



**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: Fixa;
    - Polarização: autopolarização;
    - Polarização por Divisor de Tensão.

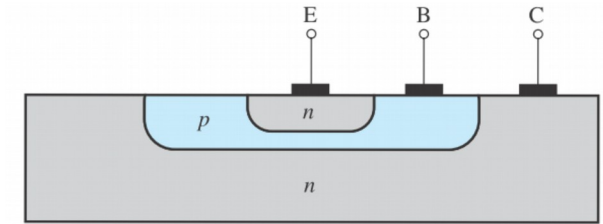
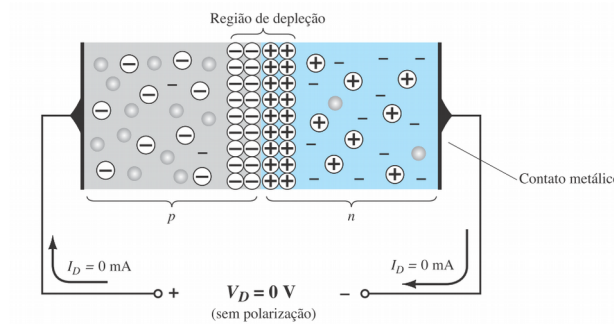
# Introdução

## Vacuum Tube Op-Amps

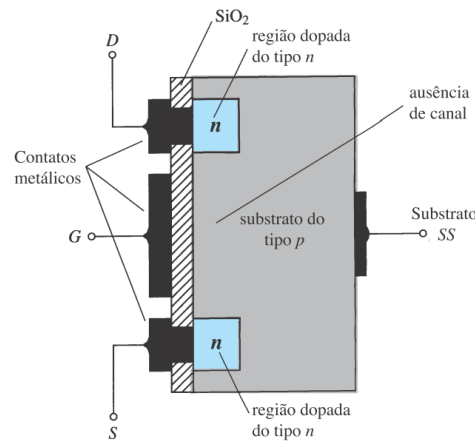
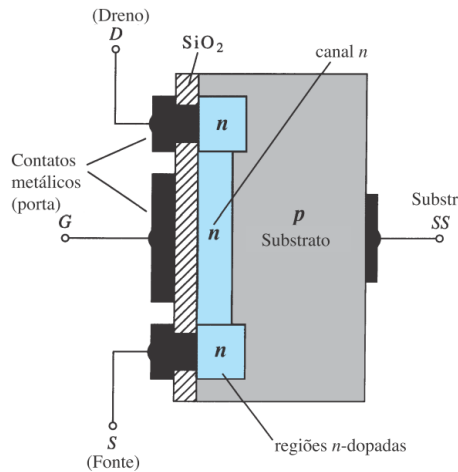
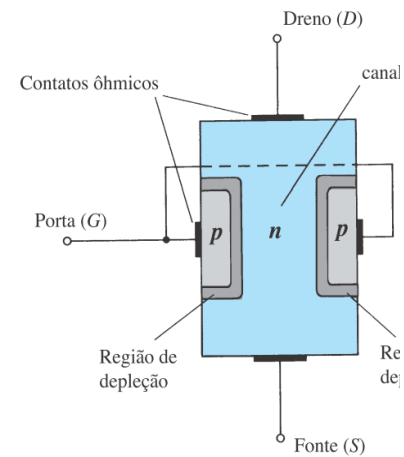
- First op amps built in 1930's-1940's
  - Technically feedback amplifiers due to only having one useable input
- Used in WWII to help how to strike military targets
  - Buffers, summers, differentiators, inverters
- Took  $\pm 300V$  to  $\pm 100V$  to power



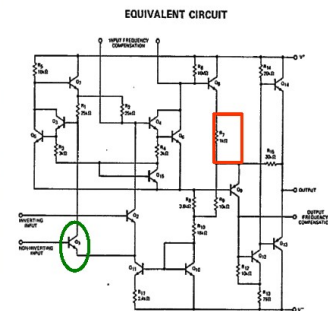
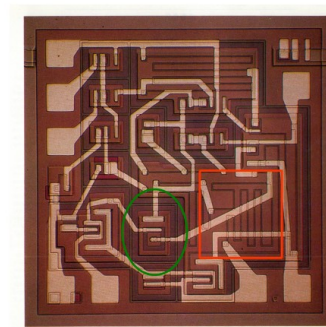
[http://en.wikipedia.org/wiki/Image:K2-W\\_vacuum\\_tube\\_op-amp.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/Image:K2-W_vacuum_tube_op-amp.jpg)



Cross section of an npn BJT.



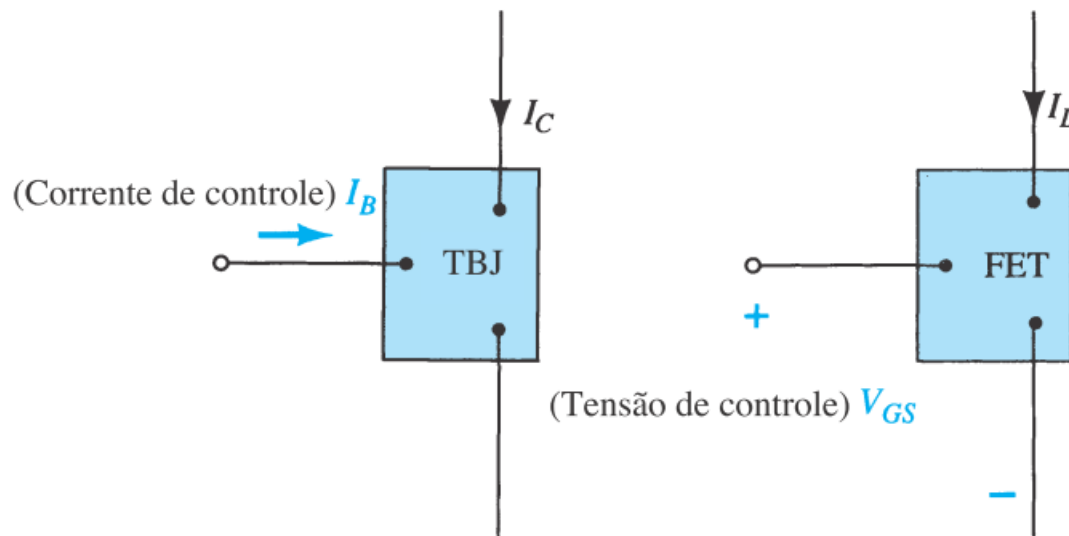
## (Exemplos de AmpOp - 1964 - Op-Amp A702, Fairchild)



