



**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

## Setembro/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: Fixa;
    - Polarização: autopolarização;
    - Polarização por Divisor de Tensão.

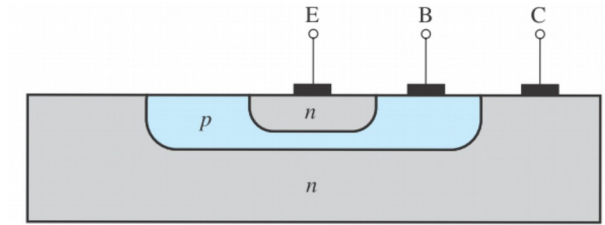
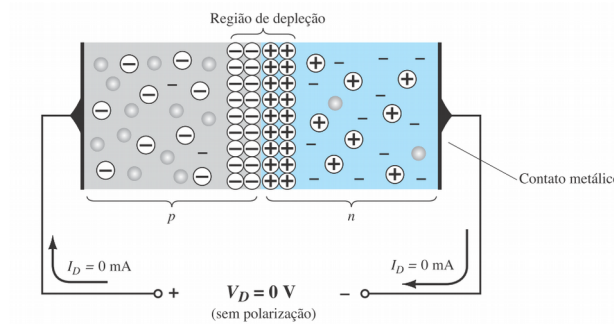
# Introdução

## Vacuum Tube Op-Amps

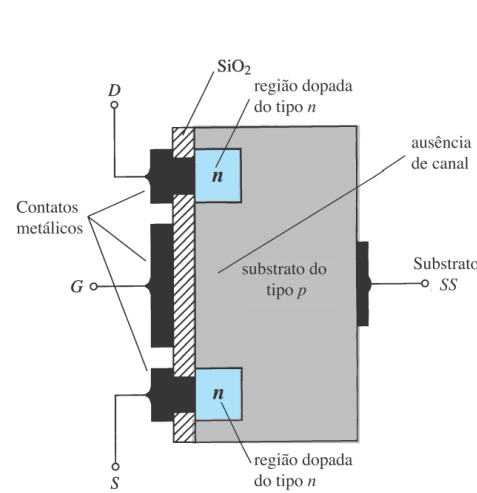
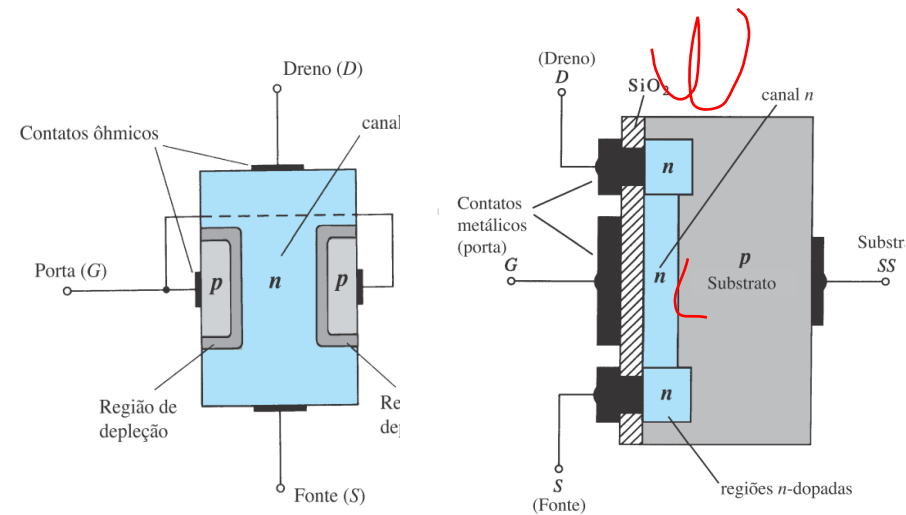
- First op amps built in 1930's-1940's
  - Technically feedback amplifiers due to only having one useable input
- Used in WWII to help how to strike military targets
  - Buffers, summers, differentiators, inverters
- Took  $\pm 300V$  to  $\pm 100V$  to power



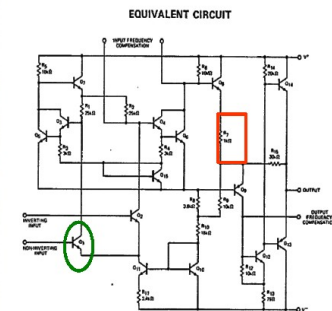
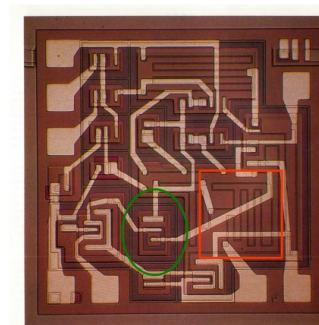
[http://en.wikipedia.org/wiki/Image:K2-w\\_vacuum\\_tube\\_op-amp.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/Image:K2-w_vacuum_tube_op-amp.jpg)



Cross section of an npn BJT.



