



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SUDESTE DO PARÁ - UNIFESSPA**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E ENGENHARIAS - IGE**  
**FACULDADE DE COMPUTAÇÃO E ENG. ELÉTRICA – FACEEL**  
**CURSO ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO**

# Microeletrônica

Prof. José Carlos Da Silva

[jcdsilv@hotmail.com](mailto:jcdsilv@hotmail.com)

[jose-carlos.silva@unifesspa.edu.br](mailto:jose-carlos.silva@unifesspa.edu.br)

whatsApp: 19-993960156

## Outubro/2021

# Conteúdo

- Introdução;
- Transistores (FET):
  - Análise de pequenos sinais (Análise AC ou CA):
    - Análise AC ou CA (Impedância de entrada e saída, ganho e etc).
  - Simulação (Análise AC ou CA):
    - Polarização por realimentação;
    - Polarização por Divisor de Tensão.

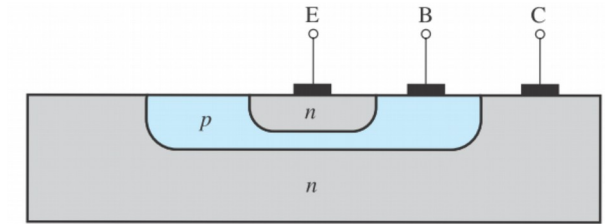
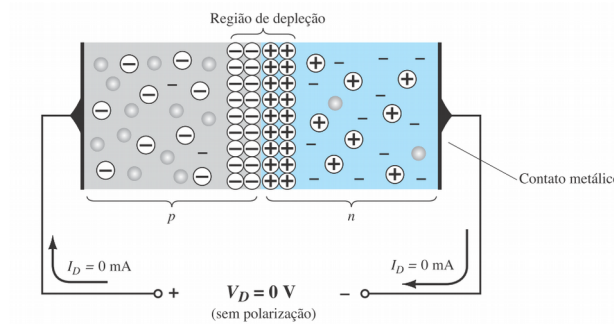
# Introdução

## Vacuum Tube Op-Amps

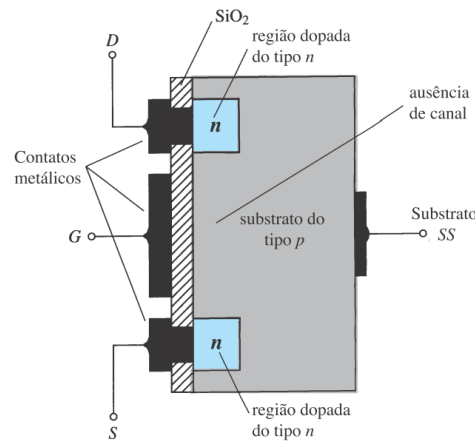
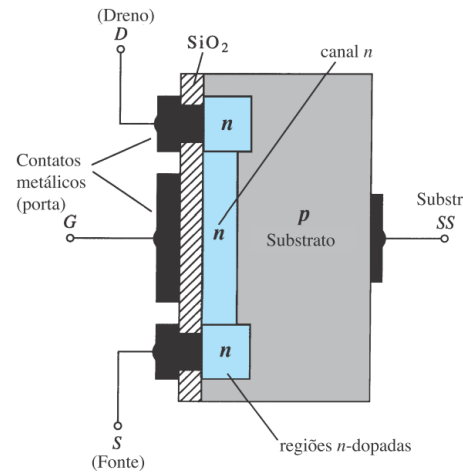
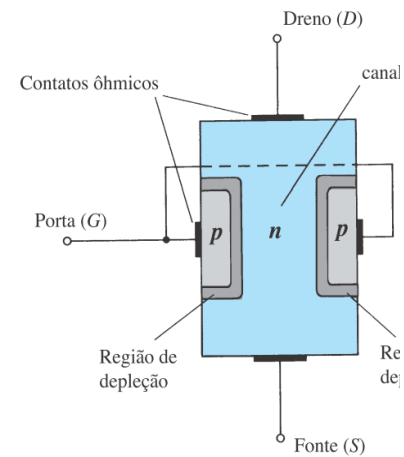
- First op amps built in 1930's-1940's
  - Technically feedback amplifiers due to only having one useable input
- Used in WWII to help how to strike military targets
  - Buffers, summers, differentiators, inverters
- Took  $\pm 300V$  to  $\pm 100V$  to power



