



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

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.

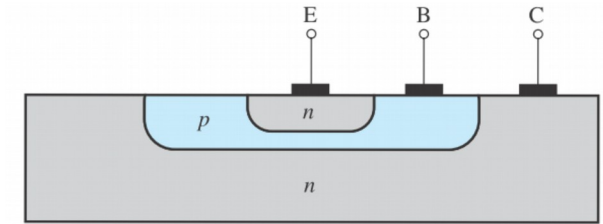
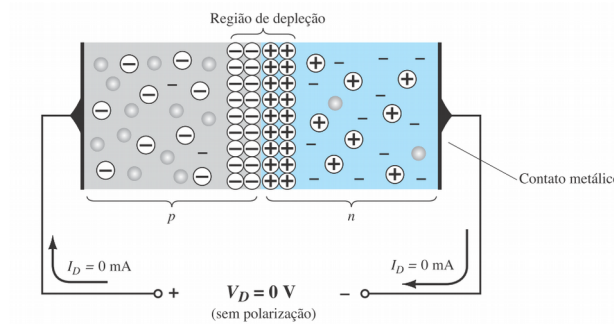
Introdução

Vacuum Tube Op-Amps

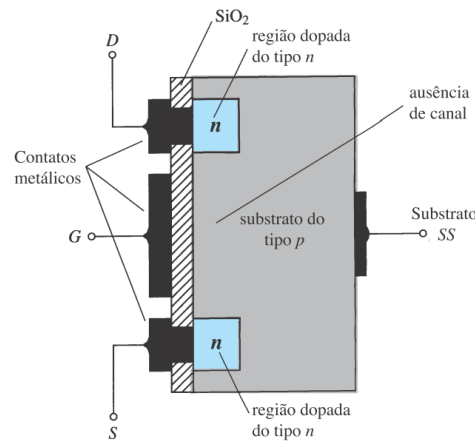
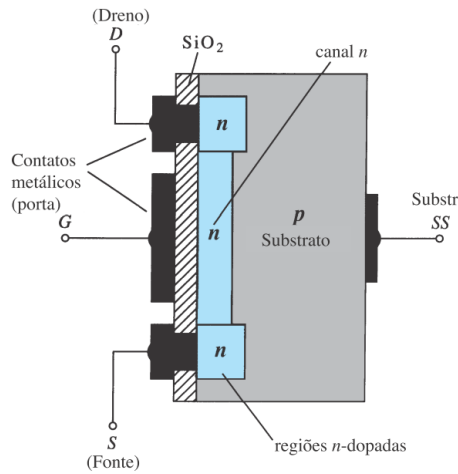
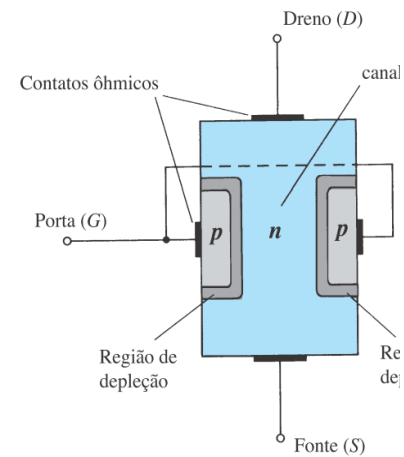
- First op amps built in 1930's-1940's
 - Technically feedback amplifiers due to only having one useable input
- Used in WWII to help how to strike military targets
 - Buffers, summers, differentiators, inverters
- Took $\pm 300V$ to $\pm 100V$ to power



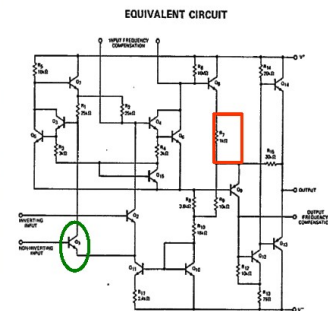
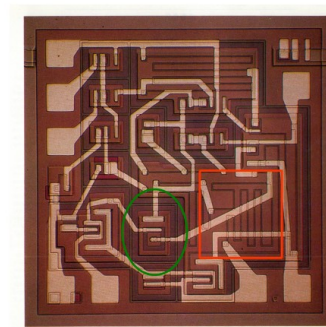
http://en.wikipedia.org/wiki/Image:K2-W_vacuum_tube_op-amp.jpg



Cross section of an npn BJT.