Referência: Notas de Aulas do Prof. Wilhelmus Van Noije

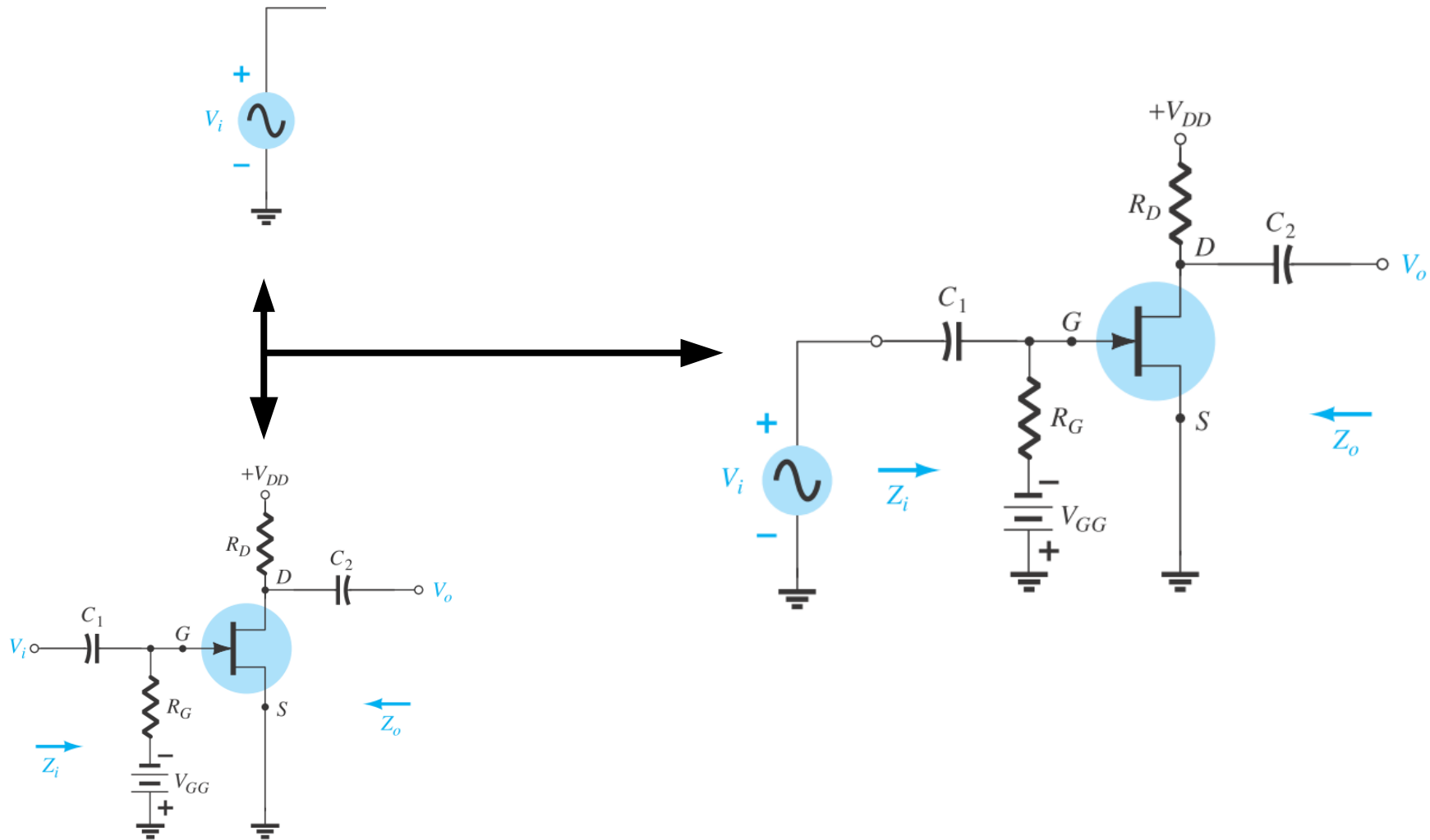
# Transistor Efeito de Campo (FET)

- 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)

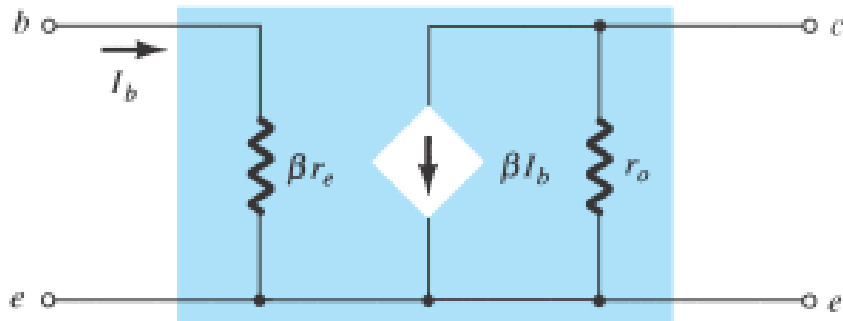
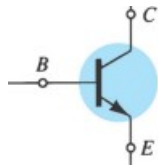
(Análise de pequenos sinais – Análise AC ou CA)



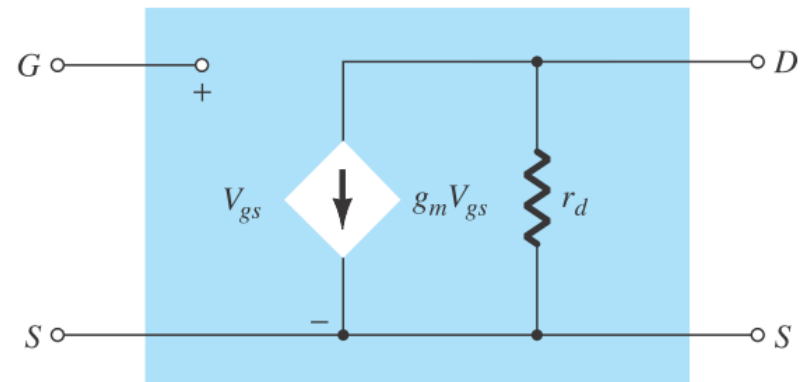
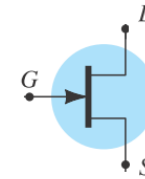
# Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET)