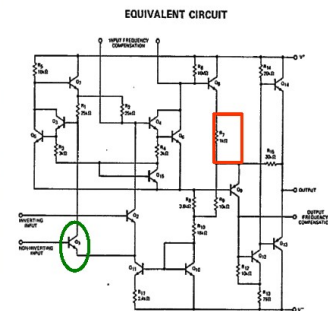
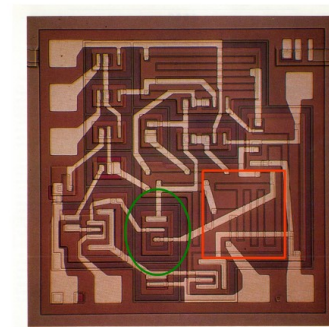
[http://en.wikipedia.org/wiki/Image:K2-W\\_vacuum\\_tube\\_op-amp.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/Image:K2-W_vacuum_tube_op-amp.jpg)



Cross section of an npn BJT.



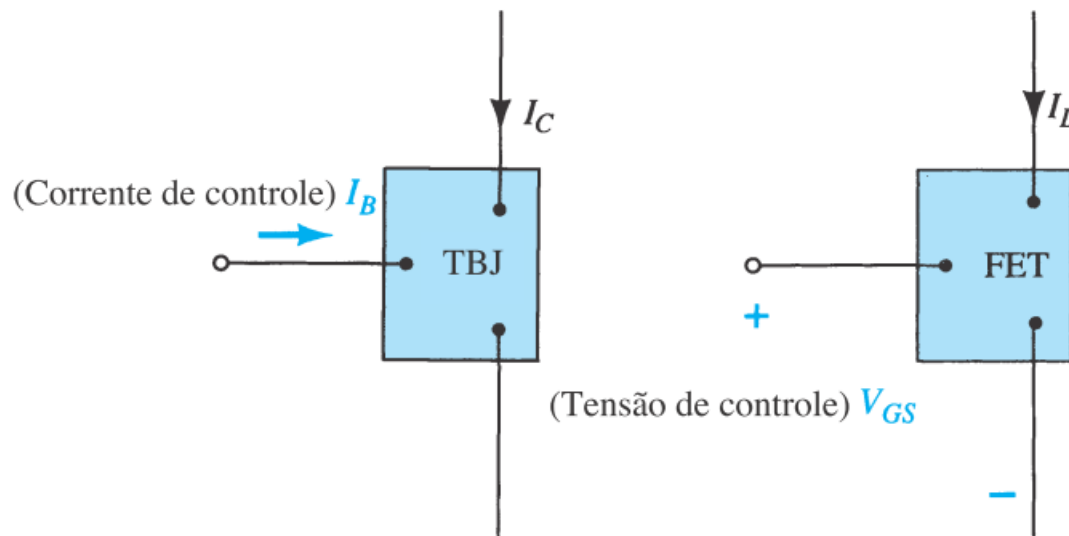
## (Exemplos de AmpOp - 1964 - Op-Amp A702, Fairchild)



