



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

Setembro/2021

Conteúdo

- Introdução;
- Transistores (FET)
- Configuração Único Estágio (Polarização DC):
 - Polarização: Fixa;
 - Polarização: autopolarização;
 - Polarização por Divisor de Tensão.
- Simulação (Análise DC):
 - Polarização: Fixa;
 - Polarização: autopolarização;
 - Polarização por Divisor de Tensão.

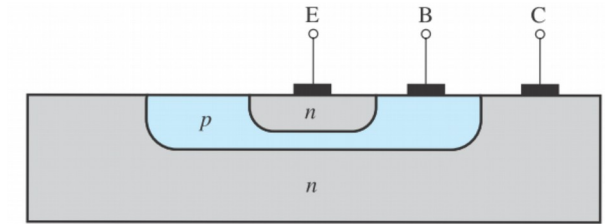
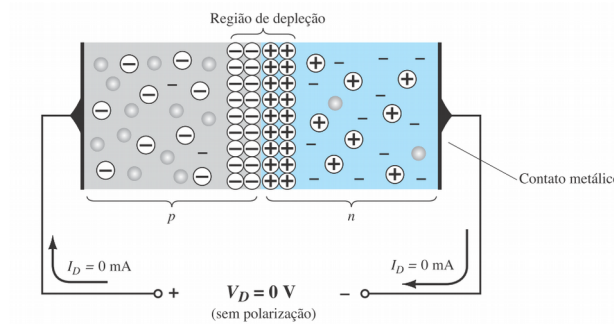
Introdução

Vacuum Tube Op-Amps

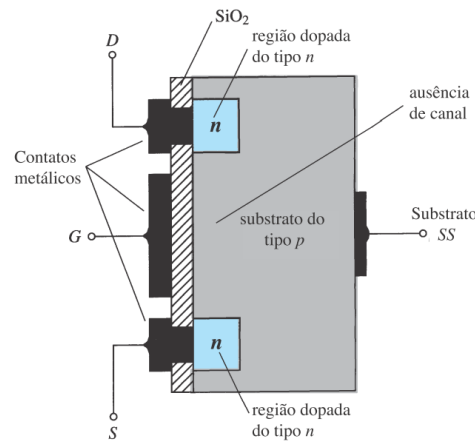
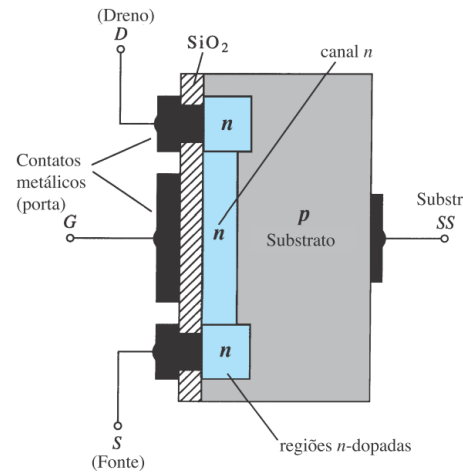
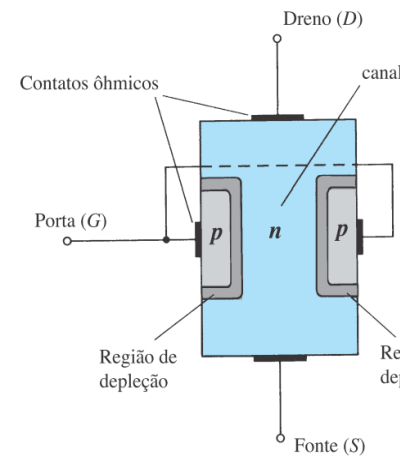
- First op amps built in 1930's-1940's
 - Technically feedback amplifiers due to only having one useable input
- Used in WWII to help how to strike military targets
 - Buffers, summers, differentiators, inverters
- Took $\pm 300V$ to $\pm 100V$ to power



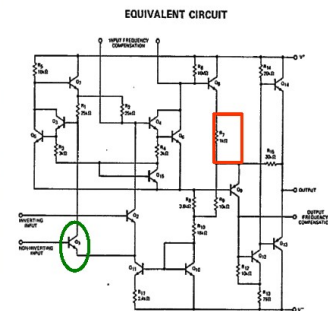
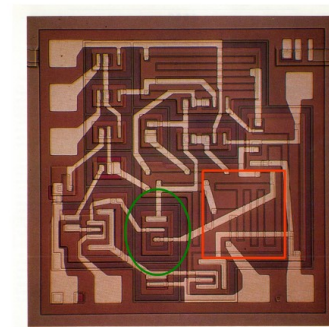
http://en.wikipedia.org/wiki/Image:K2-W_vacuum_tube_op-amp.jpg



Cross section of an npn BJT.