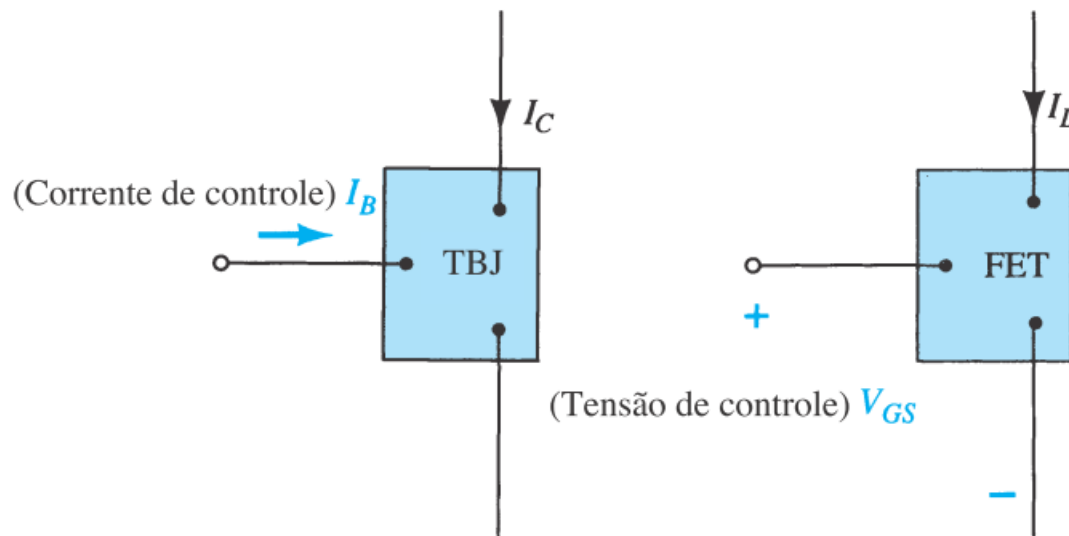
(Exemplos de AmpOp - 1964 - Op-Amp A702, Fairchild)



Referência: Notas de Aulas do Prof. Wilhelmus Van Noije

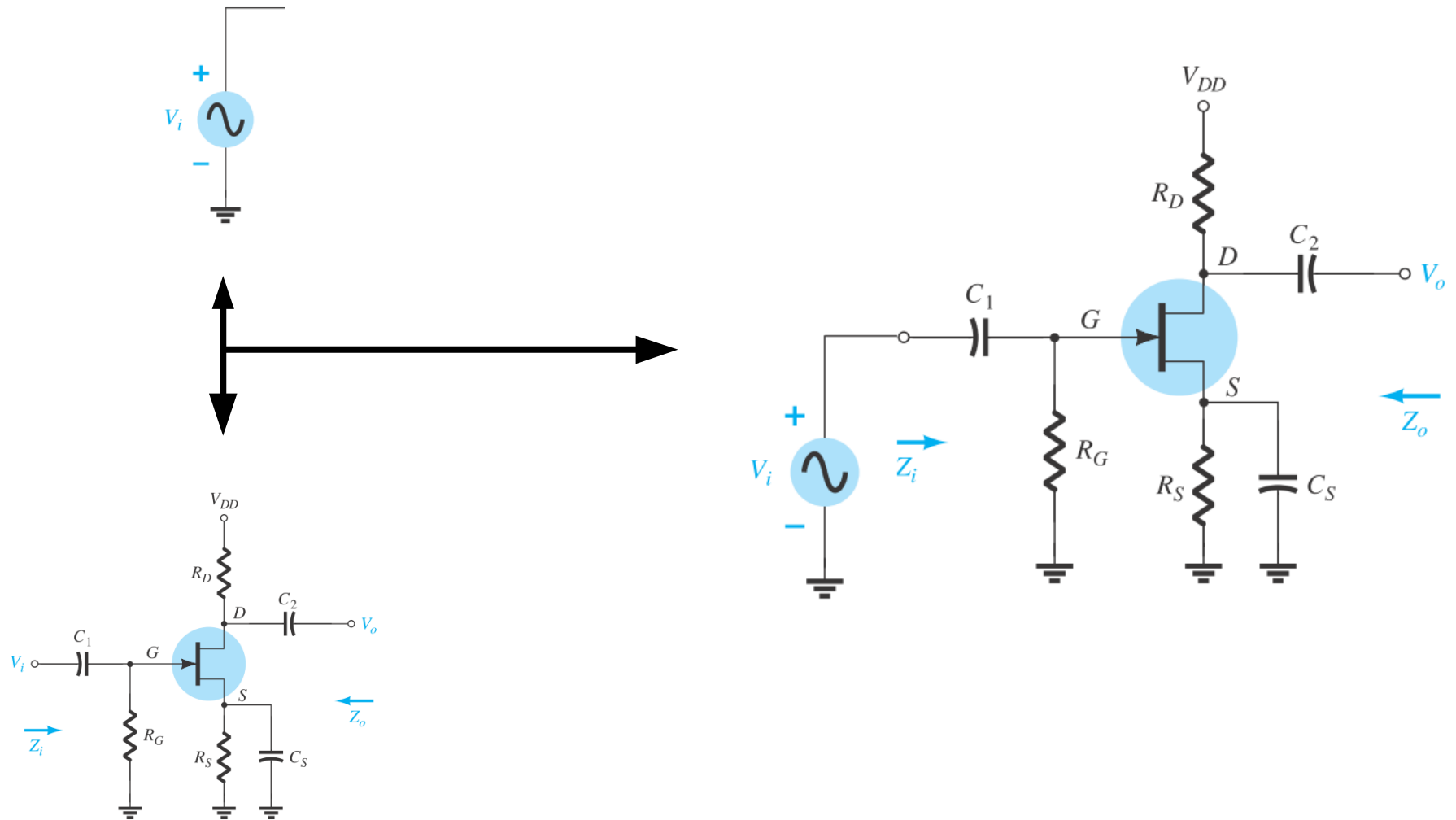
Transistor Efeito de Campo (FET)