Referência: Notas de Aulas do Prof. Wilhelmus Van Noije

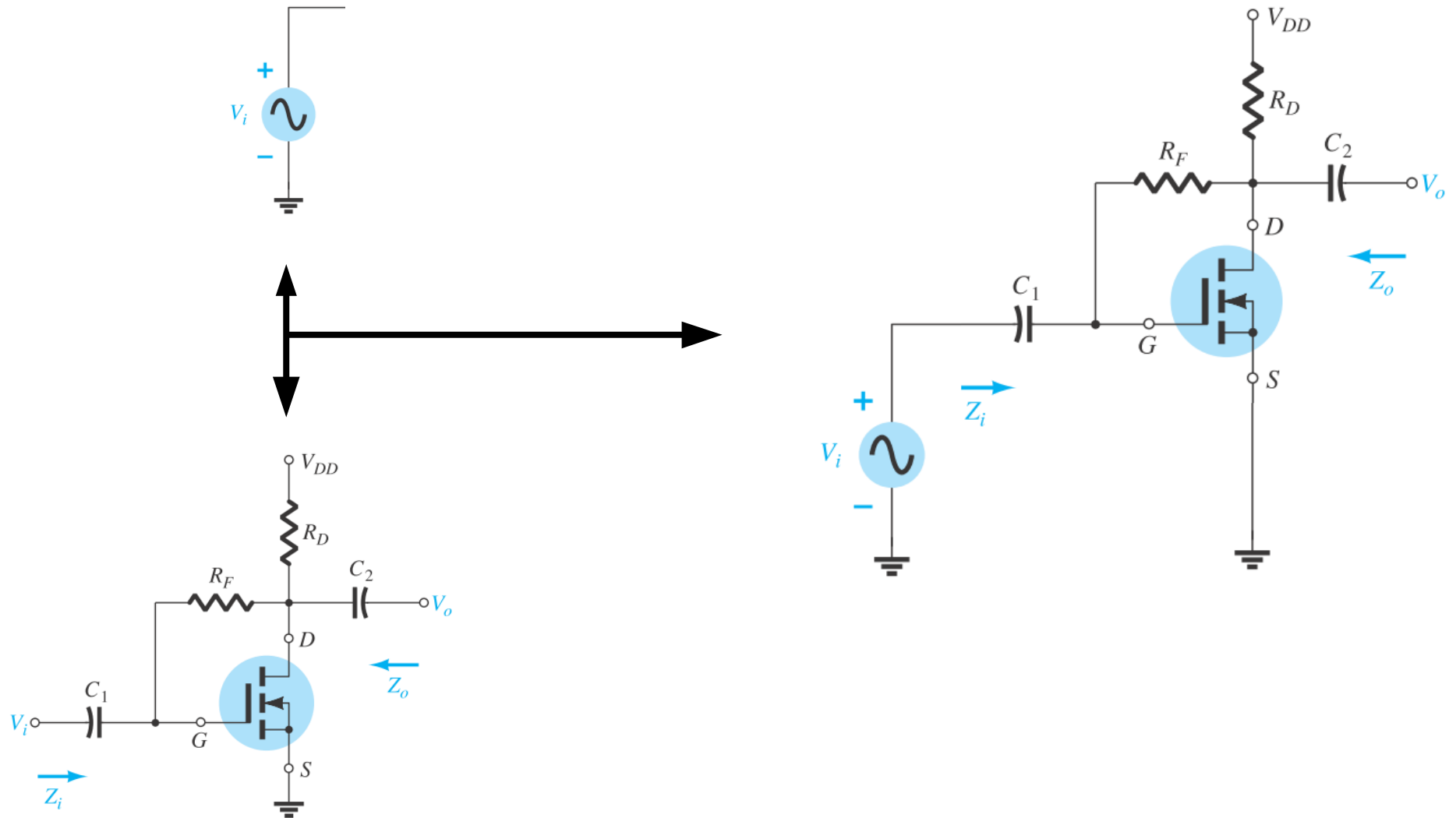
# Transistor Efeito de Campo (FET)

- Principais diferenças entre BJT x FET:
  - A variável de controle para um transistor TBJ é um valor de corrente, enquanto para o FET essa variável é um valor de tensão.



# Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET)

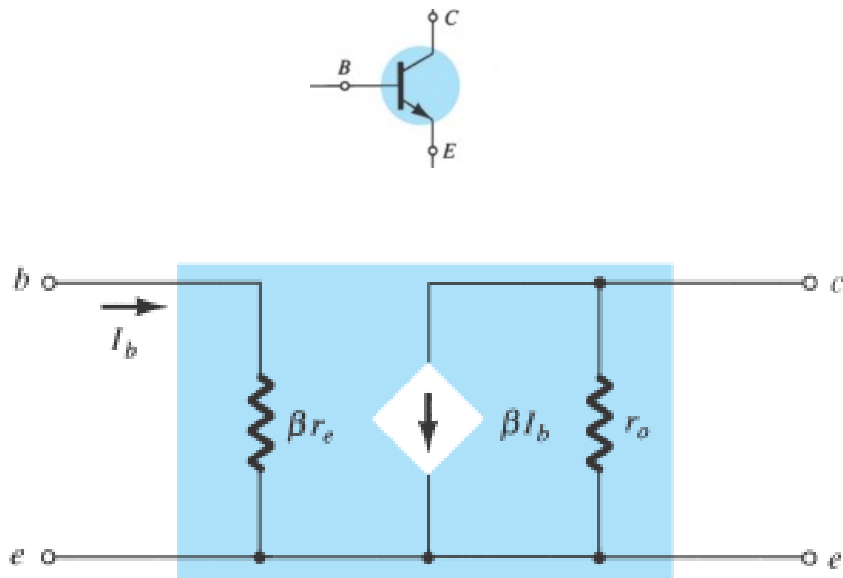
(Análise de pequenos sinais – Análise AC ou CA)