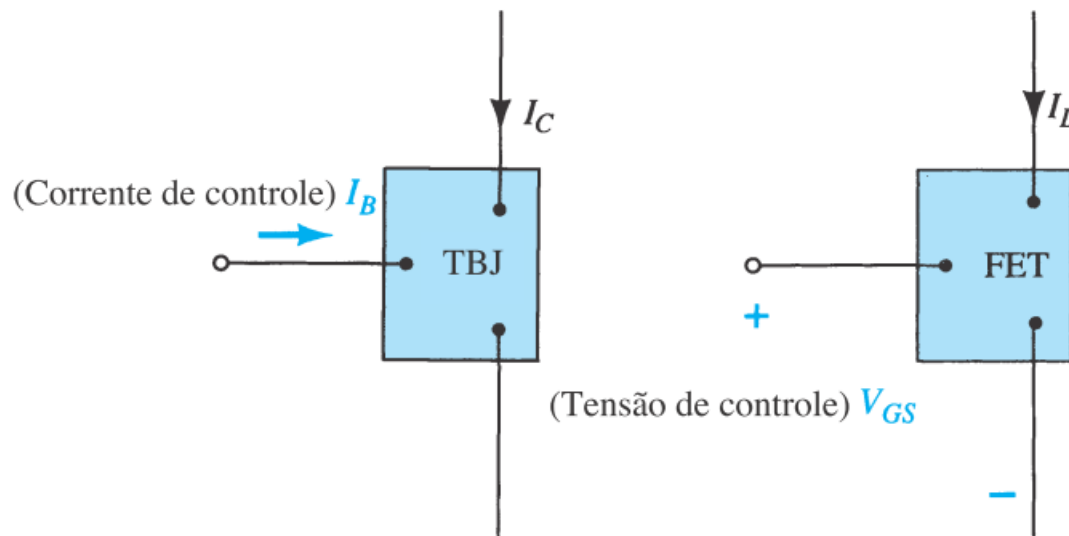
## (Exemplos de AmpOp - 1964 - Op-Amp A702, Fairchild)



Referência: Notas de Aulas do Prof. Wilhelmus Van Noije

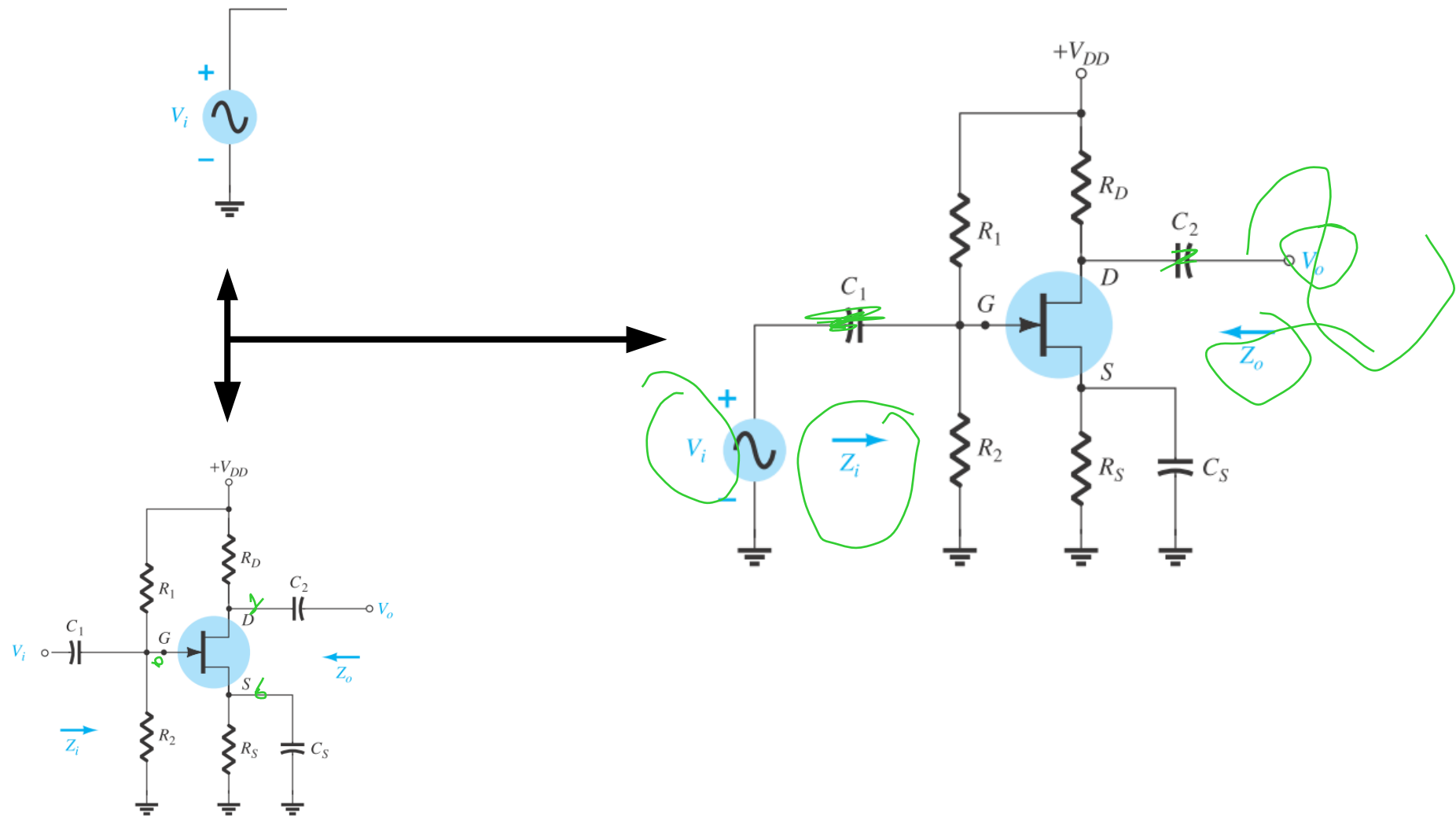
# Transistor Efeito de Campo (FET)