- 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)

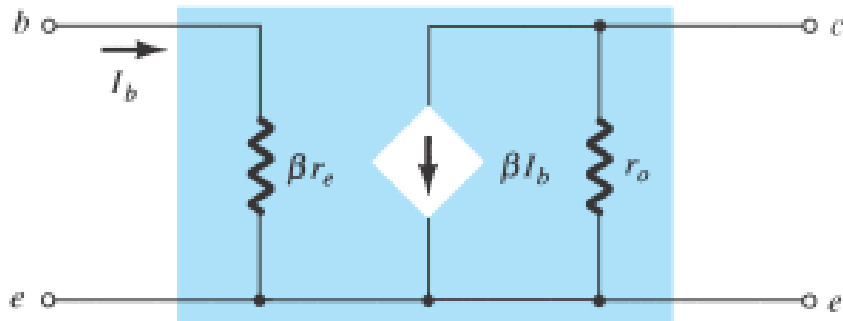
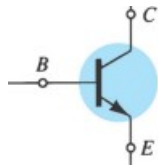
(Análise de pequenos sinais – Análise AC ou CA)



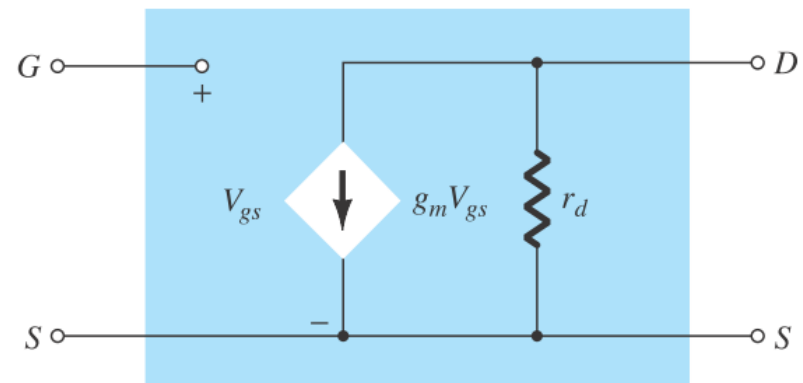
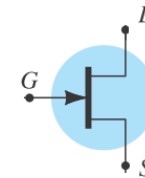
Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET)

(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)

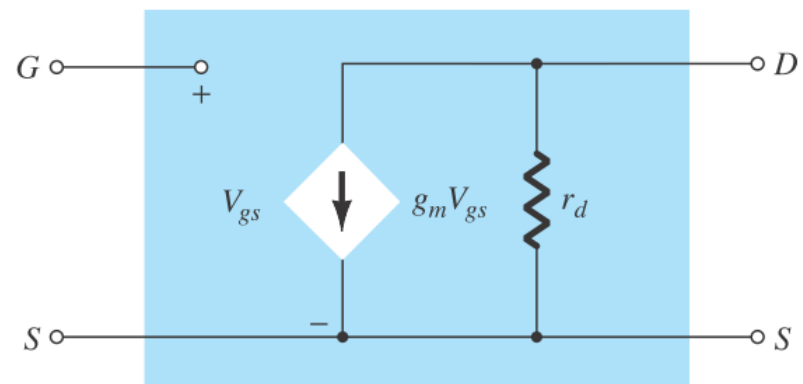
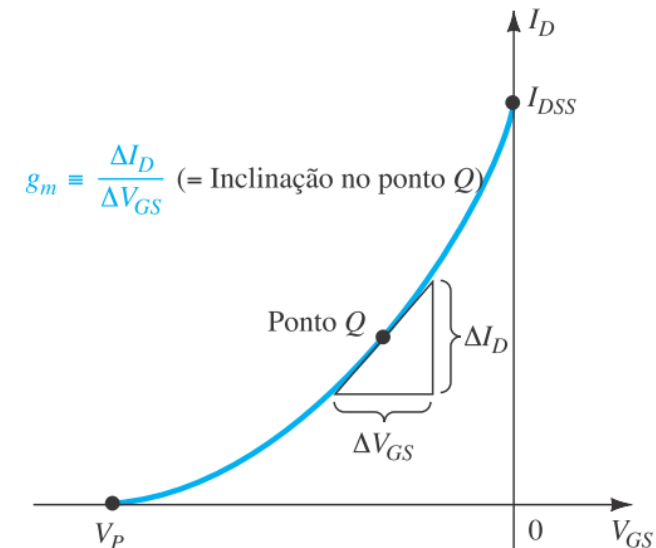
MODELO AC ou CA