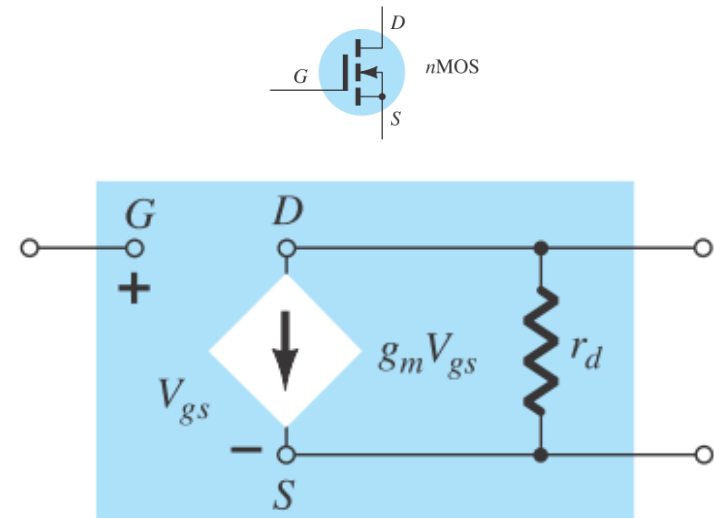
# Transistor Efeito de Campo de Junção (MOSFET)

(Análise de pequenos sinais – Análise AC ou CA)

Circuito Equivalente AC ou CA (TBJ)



Circuito Equivalente AC ou CA (MOSFET)



Meta: Representar as grandezas elétricas e físicas dos dispositivos semicondutor (TBJ ou MOSFET) por um circuito elétrico equivalente.

# Transistor Efeito de Campo de Junção (MOSFET)

## (Análise de pequenos sinais – Análise AC ou CA)

### MODELO AC ou CA

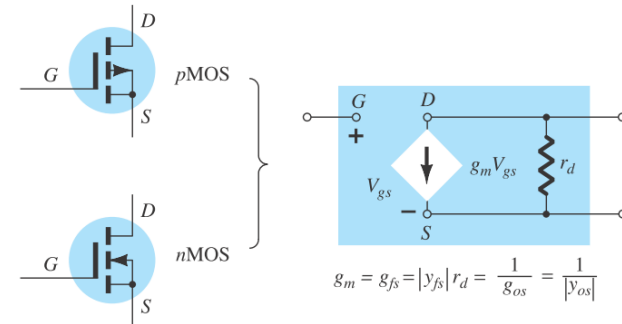
#### – $g_m$ (transcondutância):

- O MOSFET tipo intensificação (E-MOSFET) pode ser um dispositivo de canal n (nMOS) ou de canal p (pMOS), como mostra a Figura ao lado. O circuito equivalente CA para pequenos sinais dos dois tipos de dispositivo é mostrado nessa figura, revelando um circuito aberto entre a porta e o canal dreno-fonte e uma fonte de corrente do dreno para a fonte cujo valor depende da tensão porta-fonte.
- Há uma impedância de saída do dreno para a fonte  $r_d$  que geralmente é fornecida nas folhas de dados como uma condutância  $g_{os}$  ou uma admitância  $y_{os}$ . A transcondutância do dispositivo  $g_m$  aparece nas folhas de dados como uma admitância de transferência direta  $y_{fs}$ . Em nossa análise dos JFETs, deduzimos uma equação para  $g_m$  a partir da equação de Shockley. Para os E-MOSFETs, a relação entre a corrente de saída e a tensão de controle é definida por:

$$I_D = k(V_{GS} - V_{GS(Th)})^2$$

Visto que  $g_m$  é ainda definida por

$$g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}}$$



### Modelo CA de pequenos sinais para o MOSFET tipo intensificação.

podemos derivar a equação de transferência para determinar  $g_m$  como um ponto de operação. Isto é,