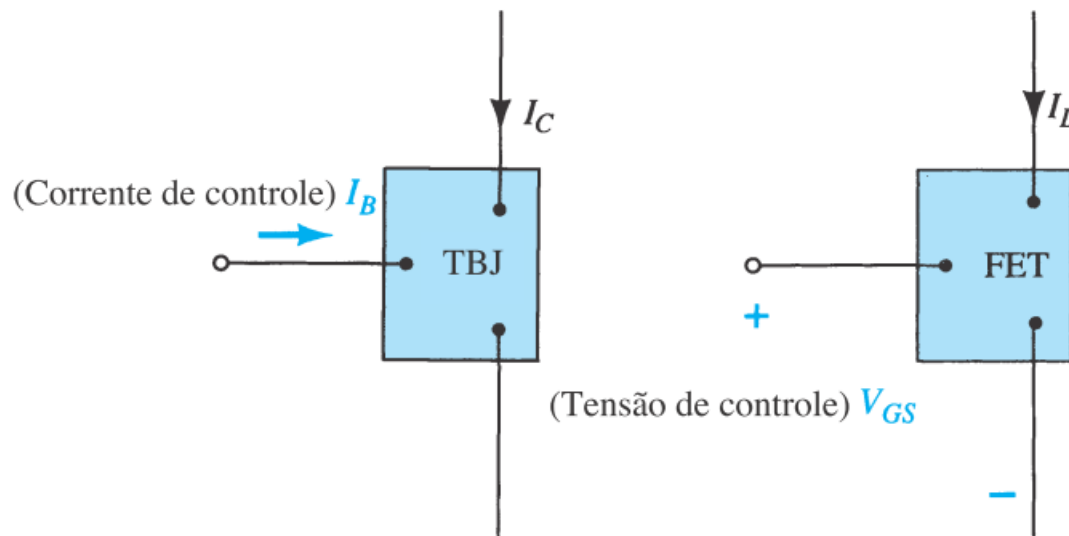
(Exemplos de AmpOp - 1964 - Op-Amp A702, Fairchild)



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 (FET)

- As relações gerais que podem ser aplicadas à análise CC dos amplificadores a FET são:

$$I_G \cong 0 \text{ A}$$

$$I_D = I_S$$

- JFET:

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

- MOSFET

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

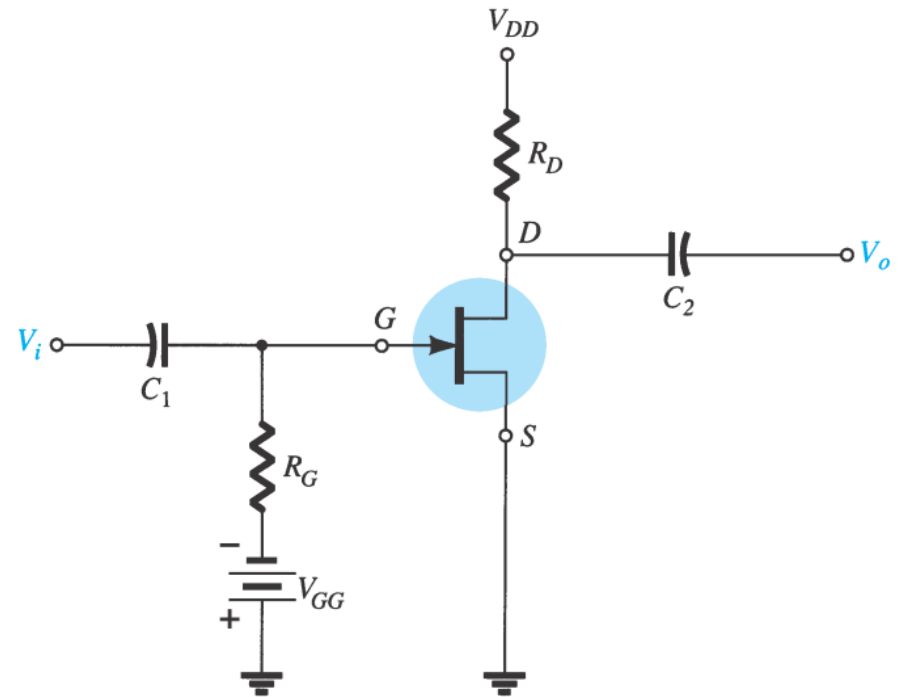
Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) (Configuração Com Polarização Fixa)

Análise DC:

- Utilizar as mesmas considerações que as configurações em utilizadas no transistor TBJ (ou BJT), ou seja, os capacitares são considerados abertos em DC ou baixas frequências.
- Análise por método matemático:
- $I_G \cong 0$ (características físicas dos FET's).