- 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

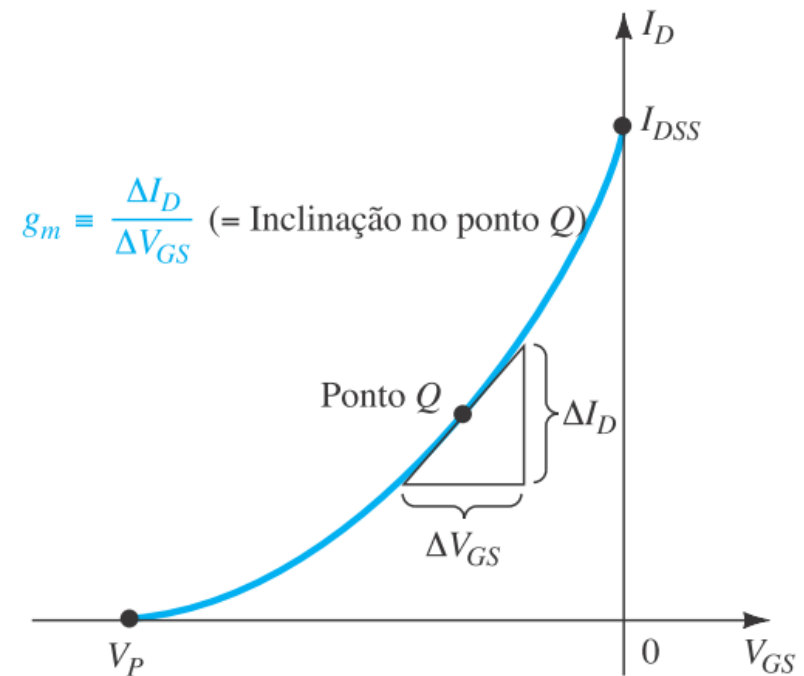
- *Determinação gráfica de g_m*
 - Se examinarmos a característica de transferência da Figura do “slide anterior”, veremos que g_m é na verdade a inclinação da curva no ponto de operação. Isto é:

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

- 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).



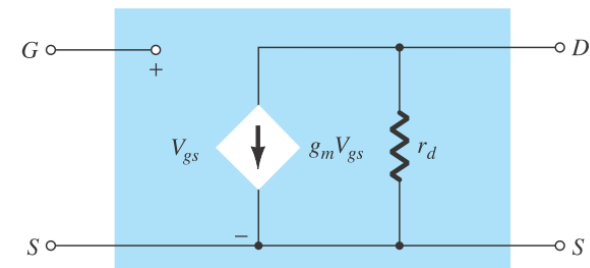
Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET)

(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° 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 $g_m V_{gs}$.

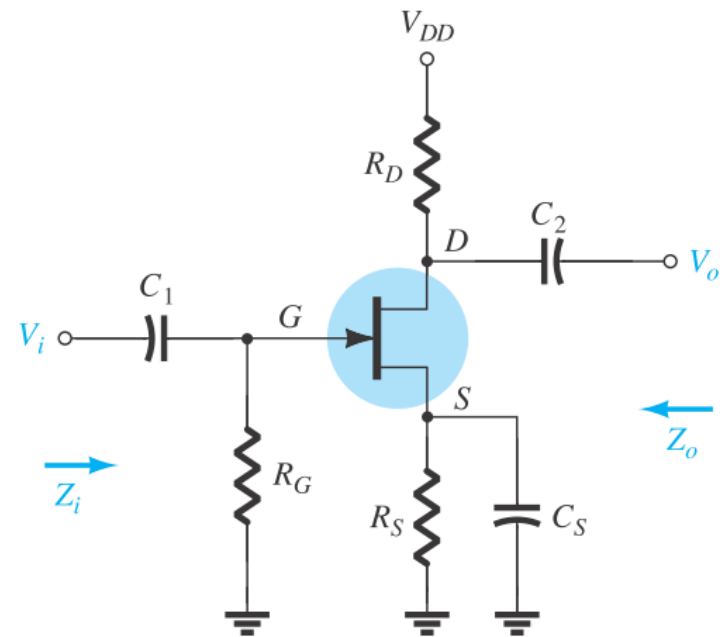


Circuito equivalente CA do JFET.

Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) (Configuração Com Autopolarização)

Análise AC ou CA (Com Desvio):