$$g_m = \frac{dI_D}{dV_{GS}} = \frac{d}{dV_{GS}} k(V_{GS} - V_{GS(Th)})^2$$

$$g_m = k \frac{d}{dV_{GS}} (V_{GS} - V_{GS(Th)})^2$$

$$g_m = 2k(V_{GS} - V_{GS(Th)}) \frac{d}{dV_{GS}} (V_{GS} - V_{GS(Th)})$$

$$g_m = 2k(V_{GS} - V_{GS(Th)})(1 - 0)$$

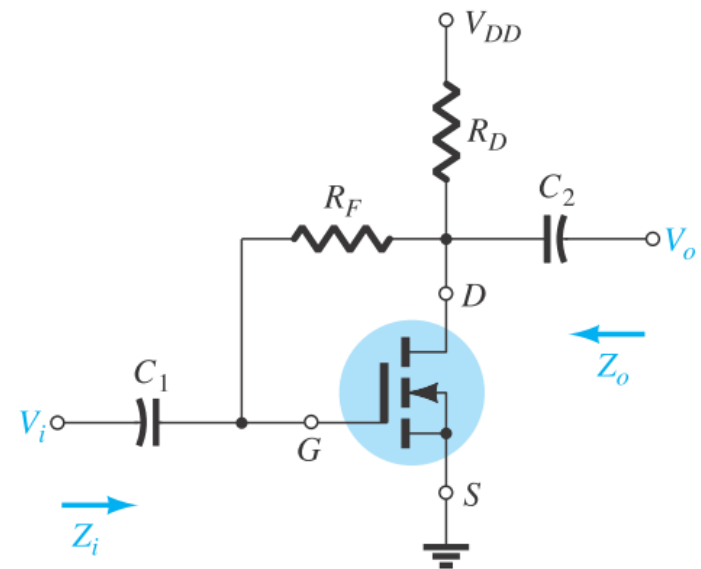
Então,

$$g_m = 2k(V_{GS_Q} - V_{GS(Th)})$$

# Transistor Efeito de Campo de Junção (MOSFET) ( Configuração Por Realimentação)

Análise AC ou CA:

- A configuração com realimentação de dreno para o E-MOSFET é mostrada na Figura ao lado. Lembre-se de que vimos, na análise CC, que é possível substituir  $R_G$  por um curto-circuito equivalente, já que  $I_G = 0$  A e, portanto,  $V_{RG} = 0$  V. Entretanto, para situações CA, essa característica proporciona uma importante alta impedância entre  $V_o$  e  $V_i$ . Caso contrário, os terminais de entrada e saída estariam conectados diretamente e  $V_o = V_i$ .



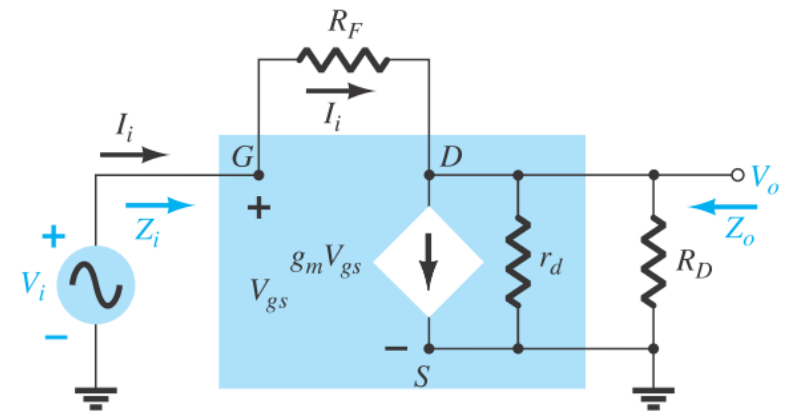
Configuração do E-MOSFET com realimentação de dreno.



