \text{ mA/V}^2$ . Use  $22 \text{ M}\Omega$  como o maior resistor da malha de realimentação.

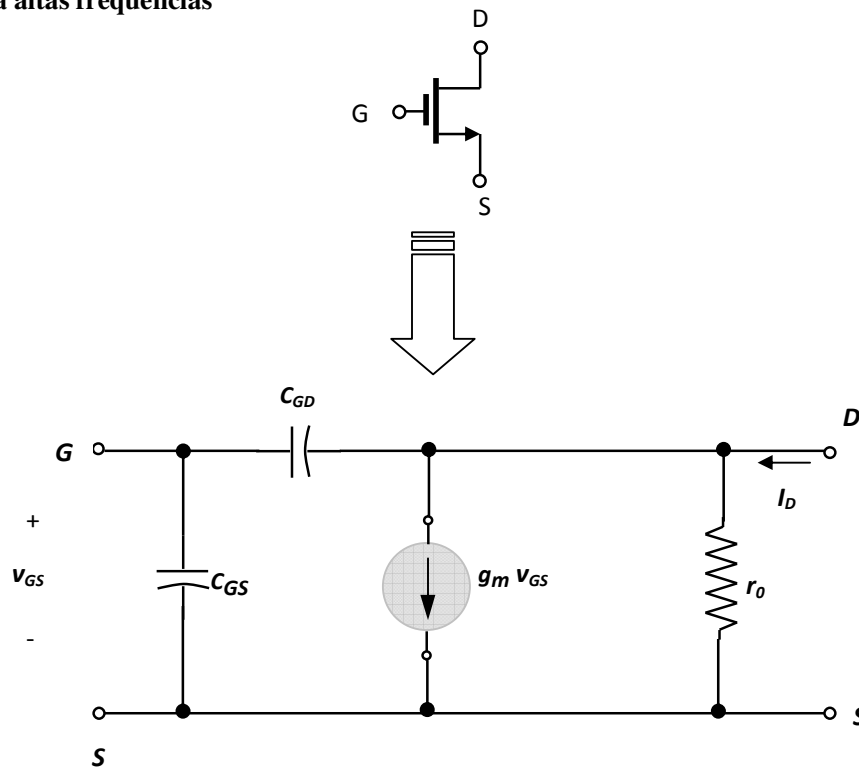
## • MOSFET - Modelo AC

*Assim como o TBJ, o MOSFET também pode ser representado por um modelo para descrever, de maneira simplificada, sua operação AC.*

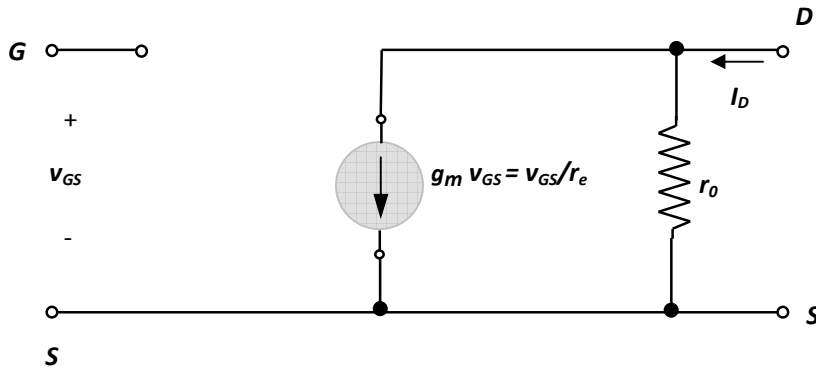


## • Modelo $\pi$ -híbrido

- Modelo para altas frequências



- Modelo para baixas frequências (simplificado)