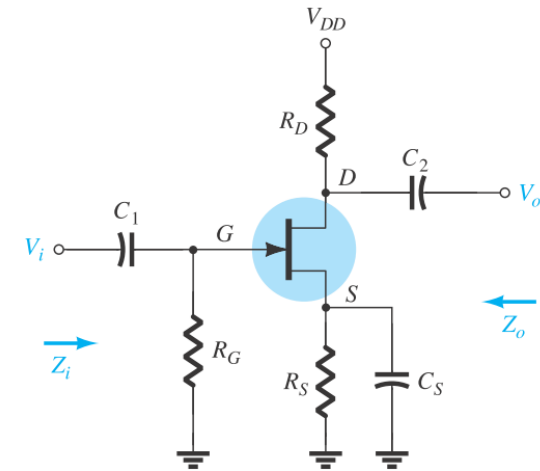
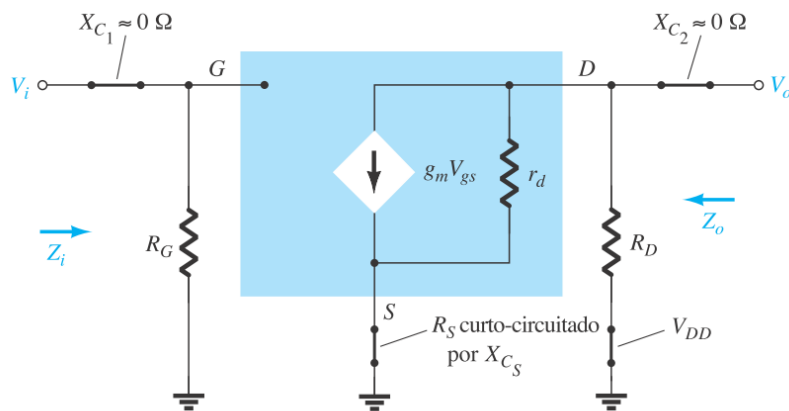
- A configuração com polarização fixa apresenta a desvantagem de exigir duas fontes de tensão CC. A configuração com autopolarização da Figura ao lado requer somente uma fonte CC para estabelecer o ponto de operação desejado.



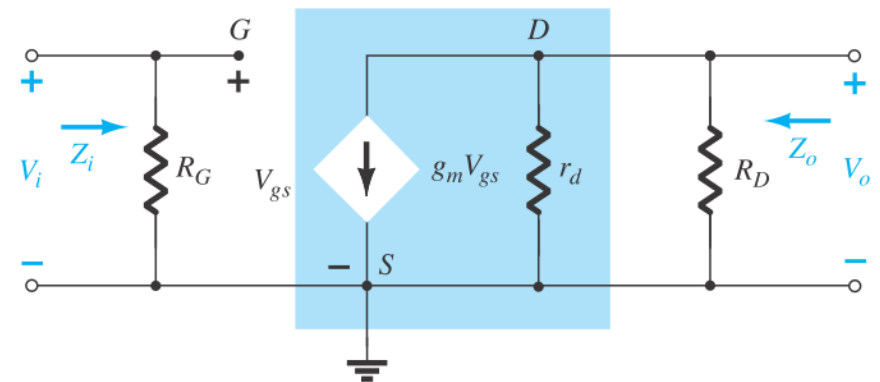
Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) (Configuração Com Autopolarização)

Análise AC ou CA (Com Desvio):

O capacitor C_S em paralelo com a resistência de fonte representa um circuito aberto equivalente para a operação CC, o que permite que R_S defina o ponto de operação. Sob condições CA, o capacitor assume o estado de curto-circuito e “curto-circuita” o efeito de R_S . O circuito equivalente do JFET é apresentado na Figura abaixo:



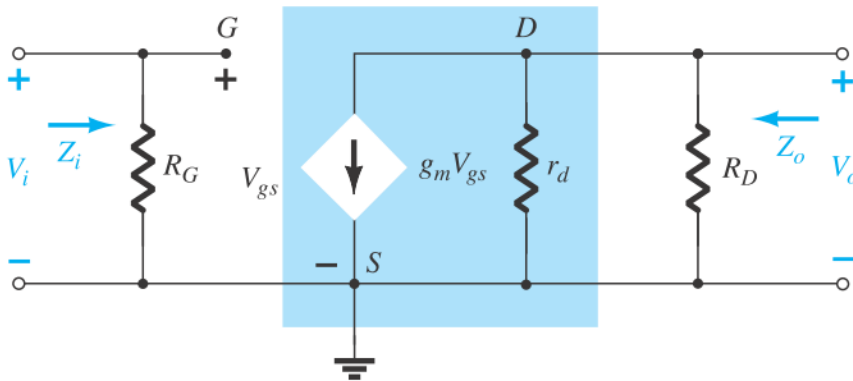
- O circuito equivalente do JFET da figura anterior é apresentado na



Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) (Configuração Com Autopolarização)

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

$$Z_i = R_G$$

• 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

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

Se $r_d \geq 10R_D$,

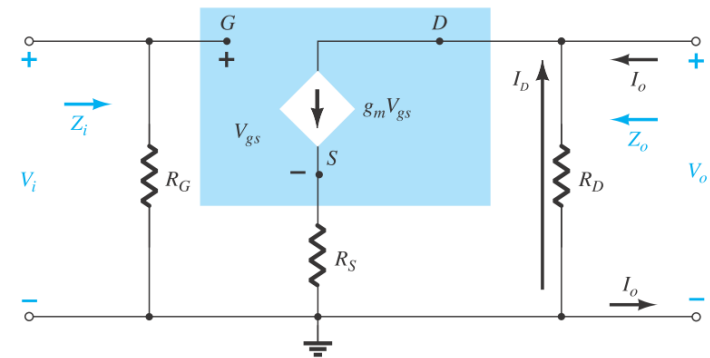
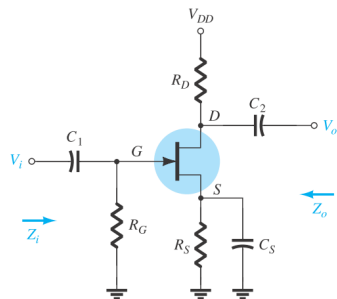
$$A_v = -g_m R_D \quad r_d \geq 10R_D$$