## (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)

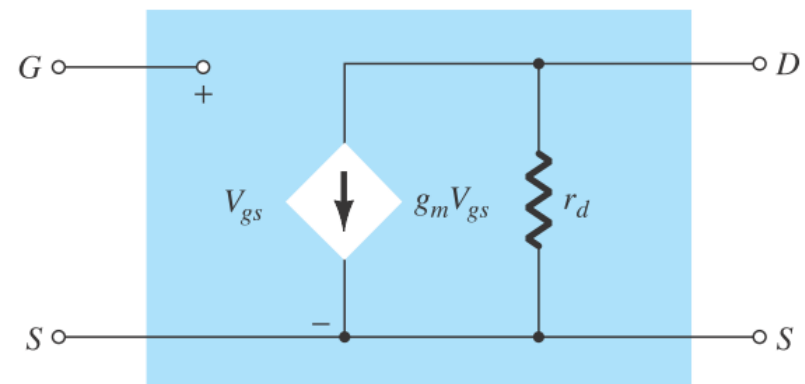
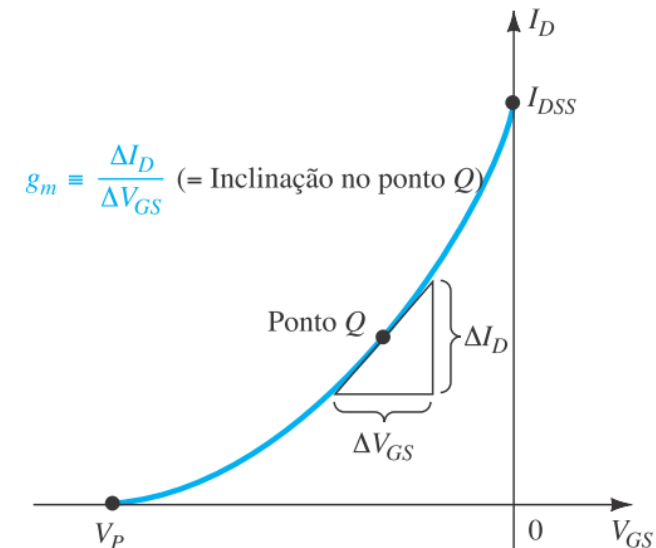
### MODELO AC ou CA

- $g_m$  (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

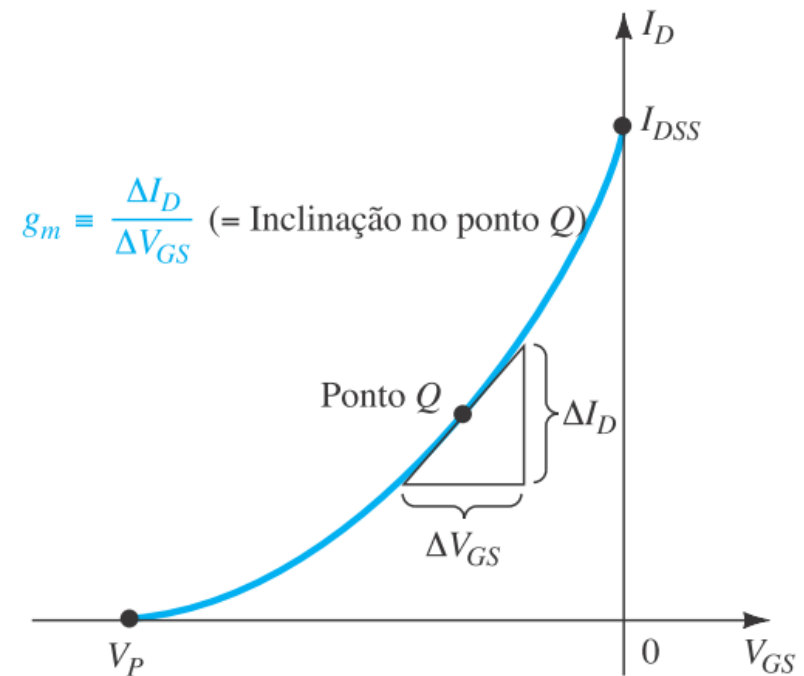
- *Determinação gráfica de  $g_m$* 
  - Se examinarmos a característica de transferência da Figura do “slide anterior”, veremos que  $g_m$  é na verdade a inclinação da curva no ponto de operação. Isto é:

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

- 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)

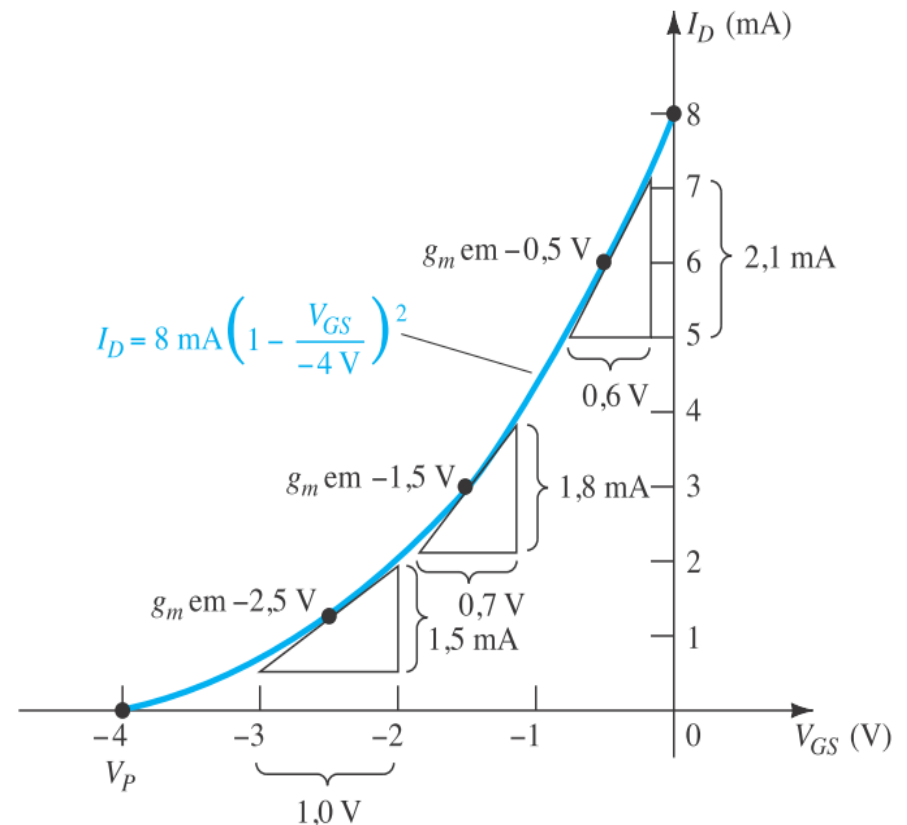
## (Análise de pequenos sinais – Análise AC ou CA)