# Transistor Efeito de Campo de Junção (MOSFET) ( Configuração Por Realimentação)

Análise AC ou CA:

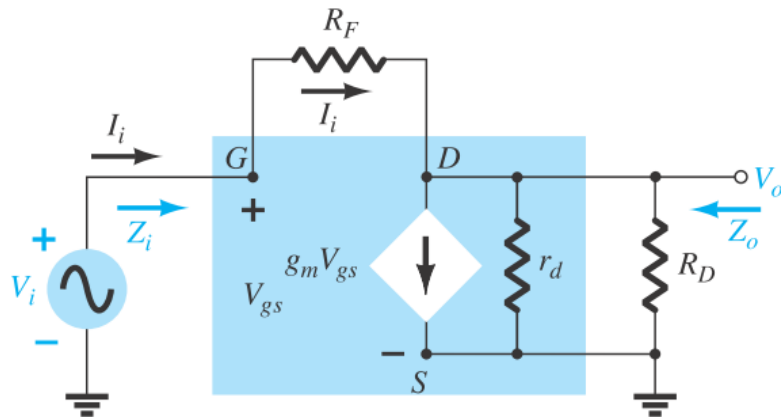
- A substituição do modelo equivalente CA para o dispositivo resulta no circuito da Figura ao lado. Observe que  $R_F$  não pertence à área sombreada correspondente ao modelo equivalente CA do dispositivo, mas conecta diretamente os circuitos de entrada e saída.



Equivalente CA da Configuração do E-MOSFET com realimentação de dreno.

# Transistor Efeito de Campo de Junção (MOSFET) ( Configuração Por Realimentação)

Análise AC ou CA:



- **Zi** A aplicação da Lei das Correntes de Kirchhoff ao circuito de saída (no nó D da Figura acima) resulta em:

$$I_i = g_m V_{gs} + \frac{V_o}{r_d \parallel R_D}$$

e

$$V_{gs} = V_i$$

de modo que 
$$I_i = g_m V_i + \frac{V_o}{r_d \parallel R_D}$$

ou 
$$I_i - g_m V_i = \frac{V_o}{r_d \parallel R_D}$$

Portanto, 
$$V_o = (r_d \parallel R_D)(I_i - g_m V_i)$$

com 
$$I_i = \frac{V_i - V_o}{R_F} = \frac{V_i - (r_d \parallel R_D)(I_i - g_m V_i)}{R_F}$$

e 
$$I_i R_F = V_i - (r_d \parallel R_D)I_i + (r_d \parallel R_D)g_m V_i$$

de modo que 
$$V_i[1 + g_m(r_d \parallel R_D)] = I_i[R_F + r_d \parallel R_D]$$

e, finalmente,

$$Z_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{R_F + r_d \parallel R_D}{1 + g_m(r_d \parallel R_D)}$$

Geralmente,  $R_F \gg r_d \parallel R_D$ , o que resulta em:

$$Z_i \cong \frac{R_F}{1 + g_m(r_d \parallel R_D)}$$

Para  $r_d \geq 10R_D$ ,

$$Z_i \cong \frac{R_F}{1 + g_m R_D} \quad R_F \gg r_d \parallel R_D, r_d \geq 10R_D$$

# Transistor Efeito de Campo de Junção (MOSFET) ( Configuração Por Realimentação)

Análise AC ou CA:

- **Z<sub>o</sub>** A substituição de  $V_i=0V$  resulta em  $V_{gs}=0V$  e  $g_m V_{gs} = 0$ , com um curto-circuito da porta para o terra como mostra a Figura a figura acima. As resistências  $R_F$ ,  $r_d$  e  $R_D$  estão, portanto, em paralelo e:

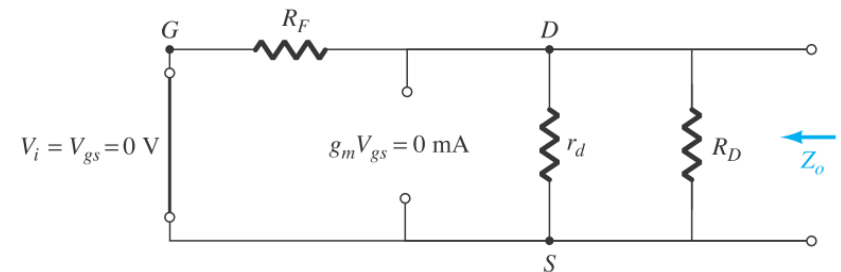
$$Z_o = R_F \parallel r_d \parallel R_D$$

Normalmente,  $R_F$  é muito maior do que  $r_d \parallel R_D$ .