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

Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) (Configuração Com Autopolarização)

Análise AC ou CA (R_S sem desvio):

Se C_S for removido da Figura abaixo, o resistor R_S será parte do circuito equivalente CA, como mostra a Figura ao lado. Nesse caso, não há uma forma óbvia de reduzir o circuito para diminuir seu nível de complexidade. Ao determinar Z_i , Z_o e A_v , devemos tomar cuidado com a notação, com as polaridades e com os sentidos de corrente definidos. Inicialmente, a resistência r_d não será incluída na análise para que se possa ter uma base de comparação.



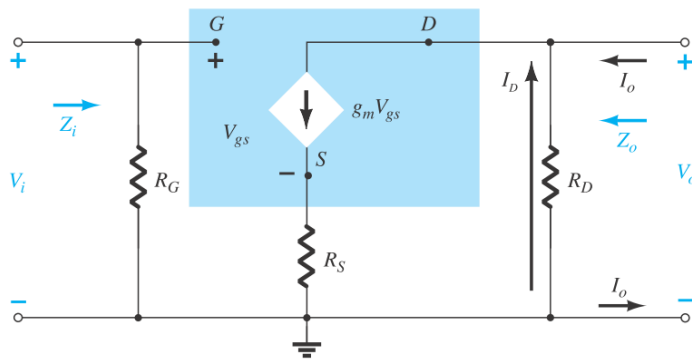
- Z_i Devido à condição de circuito aberto entre a porta e o circuito de saída, a entrada se mantém como a seguir:

$$Z_i = R_G$$

Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) (Configuração Com Autopolarização)

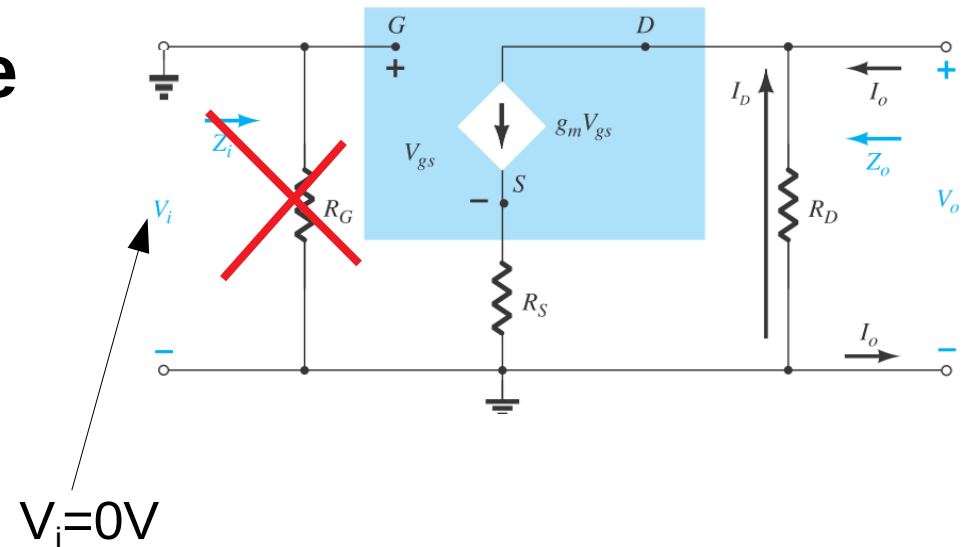
Análise AC ou CA (R_S sem desvio):

- Estabelecer $V_i=0V$ na Figura abaixo faz com que o terminal da porta fique no potencial do terra (0V). Assim, a tensão através de R_G é 0V, o que equivale a “cortá-lo” da figura.



Z_o A impedância de saída é definida por:

$$Z_o = \left. \frac{V_o}{I_o} \right|_{V_i=0}$$



Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) (Configuração Com Autopolarização)

Análise AC ou CA (R_S sem desvio):

- A aplicação da Lei das Correntes de Kirchhoff resulta em:

$$I_o + I_D = g_m V_{gs}$$

com

$$V_{gs} = -(I_o + I_D)R_S$$

de maneira que

$$I_o + I_D = -g_m(I_o + I_D)R_S = -g_m I_o R_S - g_m I_D R_S$$

ou

$$I_o[1 + g_m R_S] = -I_D[1 + g_m R_S]$$

e

$$I_o = -I_D \text{ (a fonte de corrente controlada } g_m V_{gs} = 0 \text{ A para as condições aplicadas)}$$