- 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)

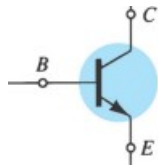
(Análise de pequenos sinais – Análise AC ou CA)



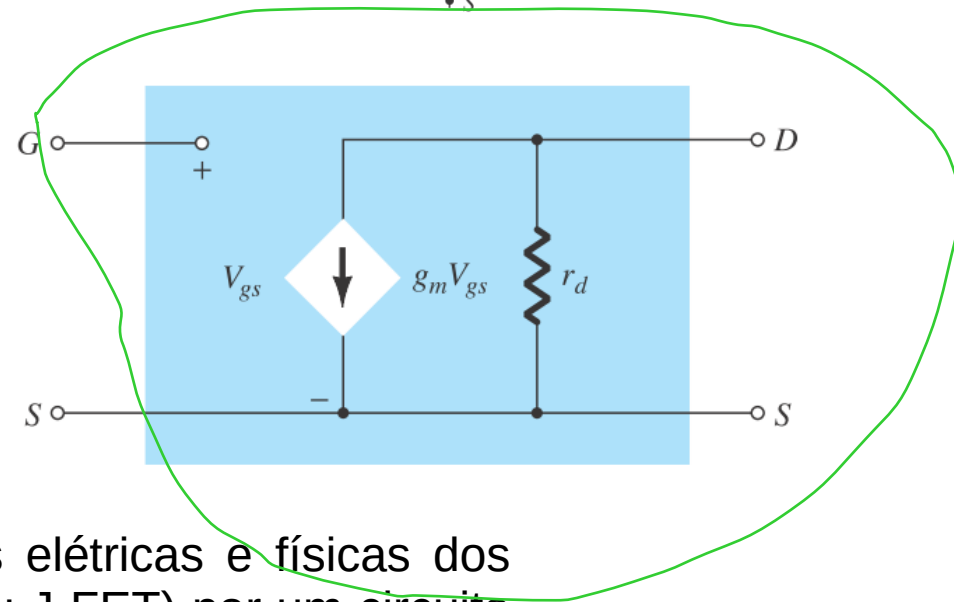
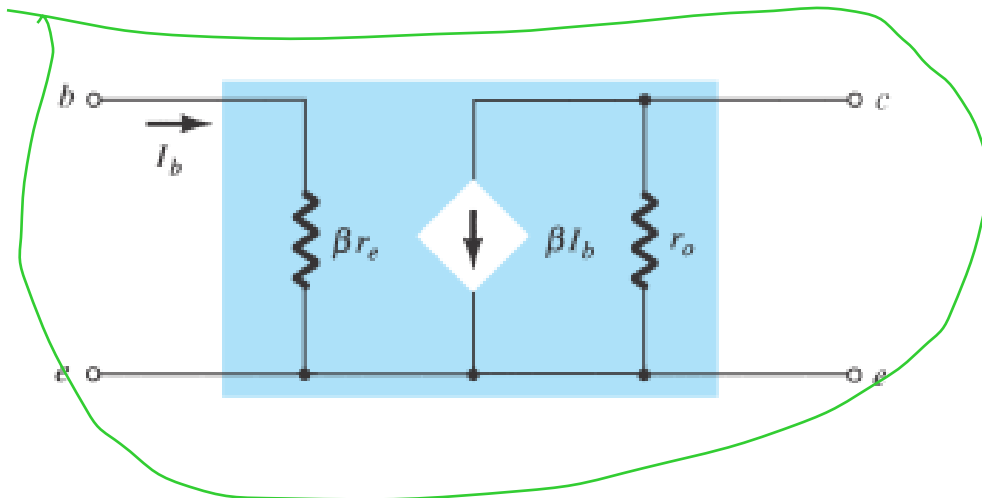
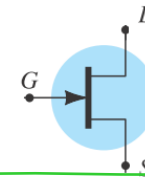
# Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET)