### MODELO AC ou CA

*Exemplo para determinação gráfica de  $g_m$ :*

Determine o valor de  $g_m$  para um JFET que apresenta  $I_{DSS}=8\text{mA}$  e  $V_P = -4\text{ V}$  nos seguintes pontos de operação CC:

- a)  $V_{GS} = -0,5\text{ V}$ .
- b)  $V_{GS} = -1,5\text{ V}$ .
- c)  $V_{GS} = -2,5\text{ V}$ .



Cálculo de  $g_m$  em vários pontos de polarização.

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

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

### MODELO AC ou CA

- *Determinação matemática de  $g_m$ :*
  - Um método alternativo para a determinação de  $g_m$  emprega a abordagem utilizada para a solução da resistência CA de um diodo, onde definimos que: **a derivada de uma função em um ponto é igual à inclinação da reta tangente traçada nesse ponto.**
  - Assim, se utilizarmos, portanto, a derivada de  $I_D$  em relação a  $V_{GS}$  (cálculo diferencial) por meio da equação de Shockley, podemos deduzir uma equação para  $g_m$  da seguinte maneira:

$$g_m = \left. \frac{dI_D}{dV_{GS}} \right|_{\text{Ponto } Q} = \frac{d}{dV_{GS}} \left[ I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2 \right]$$

$$g_m = I_{DSS} \frac{d}{dV_{GS}} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2$$

$$g_m = 2I_{DSS} \left[ 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right] \frac{d}{dV_{GS}} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)$$

$$g_m = 2I_{DSS} \left[ 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right] \left[ \frac{d}{dV_{GS}} (1) - \frac{1}{V_P} \frac{dV_{GS}}{dV_{GS}} \right]$$

$$g_m = 2I_{DSS} \left[ 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right] \left[ 0 - \frac{1}{V_P} \right]$$

$$g_m = \frac{2I_{DSS}}{|V_P|} \left[ 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right]$$

OBS.  $|V_P|$  representa somente a magnitude para garantir um valor positivo para  $g_m$ .

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

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

### MODELO AC ou CA

- *Determinação matemática de  $g_m$ :*

Já mencionamos que a inclinação da curva de transferência é máxima em  $V_{GS}=0V$ . Introduzindo  $V_{GS}=0V$  na Equação abaixo:

$$g_m = \frac{2I_{DSS}}{|V_P|} \left[ 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right]$$

Temos a seguinte equação para o valor máximo de  $g_m$  em um JFET no qual  $I_{DSS}$  e  $V_P$  foram especificados:

$$g_m = \frac{2I_{DSS}}{|V_P|} \left[ 1 - \frac{0}{V_P} \right]$$

$$g_{m0} = \frac{2I_{DSS}}{|V_P|}$$

onde o subscrito “0” adicionado serve para nos lembrar de que se trata do valor de  $g_m$  quando  $V_{GS}=0V$ .

A Equação:

$$g_m = \frac{2I_{DSS}}{|V_P|} \left[ 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right]$$

então se transforma em:

$$g_m = g_{m0} \left[ 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right]$$

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

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

### MODELO AC ou CA

Exemplo para determinação matemática de  $g_m$ :

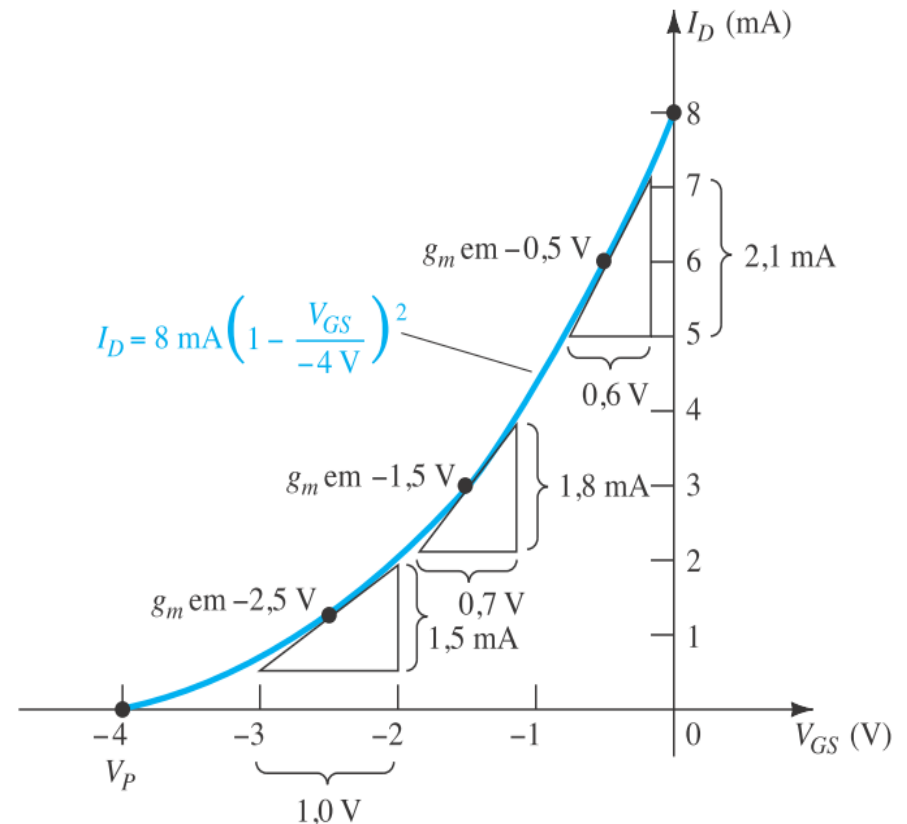
Para o JFET com a curva de transferência do Exemplo do “slide 9”:

- Determine o valor máximo de  $g_m$ .
- Determine o valor de  $g_m$  em cada ponto de operação do “slide 09”, utilizando a

$$g_m = g_{m0} \left[ 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right]$$

e compare esse valor com os resultados gráficos.