Visto que

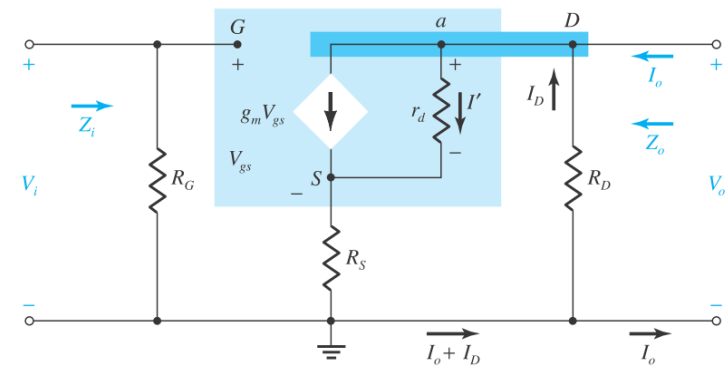
$$V_o = -I_D R_D$$

então

$$V_o = -(-I_o)R_D = I_o R_D$$

$$Z_o = \frac{V_o}{I_o} = R_D \quad r_d = \infty \Omega$$

- Se r_d for incluído no circuito, o equivalente aparecerá como mostra a Figura abaixo.



$$\text{Visto que } Z_o = \left. \frac{V_o}{I_o} \right|_{V_i=0 \text{ V}} = -\frac{I_D R_D}{I_o}$$

Devemos tentar encontrar uma expressão para I_o em termos de I_D . A aplicação da Lei das Correntes de Kirchhoff produz:

$$I_o = g_m V_{gs} + I_{r_d} - I_D$$

Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) (Configuração Com Autopolarização)

Análise AC ou CA (R_S sem desvio):

mas $V_{rd} = V_o + V_{gs}$

e
$$I_o = g_m V_{gs} + \frac{V_o + V_{gs}}{r_d} - I_D$$

ou

$$I_o = \left(g_m + \frac{1}{r_d} \right) V_{gs} - \frac{I_D R_D}{r_d} - I_D \text{ usando } V_o = -I_D R_D$$

Agora,

$$V_{gs} = -(I_D + I_o)R_S$$

de maneira que

$$I_o = -\left(g_m + \frac{1}{r_d} \right) (I_D + I_o)R_S - \frac{I_D R_D}{r_d} - I_D$$

$$I_o \left[1 + g_m R_S + \frac{R_S}{r_d} \right] = -I_D \left[1 + g_m R_S + \frac{R_S}{r_d} + \frac{R_D}{r_d} \right]$$

ou
$$I_o = \frac{-I_D \left[1 + g_m R_S + \frac{R_S}{r_d} + \frac{R_D}{r_d} \right]}{1 + g_m R_S + \frac{R_S}{r_d}}$$

e
$$Z_o = \frac{V_o}{I_o} = \frac{-I_D R_D}{\frac{-I_D \left(1 + g_m R_S + \frac{R_S}{r_d} + \frac{R_D}{r_d} \right)}{1 + g_m R_S + \frac{R_S}{r_d}}}$$

e finalmente:

$$Z_o = \frac{\left[1 + g_m R_S + \frac{R_S}{r_d} \right]}{\left[1 + g_m R_S + \frac{R_S}{r_d} + \frac{R_D}{r_d} \right]} R_D$$

Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) (Configuração Com Autopolarização)

Análise AC ou CA (R_S sem desvio):

Para $r_d \geq 10R_D$,

$$\left(1 + g_m R_S + \frac{R_S}{r_d} \right) \gg \frac{R_D}{r_d}$$

e

$$1 + g_m R_S + \frac{R_S}{r_d} + \frac{R_D}{r_d} \cong 1 + g_m R_S + \frac{R_S}{r_d}$$

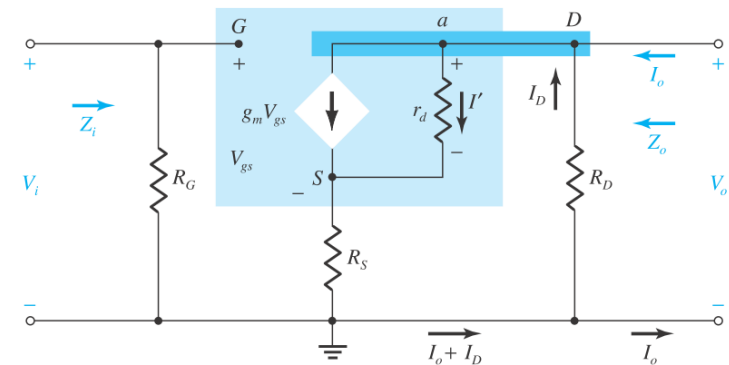
o que resulta em

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

- **Av** Para o circuito da Figura abaixo, a aplicação da Lei das Tensões de Kirchhoff no circuito de entrada resulta em:

$$V_i - V_{gs} - V_{R_S} = 0$$

$$V_{gs} = V_i - I_D R_S$$



Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) (Configuração Com Autopolarização)