$$I_G \cong 0 \text{ A}$$

$$V_{RG} = I_G R_G = (0 \text{ A}) R_G = 0 \text{ V}$$



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

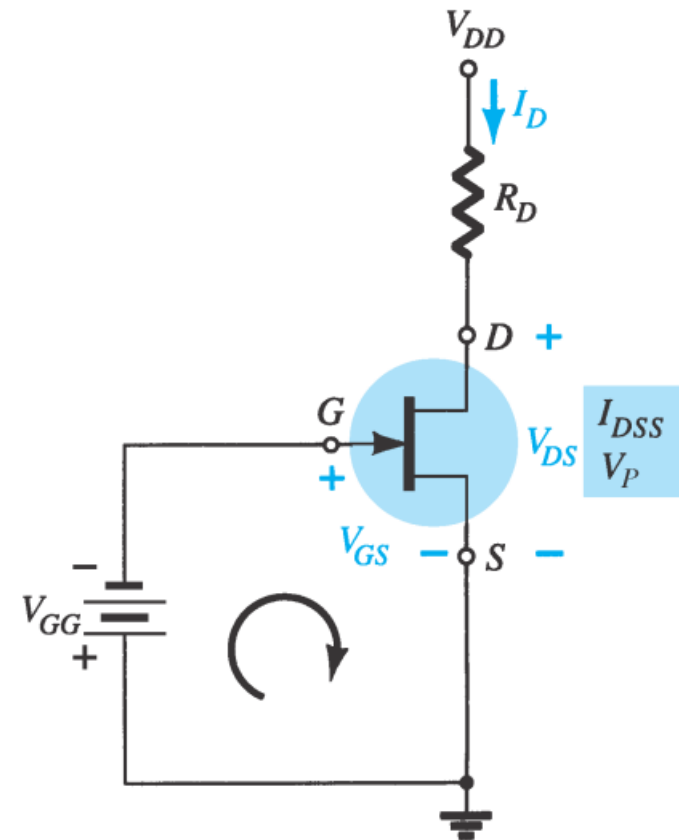
Análise DC:

- Aplicando LKT na malha definida na figura ao lado:

$$-V_{GG} - V_{GS} = 0$$

$$V_{GS} = -V_{GG}$$

- Uma vez que V_{GG} é uma fonte CC constante, a tensão V_{GS} é fixa; daí a notação “configuração com polarização fixa”.



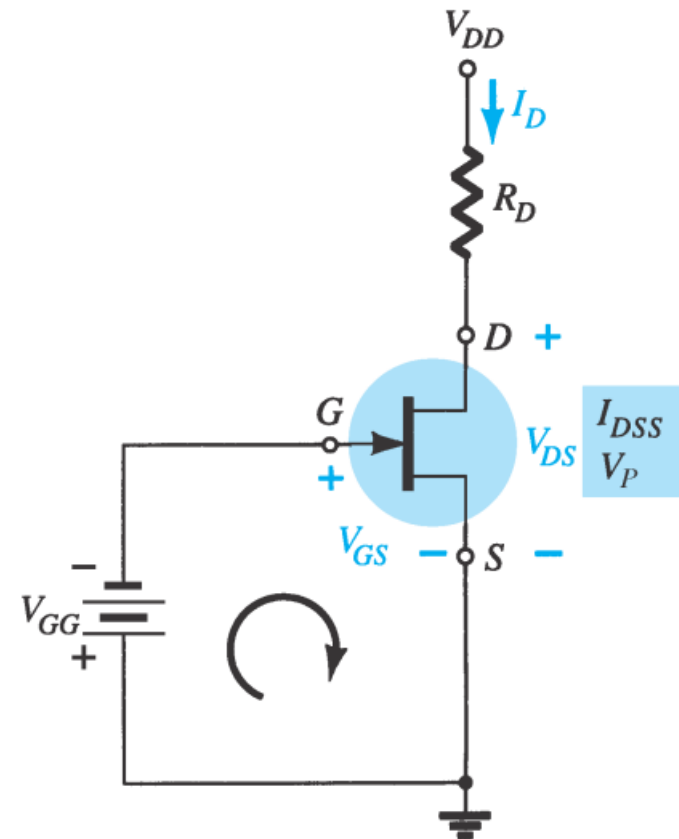
Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) (Configuração Com Polarização Fixa)

Análise DC:

- O valor resultante da corrente de dreno I_D é agora controlado pela equação de Shockley:

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

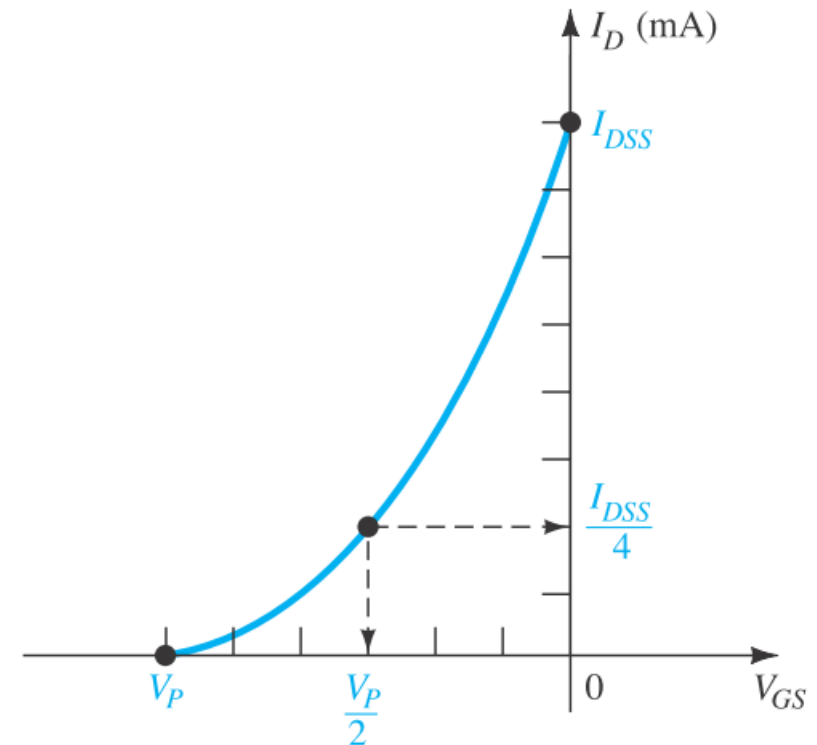
- Visto que V_{GS} é um valor fixo para essa configuração, sua magnitude e sinal podem simplesmente ser substituídos na equação de Shockley para determinar o valor e I_D .



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

Análise DC:

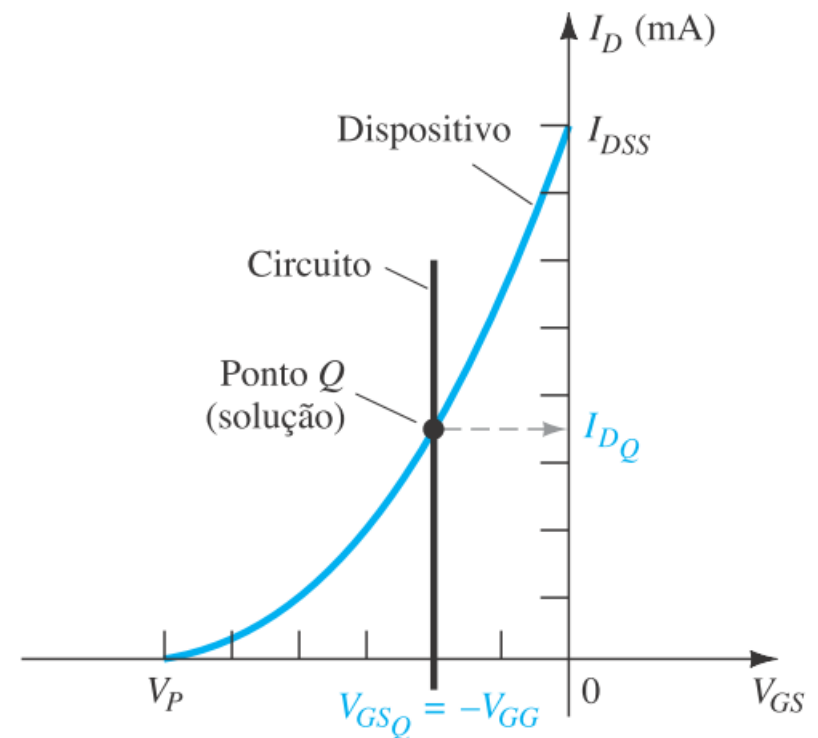
- Análise por método gráfico:
 - Para uma análise gráfica é necessário um gráfico da equação de Shockley, como mostra a Figura ao lado.
 - Pelo “Datasheet” podemos escolher os pontos definidos como I_{DSS} e V_P e um ponto estimado como, por exemplo, $V_{GS}=V_{P/2}$ que resulta em uma corrente de dreno de $I_{DSS}/4$ quando o gráfico da equação é traçado.



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

Análise DC:

- Análise por método gráfico:
 - Na Figura ao lado, o valor fixo de V_{GS} definido na análise inicial foi superposto como uma reta vertical em $V_{GS} = -V_{GG}$;
 - Logo em qualquer ponto da reta vertical, o valor de V_{GS} é $-V_{GG}$;
 - Então o valor de I_D deve ser simplesmente determinado sobre essa reta (no caso traçando-se uma reta horizontal a partir da intersecção entre a curva do dispositivo e a solução do circuito (reta vertical)).