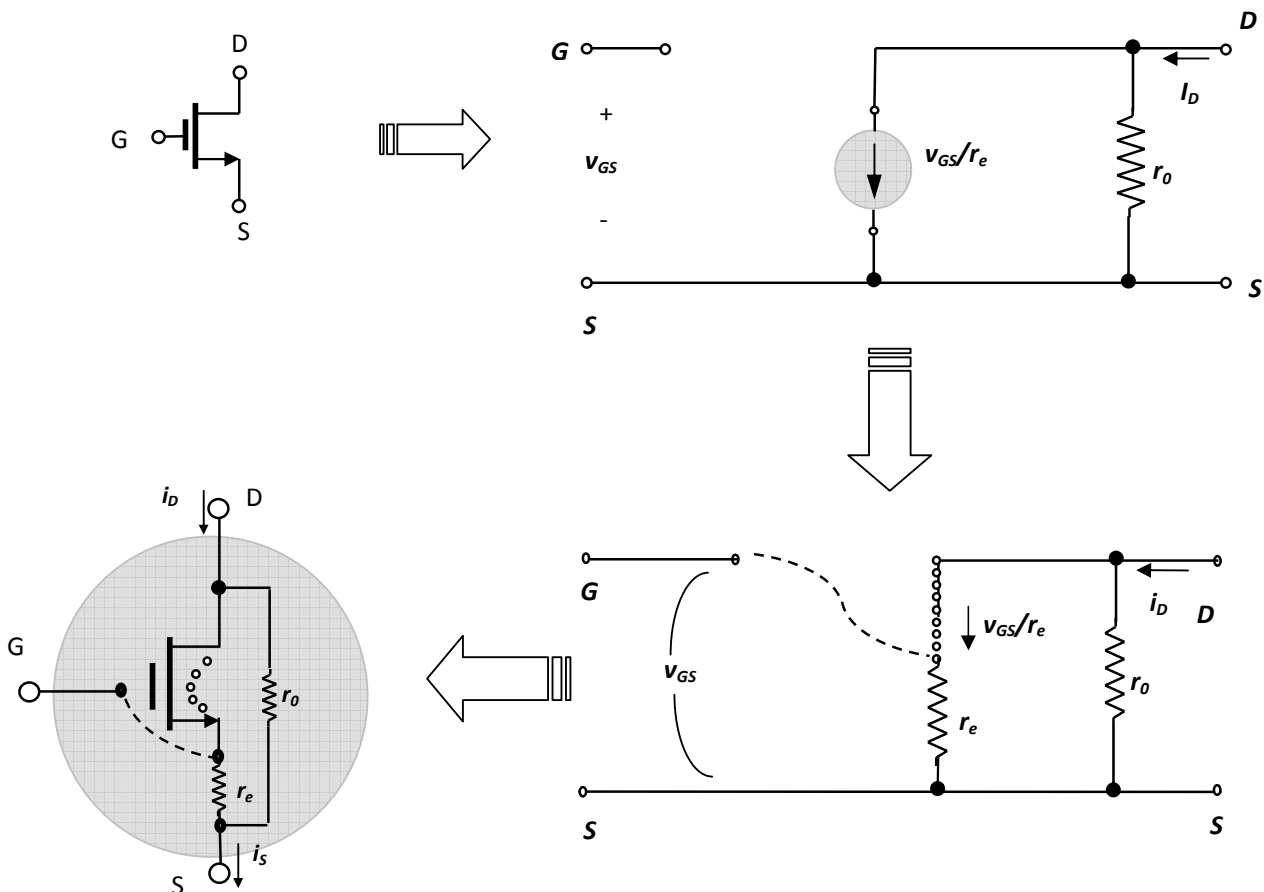
$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} = 2K(V_{GS} - V_t) = 2\sqrt{KI_D} = \frac{2I_D}{V_{GS} - V_t}$$