(Análise de pequenos sinais – Análise AC ou CA)

Circuito Equivalente AC ou CA (TBJ)



Circuito Equivalente AC ou CA (J-FET)



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

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

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

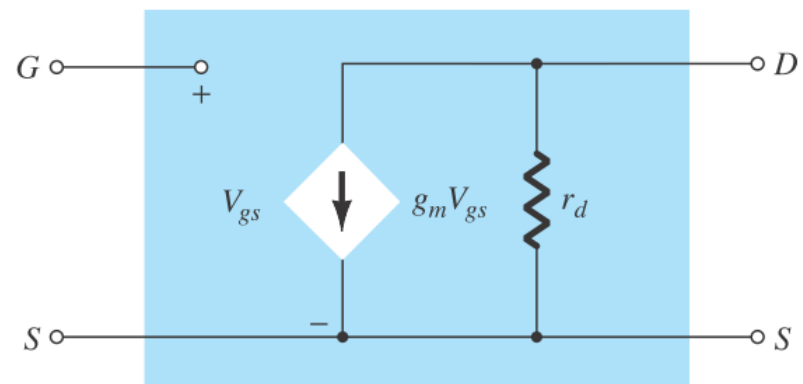
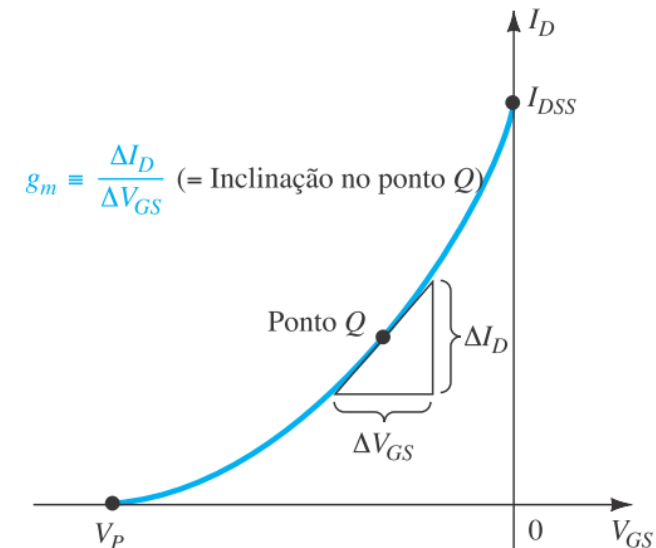
### MODELO AC ou CA

- $g_m$  (transcondutância):
  - Representa a variação na corrente de dreno que resultará de uma variação na tensão porta-fonte  $V_{GS}$ :

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

- *trans*: Este prefixo na terminologia aplicada a  $g_m$  revela que esse parâmetro estabelece uma relação entre uma quantidade de saída e a quantidade de entrada.
- Condutância: O radical condutância foi escolhido porque  $g_m$  é determinado por uma razão corrente-tensão similar à razão que define a condutância de um resistor  $G=1/R=I/V$ . Assim podemos utilizar a relação abaixo:

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



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

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

### MODELO AC ou CA

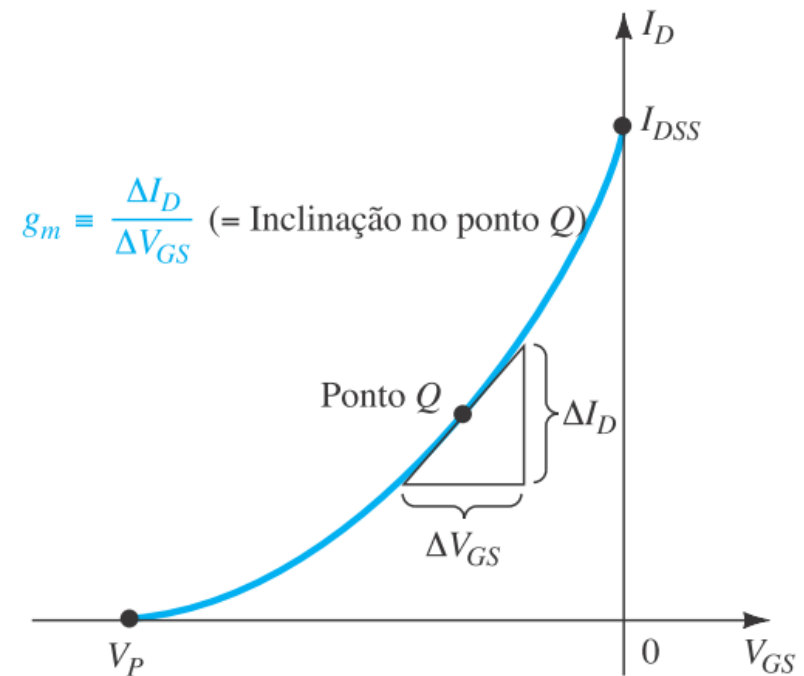
- *Determinação gráfica de  $g_m$* 
  - Se examinarmos a característica de transferência da Figura do “slide anterior”, veremos que  $g_m$  é na verdade a inclinação da curva no ponto de operação. Isto é:

$$g_m = m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}}$$

- Ao acompanharmos a curvatura da característica de transferência, fica claro que a inclinação, e portanto  $g_m$ , aumenta à medida que a curva é percorrida de  $V_P$  até  $I_{DSS}$ . Em outras palavras, conforme  $V_{GS}$  se aproxima de 0V, o valor de  $g_m$  aumenta.

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

- A Equação anterior, revela que  $g_m$  pode ser determinado em qualquer ponto Q sobre a curva característica de transferência, bastando para isso que escolhamos um incremento finito em  $V_{GS}$  (ou em  $I_D$ ) em torno do ponto Q e depois determinemos a variação correspondente em  $I_D$  (ou  $V_{GS}$ , respectivamente).





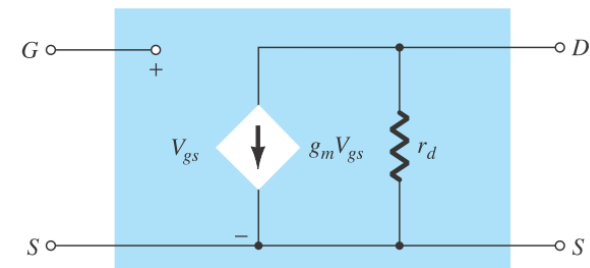
# Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET)

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

### MODELO AC ou CA

- *Circuito equivalente AC ou CA do JFeT*
  - Agora que os parâmetros importantes de um circuito equivalente CA foram introduzidos e discutidos, um modelo de transistor JFET no domínio CA pode ser construído. O controle de  $I_D$  por  $V_{gs}$  é incluído como uma fonte de corrente  $g_m V_{gs}$  conectada do dreno para a fonte, como vemos na Figura ao lado. A seta da fonte de corrente aponta o dreno para a fonte para estabelecer um deslocamento de fase de  $180^\circ$  entre as tensões de saída e de entrada, assim como ocorrerá na operação real.

A impedância de entrada é representada pelo circuito aberto nos terminais de entrada, e a impedância de saída é representada pelo resistor  $r_d$  do dreno para a fonte. Observe que, nesse caso, a tensão porta-fonte é representada por  $V_{gs}$  (subscritos em letra minúscula) para que seja distinguida dos valores CC. Além disso, registre o fato de que a fonte é comum aos circuitos de entrada e saída, enquanto os terminais de porta e dreno se “relacionam” apenas através da fonte de corrente controlada  $g_m V_{gs}$ .