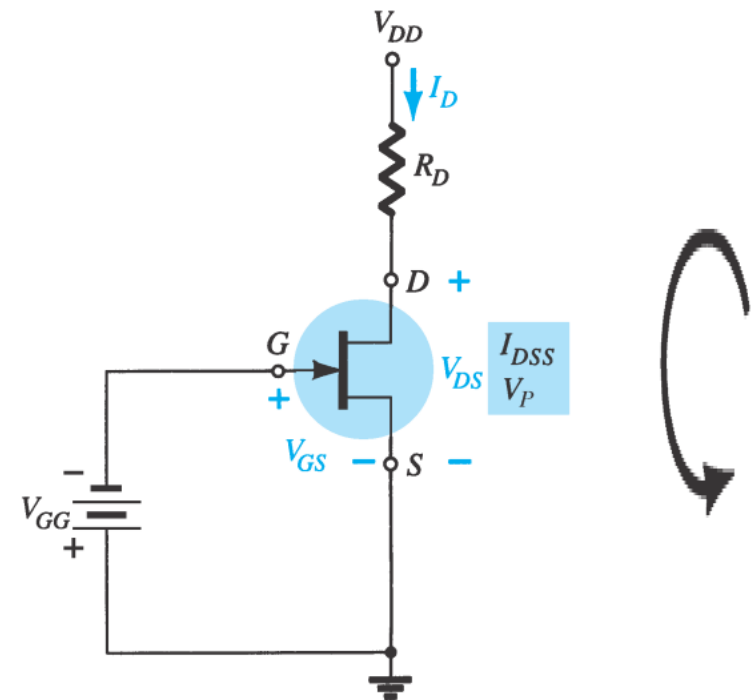
Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) (Configuração Com Polarização Fixa)

Análise DC:

- Utilizando análise por método matemático para definir as grandezas da saída:
 - A tensão dreno-fonte (V_{DS}) da seção de saída pode ser determinada aplicando-se a Lei das Tensões de Kirchhoff como segue:

$$+ V_{DS} + I_D R_D - V_{DD} = 0$$

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D$$



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

- Análise DC:

Retornando a análise por método matemático para definir as grandezas da saída e lembrando de que os subscritos de uma única letra indicam uma tensão medida em um ponto em relação ao terra, tem-se:

$$V_S = 0 \text{ V}$$

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

- Análise DC: Continuando a análise por método matemático para definir as grandezas da saída:

Tem-se:

$$V_{DS} = V_D - V_S$$

$$V_D = V_{DS} + V_S$$

$$V_D = V_{DS} + 0 \text{ V}$$

$$V_D = V_{DS}$$

e

$$V_{GS} = V_G - V_S$$

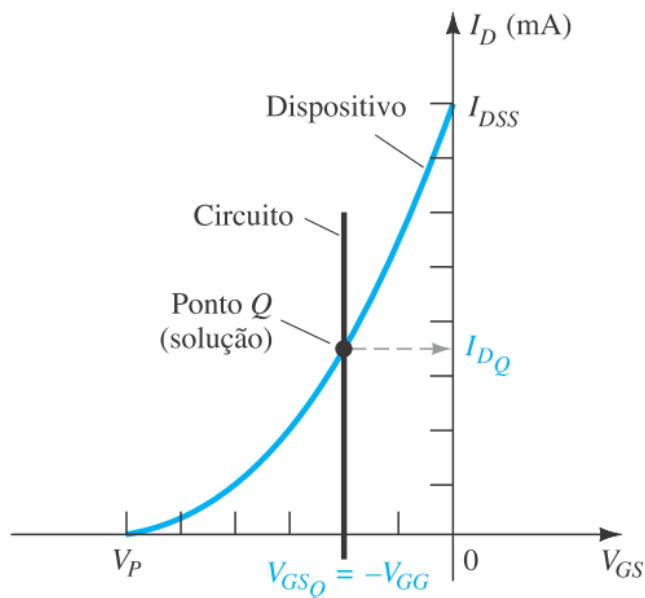
$$V_G = V_{GS} + V_S$$

$$V_G = V_{GS} + 0 \text{ V}$$

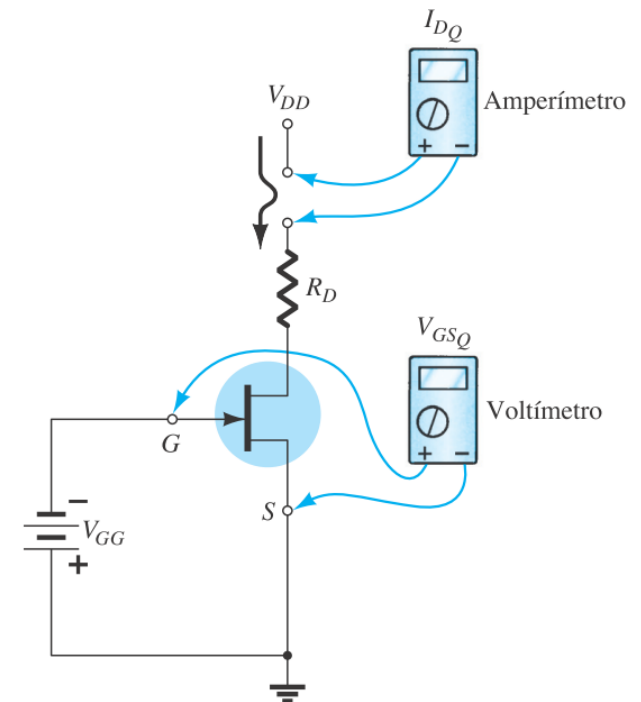
$$V_G = V_{GS}$$

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

- Conclui-se podemos utilizar tanto o método matemático quanto o método gráfico para definir as grandezas elétricas em uma análise DC.