$$r_e = \frac{1}{g_m}$$

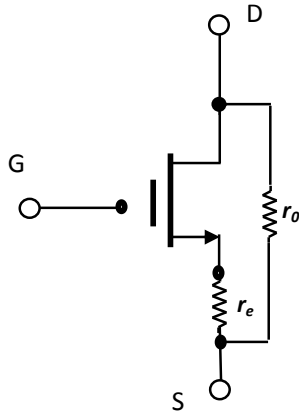
$$r_o = \frac{V_A}{I_D}$$

$$V_A = \frac{1}{\lambda}$$

### ➤ Nova apresentação do modelo $\pi$ -híbrido (simplificado)

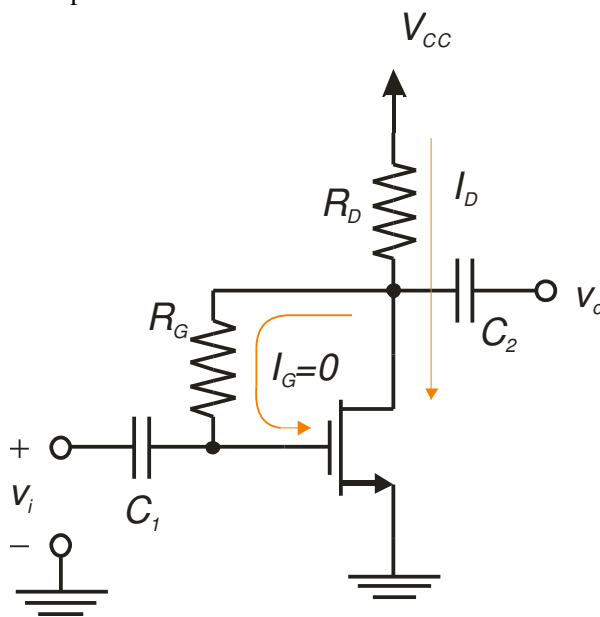


Modelo de pequenos sinais:



➤ **Análise para pequenos sinais de circuitos com um transistor**

- Exemplo 5:



**Na Banda de interesse,  $XC_1$  e  $XC_2$  estão em curto e para análise incremental (AC) toda fonte de tensão constante está em curto com o terminal comum.**



✓ **Impedância de saída ( $Z_o$ )**

Novamente, por inspeção da figura acima, a impedância de saída do circuito é igual à:

$$Z_o = R_G // R_D // r_o$$

- ❖ Note que para determinação de  $Z_o$  as tensões independentes, no caso somente  $v_i$ , são colocadas em curto com o terra.
- ❖ A corrente  $i_x$  é mostrada para evidenciar que esta seria a corrente que uma fonte de tensão ( $v_o$ ) conectada a saída forneceria ao circuito com uma impedância de saída  $Z_o$ .

✓ **Ganho de tensão ( $A_v$ )**

Da figura temos:

$$i_D = i_{D1} + i_{D2} + i_G \Rightarrow -\frac{v_o}{R_D} = \frac{v_i}{r_e} + \frac{v_o}{r_o} + \frac{v_o - v_i}{R_G}$$

$$v_o \left( \frac{1}{R_D} + \frac{1}{r_o} + \frac{1}{R_G} \right) = v_i \left( \frac{1}{R_G} - \frac{1}{r_e} \right)$$

$$\frac{v_o}{v_i} = R_G // r_o // R_D \left( \frac{1}{R_G} - \frac{1}{r_e} \right)$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = Z_o \left( \frac{1}{R_G} - \frac{1}{r_e} \right)$$

✓ **Ganho de corrente ( $A_i$ )**

Definindo a corrente de saída como a corrente  $i_D$ , temos:

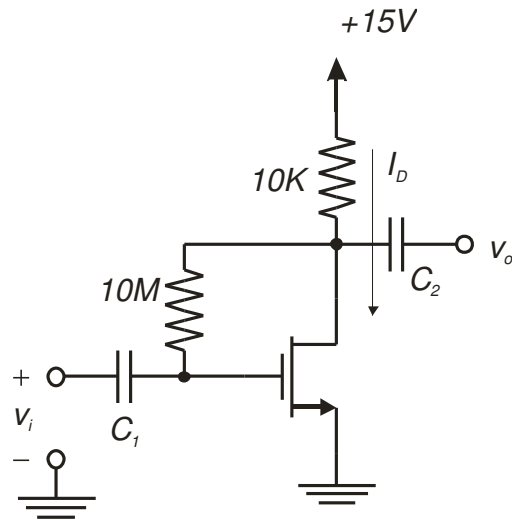
$$i_i = \frac{v_i}{Z_i}, i_o = i_D = -\frac{v_o}{R_D}$$

Dividindo as duas equações temos:

$$\frac{i_o}{i_i} = -\frac{v_o}{R_D} \cdot \frac{Z_i}{v_i}$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = A_v \cdot \frac{Z_i}{R_D}$$

Exercício:



Determine (a)  $Z_o$ , (b)  $A_v$ , (c)  $Z_i$  e  $A_i$ . Suponha que o transistor NMOS tenha  $V_t = 1,5 \text{ V}$ ,  $K = 0,125 \text{ mA/V}^2$  e  $V_A = 50 \text{ V}$ . Na Banda de interesse,  $XC_1$  e  $XC_2$  estão em curto.