Análise AC ou CA (R_S sem desvio):

Para $r_d \geq 10R_D$,

$$\left(1 + g_m R_S + \frac{R_S}{r_d} \right) \gg \frac{R_D}{r_d}$$

e

$$1 + g_m R_S + \frac{R_S}{r_d} + \frac{R_D}{r_d} \cong 1 + g_m R_S + \frac{R_S}{r_d}$$

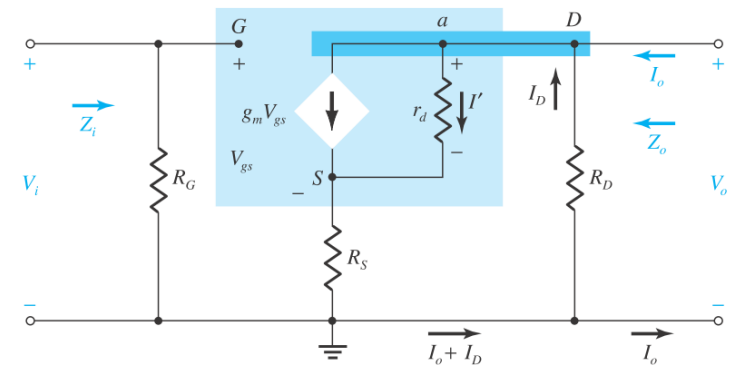
o que resulta em

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

- **Av:** Para o circuito da Figura abaixo, a aplicação da Lei das Tensões de Kirchhoff no circuito de entrada resulta em:

$$V_i - V_{gs} - V_{R_S} = 0$$

$$V_{gs} = V_i - I_D R_S$$



Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) (Configuração Com Autopolarização)

- **Av:**

A tensão através de r_d usando-se a Lei das Tensões de Kirchhoff é:

$$V_{r_d} = V_o - V_{R_S}$$

e

$$I' = \frac{V_{r_d}}{r_d} = \frac{V_o - V_{R_S}}{r_d}$$

De maneira que a aplicação da Lei das Correntes de Kirchhoff resulta em:

$$I_D = g_m V_{gs} + \frac{V_o - V_{R_S}}{r_d}$$

Substituindo V_{gs} , V_o e V_{R_S} na equação anterior, temos:

$$I_D = g_m [V_i - I_D R_S] + \frac{(-I_D R_D) - (I_D R_S)}{r_d}$$

- **Av:**

de forma que

$$I_D \left[1 + g_m R_S + \frac{R_D + R_S}{r_d} \right] = g_m V_i$$

ou

$$I_D = \frac{g_m V_i}{1 + g_m R_S + \frac{R_D + R_S}{r_d}}$$

A tensão de saída é, portanto,

$$V_o = -I_D R_D = - \frac{g_m R_D V_i}{1 + g_m R_S + \frac{R_D + R_S}{r_d}}$$

e

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = - \frac{g_m R_D}{1 + g_m R_S + \frac{R_D + R_S}{r_d}}$$

Novamente, se $r_d \geq 10(R_D + R_S)$,

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} \cong - \frac{g_m R_D}{1 + g_m R_S} \quad r_d \geq 10(R_D + R_S)$$

Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) (Configuração Com Autopolarização)

- **Relação de fase:**

O sinal negativo na Equação abaixo, indica novamente que há um deslocamento de fase de 180° entre V_i e V_o :

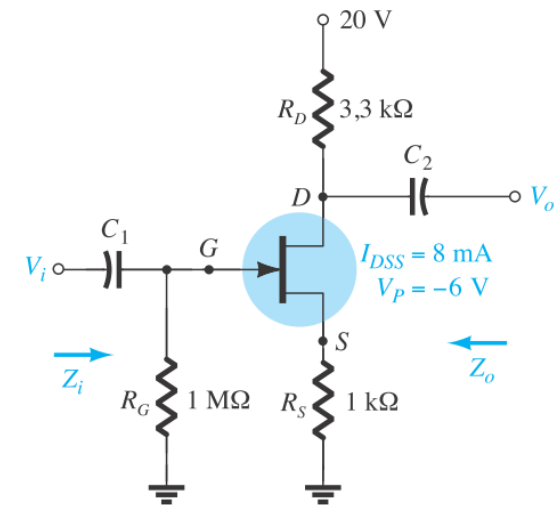
$$A_v = \frac{V_o}{V_i} \cong - \frac{g_m R_D}{1 + g_m R_S} \quad r_d \geq 10(R_D + R_S)$$

FET

(ATIVIDADES)

A configuração com autopolarização das atividades da aula 04 apresenta um ponto de operação definido por $V_{GSQ} = -2,6 \text{ V}$ e $I_{DQ} = 2,6 \text{ mA}$, com $I_{DSS} = 8 \text{ mA}$ e $V_p = -6 \text{ V}$. O circuito é redesenhado na Figura abaixo considerando-se um sinal aplicado V_i . O valor de g_{os} dado é $20 \mu\text{S}$.

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



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.