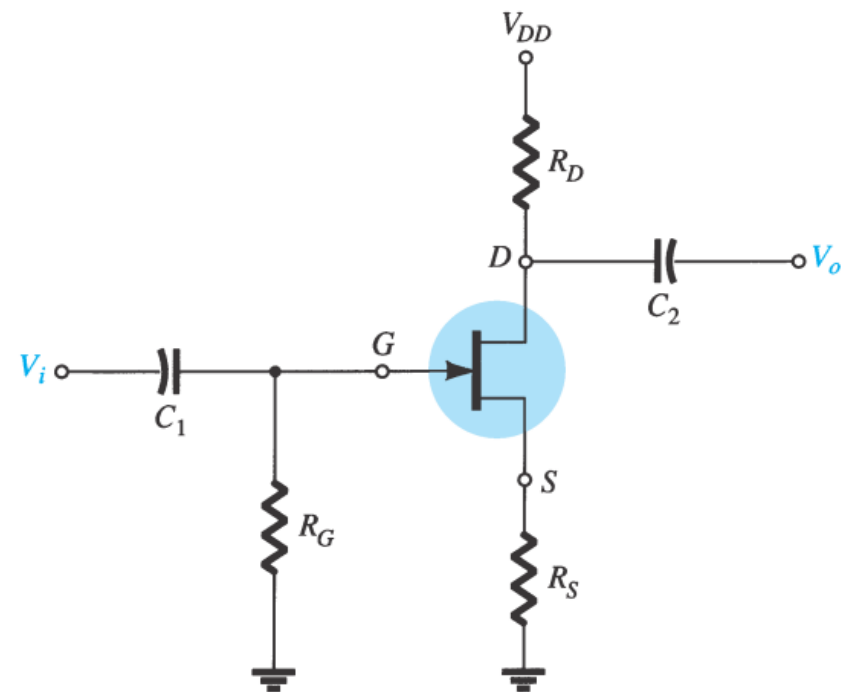


- a) V_{GSQ} .
- b) I_{DQ} .
- c) V_{DS} .
- d) V_D .
- e) V_G .
- f) V_S .



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

- A principal característica da configuração com autopolarização é a eliminação da necessidade de termos duas fontes CC. A tensão de controle porta-fonte (V_{GS}) passa a ser determinada pela tensão através do resistor R_S colocado no terminal de fonte (s) do JFET, como mostra a Figura ao lado.



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

- Análise DC:
 - Novamente os capacitores podem ser substituídos por “circuitos abertos”, e o resistor R_G pode ser substituído por um curto-circuito equivalente, já que $I_G=0$ A.
 - A corrente através de R_S é a corrente de fonte I_S , mas $I_S=I_D$ e

$$V_{RS} = I_D R_S$$

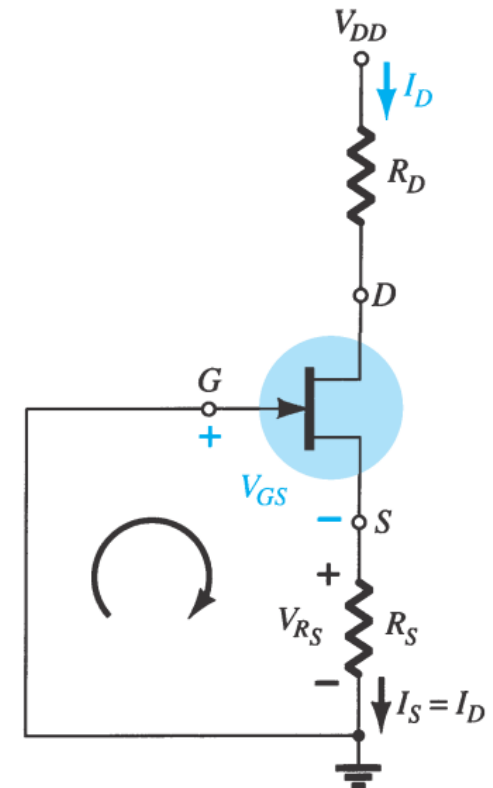
- Para a malha fechada indicada na Figura ao lado, temos

$$-V_{GS} - V_{RS} = 0$$

$$V_{GS} = -V_{RS}$$

$$V_{GS} = -I_D R_S$$

- Observe, nesse caso, que V_{GS} é função da corrente de saída I_D e não tem mais amplitude constante como ocorria para a configuração com polarização fixa.