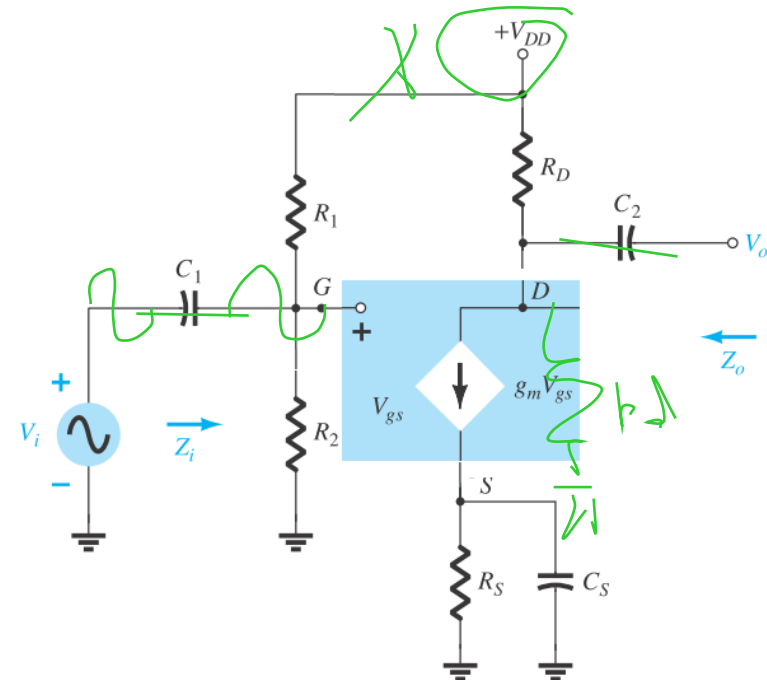
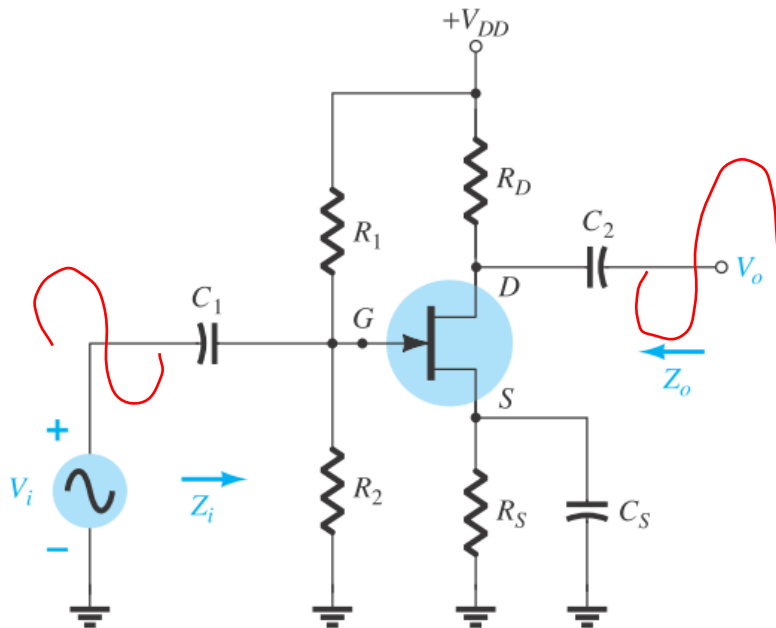


Circuito equivalente CA do JFET.

# Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) ( Configuração Com Divisor de Tensão)

Análise AC ou CA (Com desvio):

- A configuração com divisor de tensão mais comum para o TBJ pode ser aplicada também ao JFET, como demonstra a Figura abaixo.
- Substituir o JFET pelo modelo equivalente CA resulta na configuração da Figura a seguir.