Primeiramente devemos avaliar o ponto de operação cc do circuito como segue:

$$I_D = K(V_{GS} - V_t)^2$$

$$I_D = 0,125(V_{GS} - 1,5)^2$$

Como a corrente em  $R_G$  é nula temos que  $V_{GS} = V_D$ . Assim temos:

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

Além disso,

$$V_D = 15 - 10I_D \quad (2)$$

Resolvendo as equações (1) e (2) juntas, obtemos:

$$\begin{cases} I_D = 1,06 \text{ mA} \\ V_D = 4,4 \text{ V} \end{cases}$$

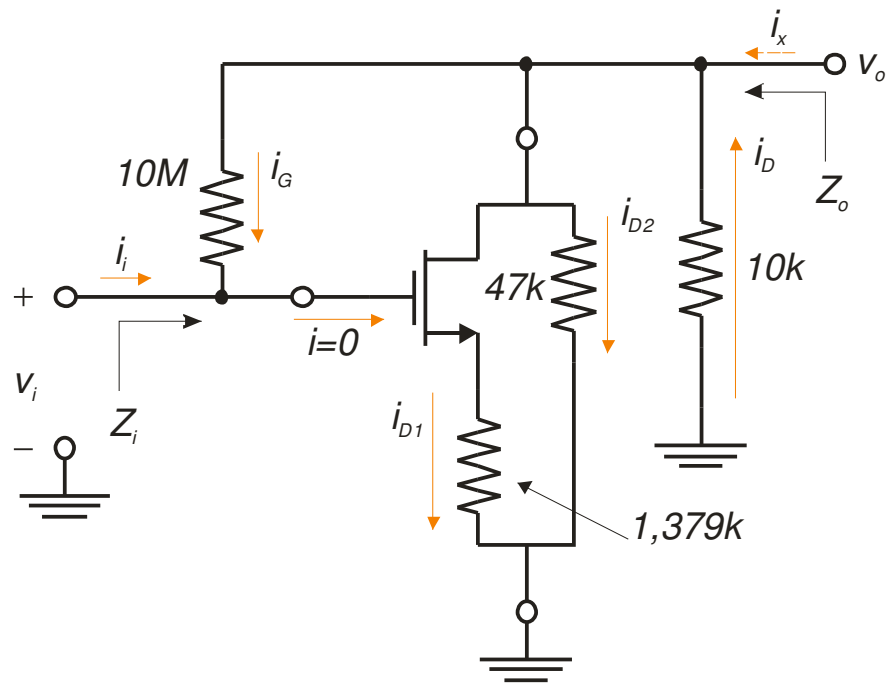
(A outra solução da equação quadrática não é fisicamente aceitável.)

Assim temos:

$$r_o = \frac{V_A}{I_D} = \frac{50}{1,06} = 47 \text{ k}\Omega$$

$$r_e = \frac{1}{2K(V_{GS} - V_t)} = \frac{1}{2 \times 0,125(4,4 - 1,5)} = 1,379 \text{ k}\Omega$$

Modelo AC:



(a) Determinar  $Z_o$ :

$$Z_o = R_G // R_D // r_o$$

$$Z_o = 8,24k\Omega$$

(b) Determinar  $A_v$ :

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = Z_o \left( \frac{1}{R_G} - \frac{1}{r_e} \right)$$

$$A_v = -5,97V/V$$

(c) Determinar  $Z_i$ :

$$Z_i \equiv \frac{v_i}{i_i} = \frac{R_G}{1 - A_v}$$

$$Z_i = \frac{10 \times 10^6}{1 - (-5,97)} = 1,34M\Omega$$

(d) Determinar  $A_i$ :

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = A_v \cdot \frac{Z_i}{R_D}$$

$$A_i = 5,97 \cdot \frac{1,34 \times 10^6}{10 \times 10^3} = 800 A/A$$