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

- Análise DC:

- A Equação abaixo é definida pela configuração do circuito, e a equação de Shockley relaciona os parâmetros de entrada e saída do dispositivo. As duas equações relacionam as mesmas duas variáveis, I_D e V_{GS} , permitindo uma solução gráfica ou matemática.

$$V_{GS} = -I_D R_S$$

- A solução matemática pode ser obtida simplesmente por meio da substituição da Equação a acima na equação de Shockley, como vemos a seguir:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2$$
$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{-I_D R_S}{V_P} \right)^2$$

ou

$$I_D = I_{DSS} \left(1 + \frac{I_D R_S}{V_P} \right)^2$$

- Desenvolvendo a equação quadrática anterior e reorganizando os termos, podemos obter uma equação com o seguinte formato:

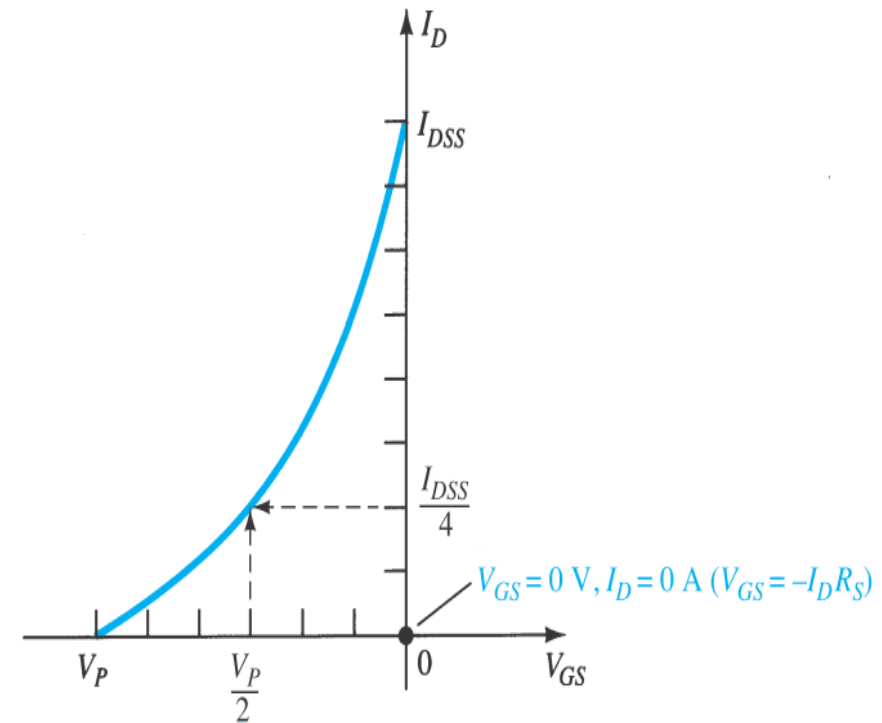
$$I_D^2 + K_1 I_D + K_2 = 0$$

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

- Análise DC (método gráfico):
 - O método gráfico requer que primeiro se estabeleça a curva de transferência do dispositivo, como a que aparece na Figura ao lado.
 - Nesta figura define uma linha reta no mesmo gráfico, identifiquemos dois pontos que estejam na linha e simplesmente tracemos uma reta entre eles. A condição mais óbvia a ser aplicada é $I_D = 0$ A, já que ela resulta em $V_{GS} = -I_D R_S = (0 \text{ A}) R_S = 0$ V. Para a Equação abaixo:

$$V_{GS} = -I_D R_S$$

- Portanto, um ponto da reta é definido por $I_D = 0$ A e $V_{GS} = 0$ V, como mostra a Figura ao lado.



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

- Análise DC (método gráfico):
 - O segundo ponto para a equação abaixo requer que seja selecionado um valor de V_{GS} ou de I_D e que o valor correspondente da outra variável seja determinado pela Equação abaixo:

$$V_{GS} = -I_D R_S$$

- Os valores resultantes de I_D e V_{GS} definirão outro ponto da reta e permitirão o seu traçado. Suponhamos, por exemplo, que I_D seja igual à metade do nível de saturação. Isto é:

$$I_D = \frac{I_{DSS}}{2}$$

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

- Análise DC (método gráfico):