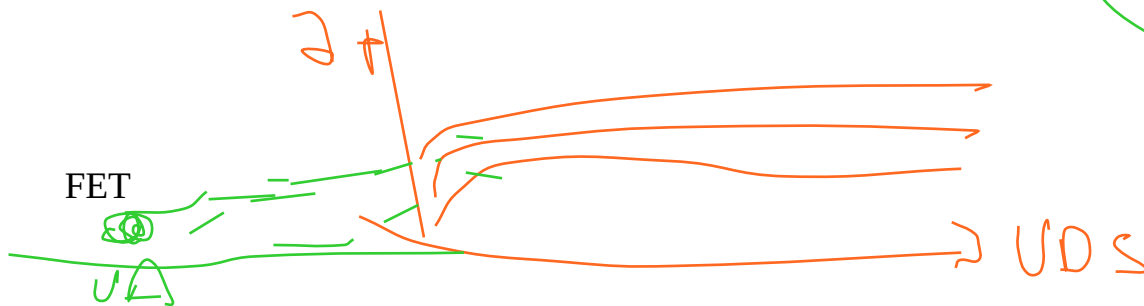
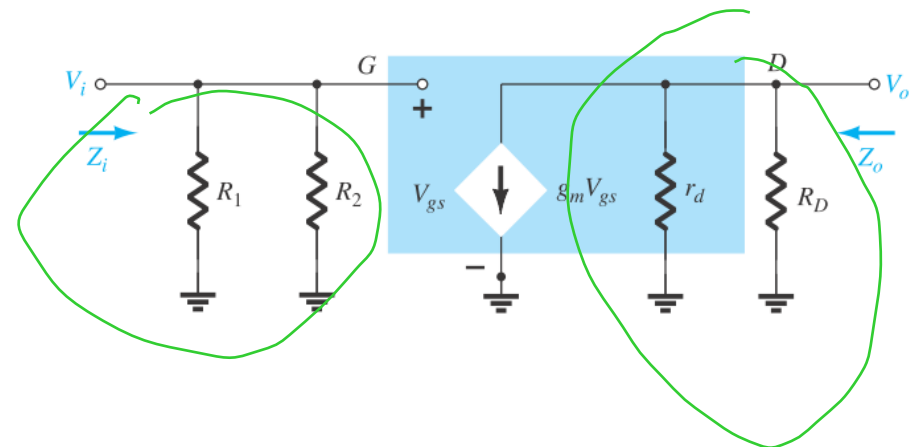
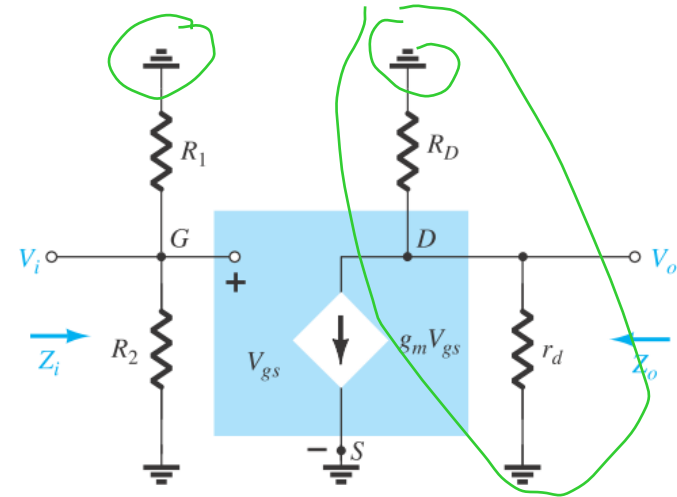


# Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) ( Configuração Com Divisor de Tensão)

Análise AC ou CA ( $R_S$  com desvio):

Trocar a fonte CC ( $V_{DD}$ ) por um curto-circuito equivalente provoca o aterramento de uma extremidade de  $R_1$  e  $R_D$  (Figura ao lado).

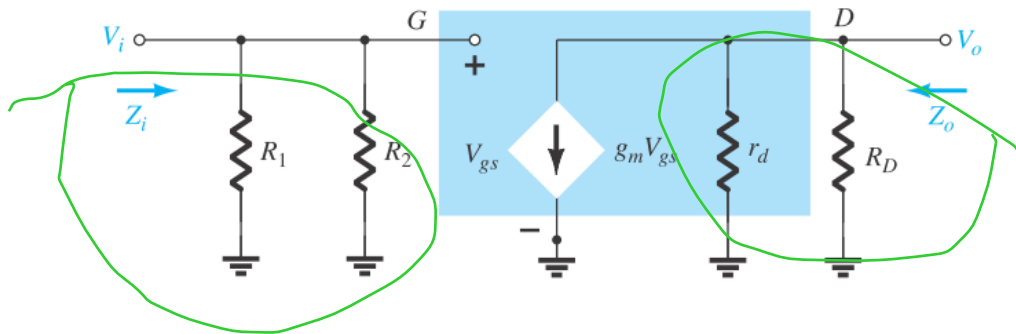
- Como ambas as resistências têm um terra comum,  $R_1$  pode ser colocado em paralelo com  $R_2$ . O resistor  $R_D$ , por sua vez, pode ser colocado em paralelo com  $r_d$  no circuito de saída. O circuito equivalente CA resultante tem agora o formato básico de alguns dos circuitos já analisados (Figura ao lado).



# Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) ( Configuração Com Divisor de Tensão)

Análise AC ou CA ( $R_S$  com Desvio):

Visto que a configuração resultante é a mesma obtida na configuração de polarização fixa, as equações resultantes para  $Z_i$ ,  $Z_o$  e  $A_v$  serão as mesmas, temos:



•  $Z_i$

$$Z_i = R_1 \parallel R_2$$

•  $Z_o$

$$Z_o = r_d \parallel R_D$$

Se  $r_d \geq 10R_D$

$$Z_o \cong R_D \quad r_d \geq 10R_D$$

•  $A_v$

e

$$V_{gs} = V_i$$

$$V_o = -g_m V_{gs} (r_d \parallel R_D)$$

de forma que

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

e

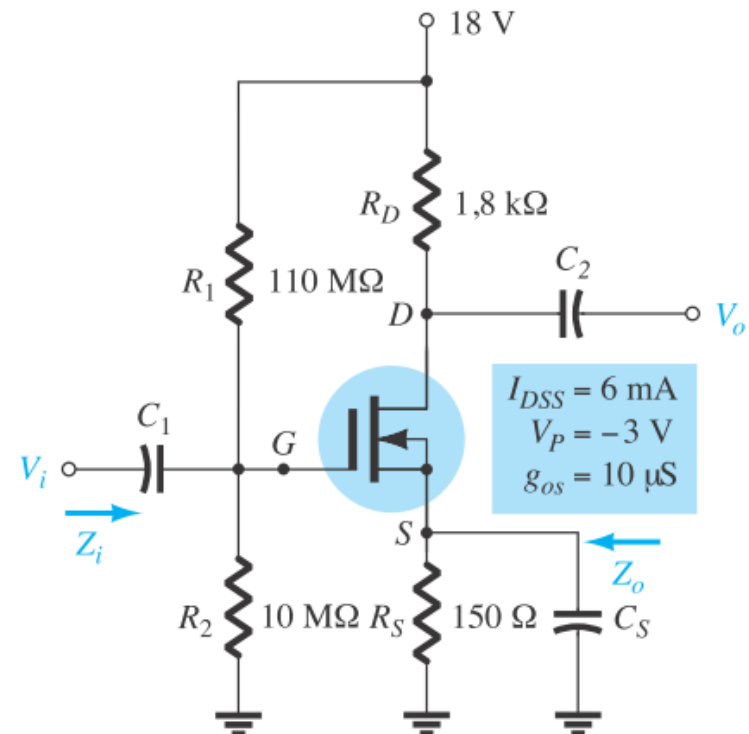
$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = -g_m (r_d \parallel R_D)$$

- **Relação de Fase:** O sinal negativo nas soluções para  $A_v$  indica novamente um deslocamento de fase de  $180^\circ$  entre  $V_i$  e  $V_o$ .

# FET (ATIVIDADES)

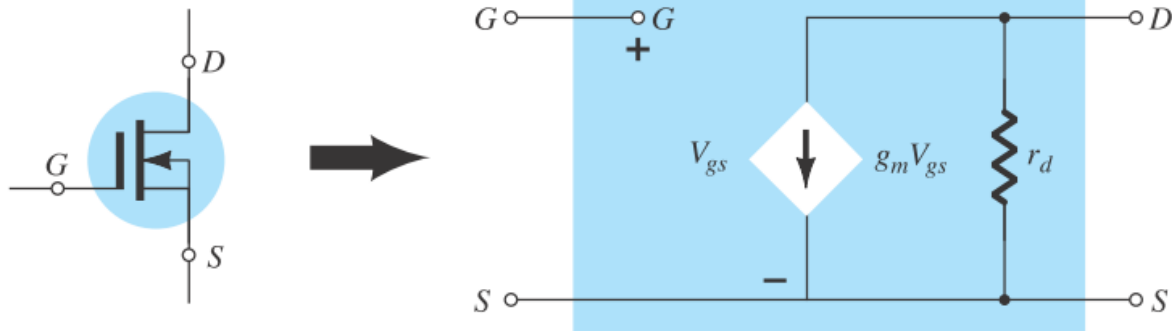
1 - No circuito da Figura a seguir foi realizada a análise DC e os resultados obtido foram:  $V_{GS_Q} = 0,35V$  e  $I_{D_Q} = 7,6 \text{ mA}$ .

- a) Determine  $g_m$  e compare com  $g_{m0}$ .
- b) Calcule  $r_d$ .
- c) Esboce o circuito equivalente CA.
- d) Calcule  $Z_i$ .
- e) Calcule  $Z_o$ .
- f) Calcule  $A_v$ .



# D-MOSFET

## (MODELO EQUIVALENTE)



# 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.