Então,  $Z_o \cong r_d \parallel R_D$

e com  $r_d \geq 10R_D$ ,

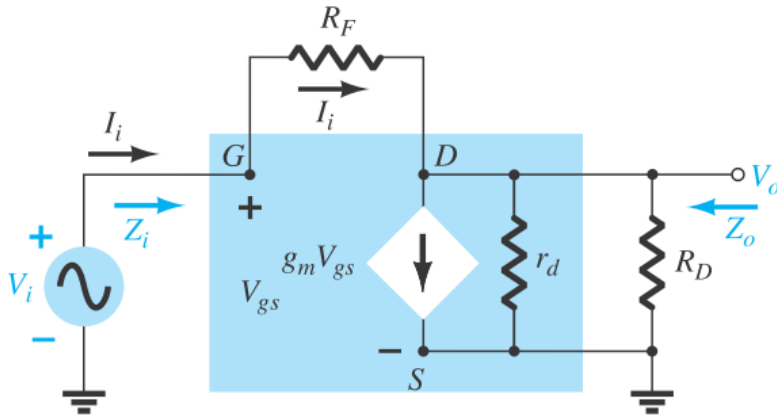
$$Z_o \cong R_D \quad R_F \gg r_d \parallel R_D, r_d \geq 10R_D$$



Determinação de  $Z_o$

# Transistor Efeito de Campo de Junção (MOSFET) ( Configuração Por Realimentação)

Análise AC ou CA:



- **Av** A aplicação da Lei das Correntes de Kirchhoff ao nó D da Figura acima resulta em:

$$I_i = g_m V_{gs} + \frac{V_o}{r_d \parallel R_D}$$

$$\text{mas } V_{gs} = V_i \quad \text{e} \quad I_i = \frac{V_i - V_o}{R_F}$$

$$\text{de modo que } \frac{V_i - V_o}{R_F} = g_m V_i + \frac{V_o}{r_d \parallel R_D}$$

$$\text{e } \frac{V_i}{R_F} - \frac{V_o}{R_F} = g_m V_i + \frac{V_o}{r_d \parallel R_D}$$

$$\text{de modo que } V_o \left[ \frac{1}{r_d \parallel R_D} + \frac{1}{R_F} \right] = V_i \left[ \frac{1}{R_F} - g_m \right]$$

$$\text{e } A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{\left[ \frac{1}{R_F} - g_m \right]}{\left[ \frac{1}{r_d \parallel R_D} + \frac{1}{R_F} \right]}$$

$$\text{mas } \frac{1}{r_d \parallel R_D} + \frac{1}{R_F} = \frac{1}{R_F \parallel r_d \parallel R_D}$$

$$\text{e } g_m \gg \frac{1}{R_F}$$

de modo que

$$A_v = -g_m (R_F \parallel r_d \parallel R_D)$$

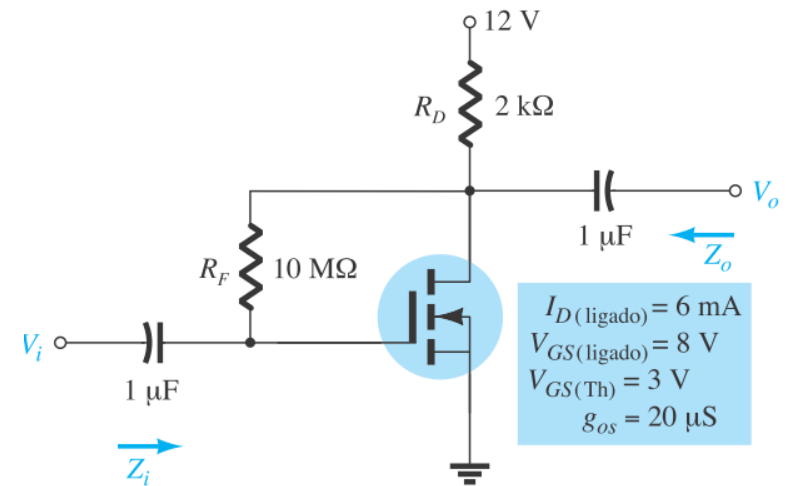
Visto que  $R_F$  é normalmente  $\gg r_d \parallel R_D$  e, se  $r_d \geq 10R_D$ ,

$$A_v \cong -g_m R_D \quad R_F \gg r_d \parallel R_D, r_d \geq 10R_D$$

# MOSFET (ATIVIDADES)

1 - O E-MOSFET da Figura abaixo foi analisado da aula 8, e o resultado obtido foi  $k=0,24 \times 10^{-3} \text{ A/V}^2$ ,  $V_{GSQ}=6,4\text{V}$  e  $I_{DQ}=2,75 \text{ mA}$ .