- $V_{GS} = -0,5 \text{ V}$ .
- $V_{GS} = -1,5 \text{ V}$ .
- $V_{GS} = -2,5 \text{ V}$ .



Cálculo de  $g_m$  em vários pontos de polarização.

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

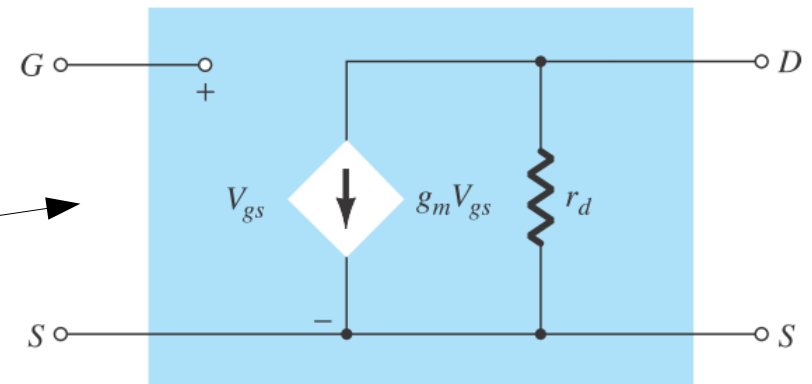
## (Análise de pequenos sinais – Análise AC ou CA)

### MODELO AC ou CA

- *impedância de entrada do JFeT ( $Z_i$ ):*
  - A impedância de entrada de todos os JFETs disponíveis comercialmente é suficientemente alta para assumirmos que os terminais de entrada aproximam-se de um circuito aberto. Na forma de equação:

$$Z_i (\text{JFET}) = \infty \Omega$$

- Para o JFET, um valor usual é  $10^9 \Omega$  (1000M $\Omega$ ), enquanto um valor de  $10^{12} \Omega$  a  $10^{15} \Omega$  são mais comuns para os MOSFETs e os MESFETs.



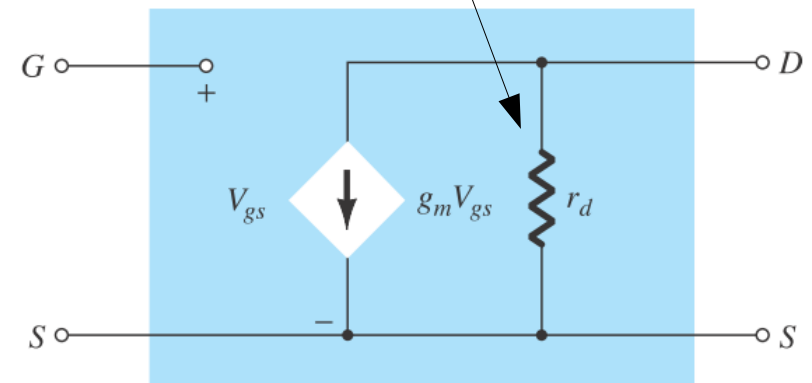
# Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET)

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

### MODELO AC ou CA

- *impedância de saída do JFeT ( $Z_o$ )*
  - A impedância de saída do JFET possui valor similar ao da impedância de saída dos TBJs convencionais. Nas folhas de dados do JFET, a impedância de saída normalmente aparece como  $g_{os}$  ou  $y_{os}$ , com unidades de  $\mu S$ . O parâmetro  $y_{os}$  é um componente do circuito equivalente de admitâncias, sendo que o subscrito o significa parâmetro de saída do circuito (output), e s, o terminal de fonte (source) ao qual está ligado no modelo. Na forma de equação:

$$Z_o (\text{JFET}) = r_d = \frac{1}{g_{os}} = \frac{1}{y_{os}}$$



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

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

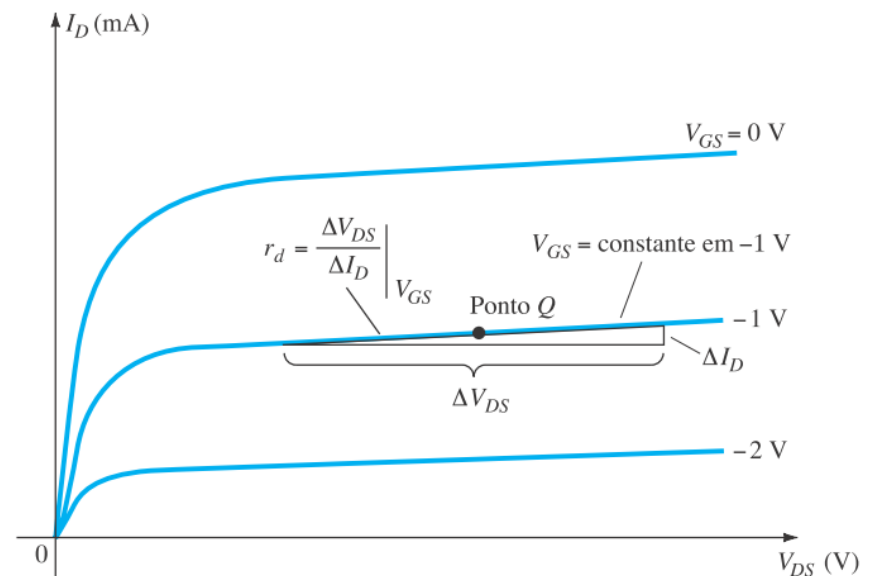
### MODELO AC ou CA

#### – impedância de saída do JFeT ( $Z_o$ )

- A impedância de saída é definida nas curvas características da Figura ao lado como a inclinação da curva característica horizontal no ponto de operação. Quanto mais horizontal a curva, maior a impedância de saída. Se a curva for perfeitamente horizontal, a situação ideal estará de acordo com a impedância de saída infinita (um circuito aberto) — uma aproximação bastante comum. Na forma de equação:

$$r_d = \left. \frac{\Delta V_{DS}}{\Delta I_D} \right|_{V_{GS}=\text{constante}}$$

Note que, na equação de  $r_d$  a tensão  $V_{GS}$  deve permanecer constante quando  $r_d$  for determinada. Isso é feito traçando-se uma linha reta que se aproxime da linha de  $V_{GS}$  no ponto de operação. Um  $\Delta V_{DS}$  ou  $\Delta I_D$  é então escolhido, e a outra variável é medida para ser utilizada na equação.



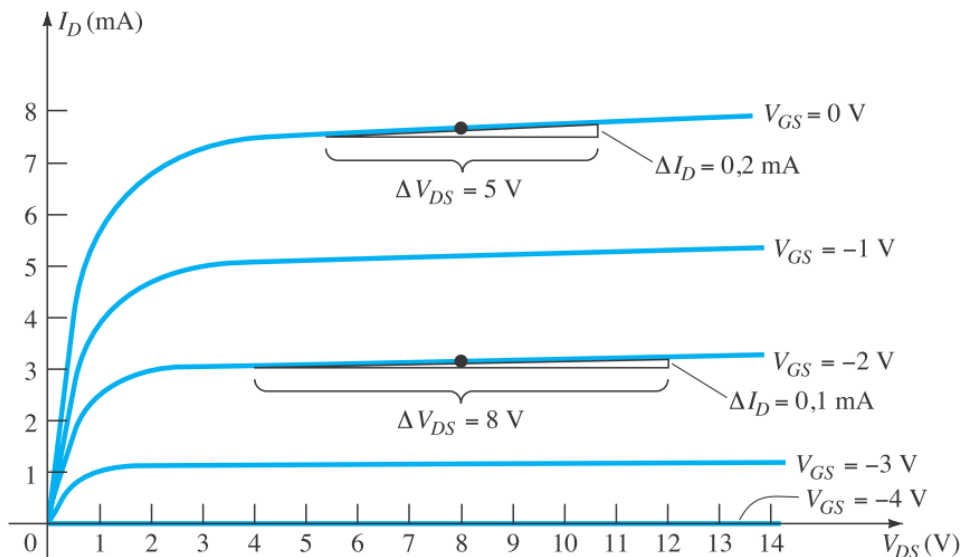
# Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET)

(Análise de pequenos sinais – Análise AC ou CA)

## MODELO AC ou CA

*Exemplo para determinação da impedância de saída ( $Z_o$ ):*

Determine a impedância de saída para o JFET da Figura ao lado com  $V_{GS}=0V$  e  $V_{GS} = -2V$  em  $V_{DS} = 8V$ .





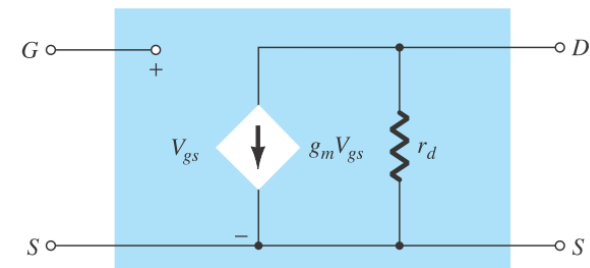
# Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET)

## (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  $g_m V_{gs}$ .

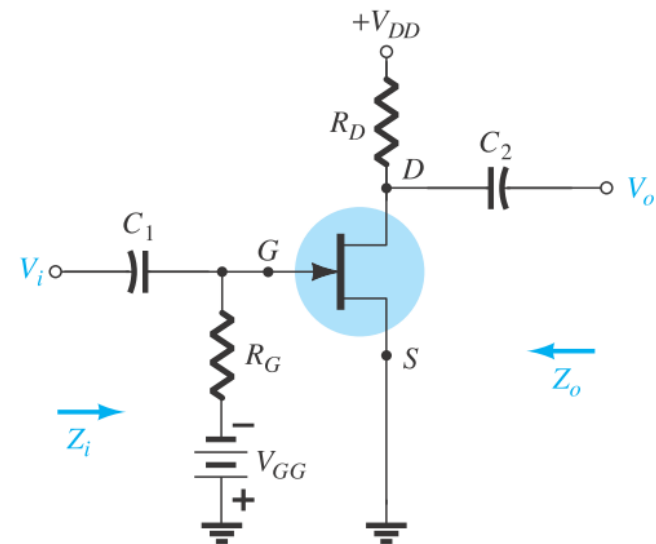


Circuito equivalente CA do JFET.

# Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) ( Configuração Com Polarização Fixa)

Análise AC ou CA:

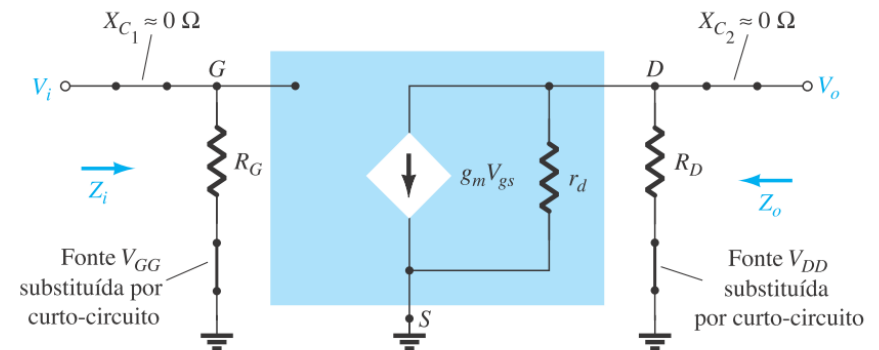
- Agora que o circuito equivalente do JFET foi definido, várias configurações fundamentais de pequenos sinais para o JFET podem ser investigadas. A análise será similar à análise CA realizada para os amplificadores com TBJ, com a determinação dos importantes parâmetros  $Z_i$ ,  $Z_o$  e  $A_v$  para cada configuração.
- A configuração com polarização fixa da Figura ao lado inclui os capacitores de acoplamento  $C_1$  e  $C_2$ , que isolam o circuito de polarização do sinal aplicado e da carga; eles atuam como curtos-circuitos equivalentes para a análise CA.



# Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) ( Configuração Com Polarização Fixa)

Análise AC ou CA:

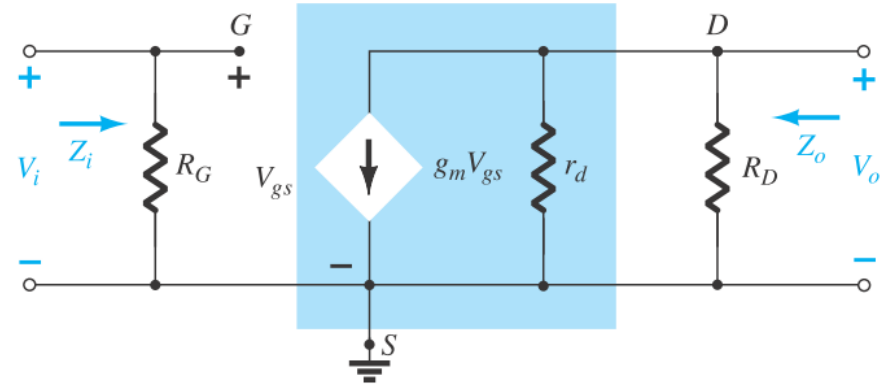
- Uma vez que os valores de  $g_m$  e  $r_d$  são determinados a partir da polarização CC, da folha de dados ou da curva característica, o modelo CA equivalente pode ser substituído entre os terminais apropriados, como mostra a Figura ao lado. Note que ambos os capacitores possuem curtos-circuitos equivalentes porque seus valores de reatância  $X_C = 1/(2\pi fC)$  são suficientemente pequenos, se comparados com os outros valores de impedância do circuito, e as fontes CC ( $V_{GG}$  e  $V_{DD}$ ) são colocadas em 0 V por um curto-circuito equivalente..



# Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) ( Configuração Com Polarização Fixa)

Análise AC ou CA:

- O circuito da Figura do “Slide 19” é então cuidadosamente redesenhado, como mostra a Figura ao lado. Observe a polaridade definida para  $V_{gs}$ , que define o sentido de  $g_m V_{gs}$ . Se  $V_{gs}$  for negativa, o sentido da fonte de corrente é invertido. O sinal aplicado é representado por  $V_i$ , e o sinal de saída através de  $R_D \parallel r_d$  é representado por  $V_o$ .



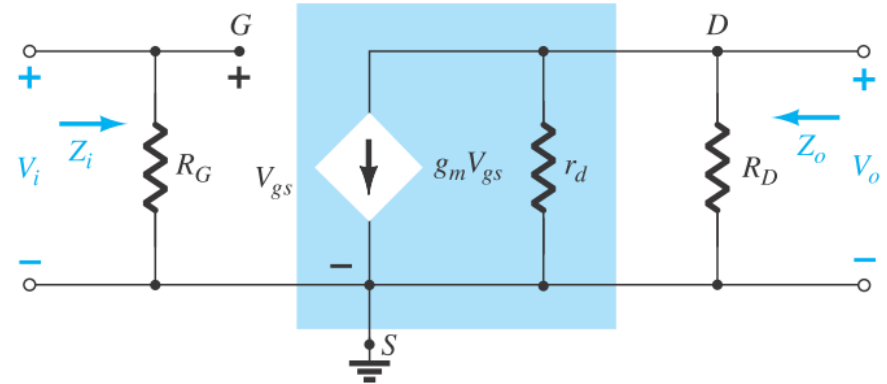
# Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) ( Configuração Com Polarização Fixa)

Análise AC ou CA:

- **Determinar  $Z_i$ :** na Figura ao lado mostra claramente que:

$$Z_i = R_G$$

devido à impedância de entrada infinita nos terminais de entrada do JFET.

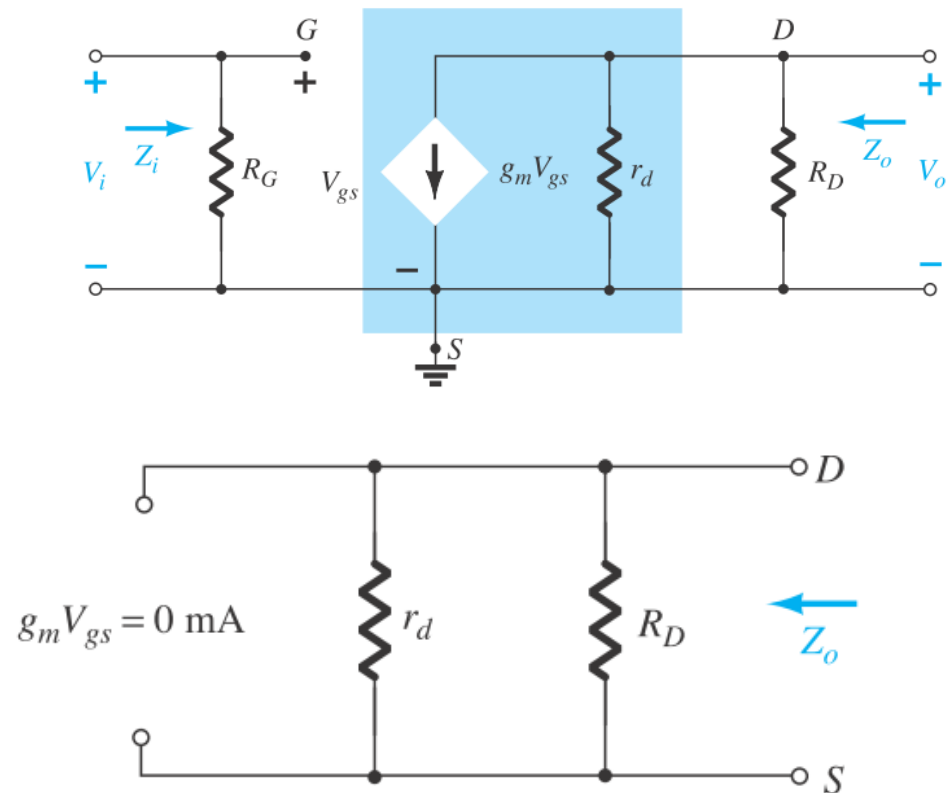


# Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) ( Configuração Com Polarização Fixa)

Análise AC ou CA:

- **Determinar  $Z_o$ :** Fazer  $V_i=0V$ , como exige o cálculo de  $Z_o$ , implica que  $V_{gs}$  também seja igual a  $0V$ . O resultado é  $g_m V_{gs} = 0mA$ , e a fonte de corrente pode ser substituída por um circuito aberto equivalente como mostra a Figura ao lado
- A impedância de saída é:

$$Z_o = R_D \parallel r_d$$

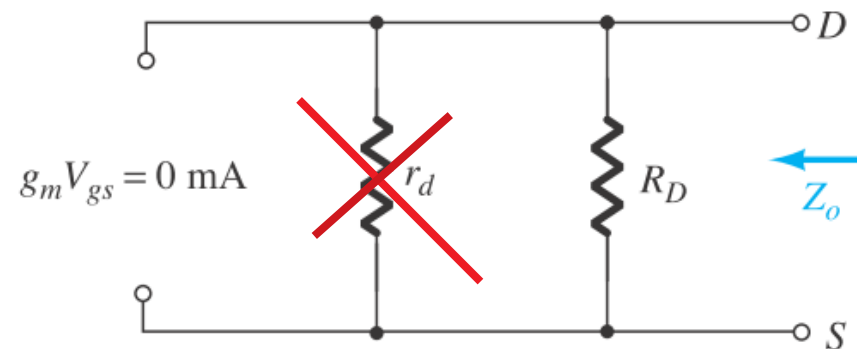
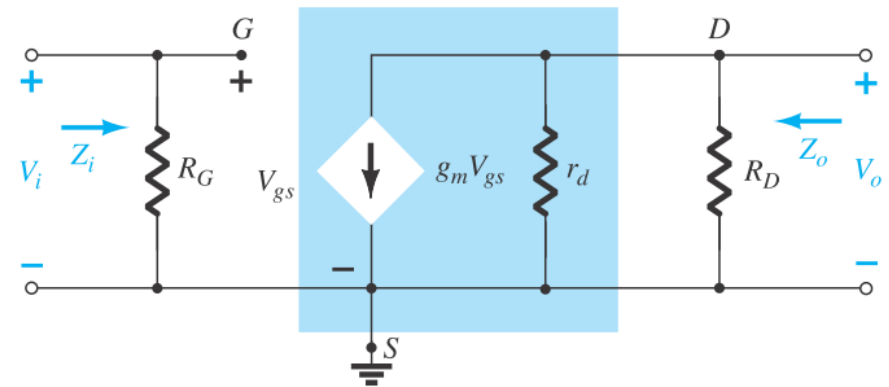


# Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) ( Configuração Com Polarização Fixa)

Análise AC ou CA:

- Determinar  $Z_o$ : Se a resistência  $r_d$  for suficientemente alta (pelo menos 10:1), comparada com  $R_D$ , a aproximação  $r_d \parallel R_D \cong R_D$  poderá ser aplicada e:

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



# Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) ( Configuração Com Polarização Fixa)

Análise AC ou CA:

- **Determinar  $A_v$ :** Calculando  $V_o$  na Figura ao lado, determinamos:

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

mas

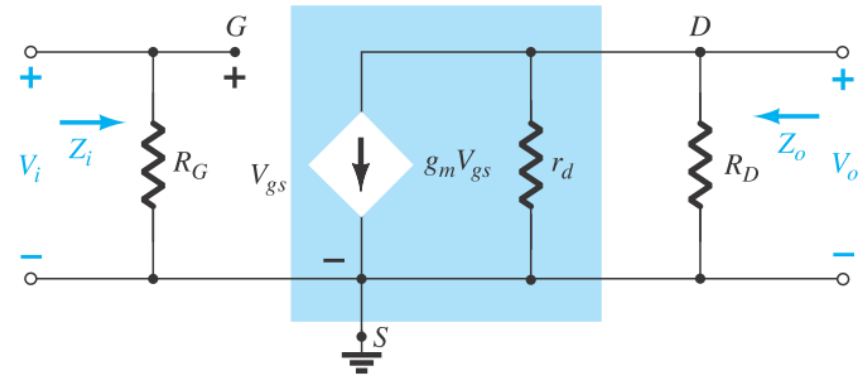
$$V_{gs} = V_i$$

e

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

de modo que

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



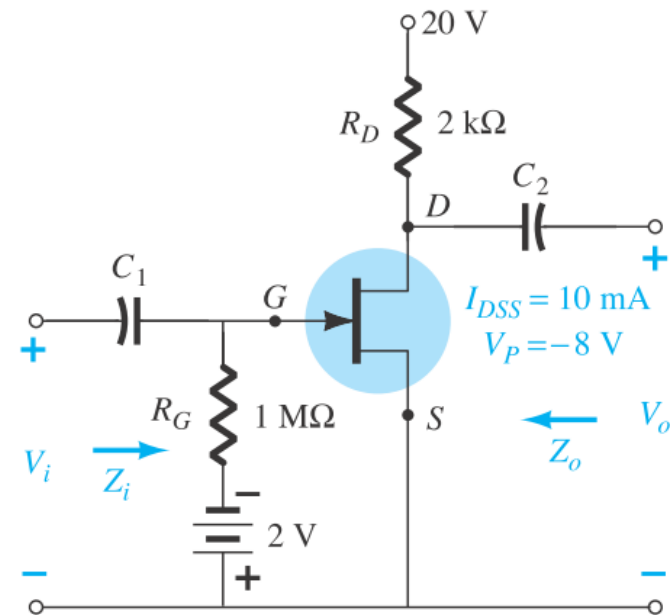


# FET

## (ATIVIDADES)

1- Exemplo: O circuito da configuração com polarização fixa da análise DC do aula 04 foi redesenhada na figura ao lado tem um ponto de operação definido por  $V_{GSQ} = -2V$  e  $I_{DQ} = 5,625 \text{ mA}$ , com  $I_{DSS} = 10 \text{ mA}$  e  $V_P = -8 \text{ V}$ . O circuito é redesenhado na Figura ao lado com um sinal aplicado dado por  $V_i$ . O valor de  $y_{os}$  fornecido é de  $40 \mu\text{S}$ .

- a) Determine  $g_m$  .
- b) Calcule  $r_d$  .
- c) Determine  $Z_i$  .
- d) Calcule  $Z_o$  .
- e) Determine o ganho de tensão  $A_v$  .
- f) Determine  $A_v$  , ignorando os efeitos de  $r_d$ .



# 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.