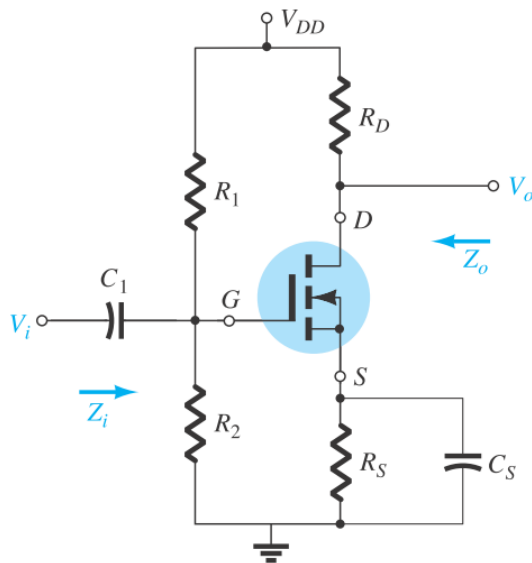
- a) Determine  $g_m$ .
- b) Determine  $r_d$ .
- c) Calcule  $Z_i$  com e sem  $r_d$ . Compare os resultados.
- d) Calcule  $Z_o$  com e sem  $r_d$ . Compare os resultados.
- e) Determine  $A_v$  com e sem  $r_d$ . Compare os resultados.



# Transistor Efeito de Campo de Junção (MOSFET) ( Configuração Com divisor de Tensão)

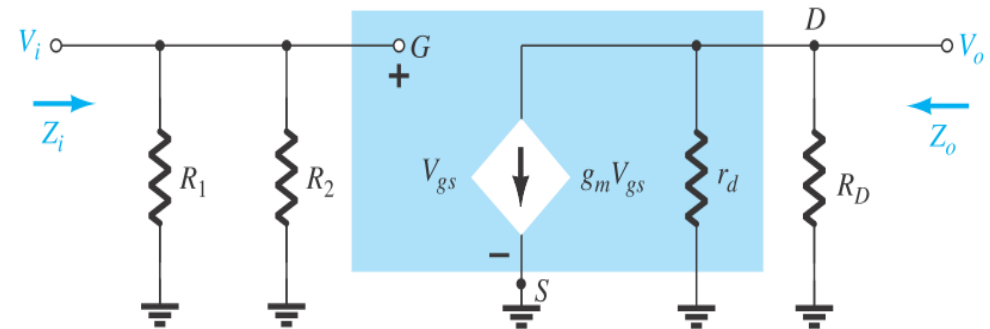
Análise AC ou CA:

- A última configuração com E-MOSFET a ser examinada é o circuito com divisor de tensão da Figura abaixo. O formato é exatamente o mesmo já analisado em seções anteriores.



Configuração do E-MOSFET com divisor de tensão

- A substituição do circuito equivalente CA do E-MOSFET resulta na configuração da Figura a seguir.



Equivalente CA da Configuração do E-MOSFET com Divisor de Tensão.

# Transistor Efeito de Campo de Junção (MOSFET) ( Configuração Com divisor de Tensão)

Análise AC ou CA:

- Dessa forma, as equações utilizadas na configuração divisor de tensão para o transistor J-FET são aplicáveis ao E-MOSFET e listadas a seguir.

$Z_i$

$$Z_i = R_1 \parallel R_2$$

$Z_o$

$$Z_o = r_d \parallel R_D$$

Para  $r_d \geq 10R_D$ ,

$$Z_o \cong R_D$$

$r_d \geq 10R_D$

$A_v$

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = -g_m(r_d \parallel R_D)$$

e se  $r_d \geq 10R_D$ ,

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} \cong -g_m R_D$$

# Referencias

- Boylestad e Nashelsky. “Dispositivos Eletrônicos e teoria de circuitos”, Prentice Hall, 11 Edição, 784p, 2013;
- Sedra e Smith, “Microeletrônica”, Pearson Prentice Hall, 5 Edição, 948p, 2007.