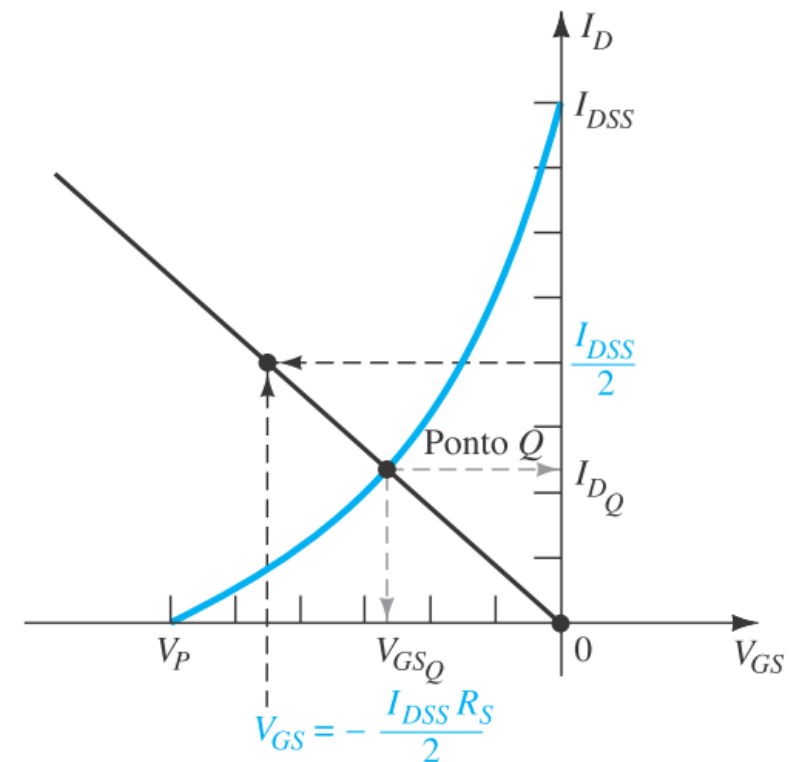
Então:

$$V_{GS} = -I_D R_S$$

$$V_{GS} = -\frac{I_{DSS} R_S}{2}$$

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

- Análise DC (método gráfico):
 - O resultado é o segundo ponto na reta traçada da Figura ao lado. A linha reta definida pela Equação abaixo é traçada e o ponto quiescente é obtido na interseção da reta com a curva característica do dispositivo. Os valores quiescentes de I_D e V_{GS} podem, então, ser determinados e utilizados para que sejam encontrados outros parâmetros que interessam.



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

- Análise DC (análise de circuito):
 - O valor de V_{DS} pode ser determinado pela aplicação da Lei de Tensões de Kirchhoff ao circuito de saída, com o seguinte resultado:

$$V_{RS} + V_{DS} + V_{RD} - V_{DD} = 0$$

e

$$V_{DS} = V_{DD} - V_{RS} - V_{RD} = V_{DD} - I_S R_S - I_D R_D$$

mas

$$I_D = I_S$$

e

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D(R_S + R_D)$$

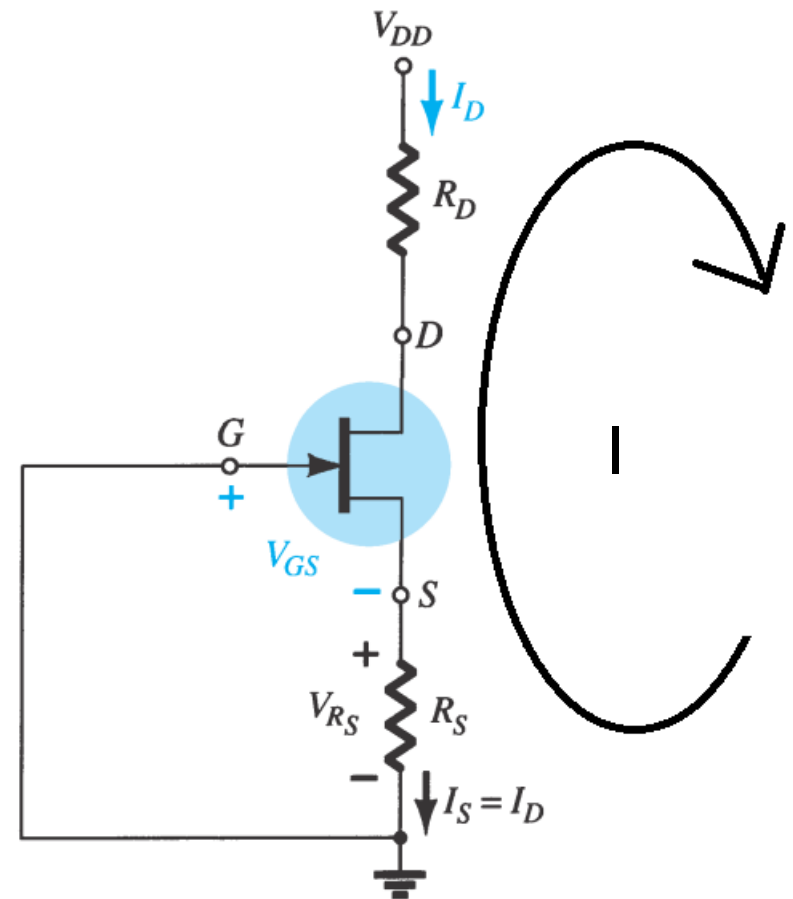
Além disso,

$$V_S = I_D R_S$$

$$V_G = 0 \text{ V}$$

e

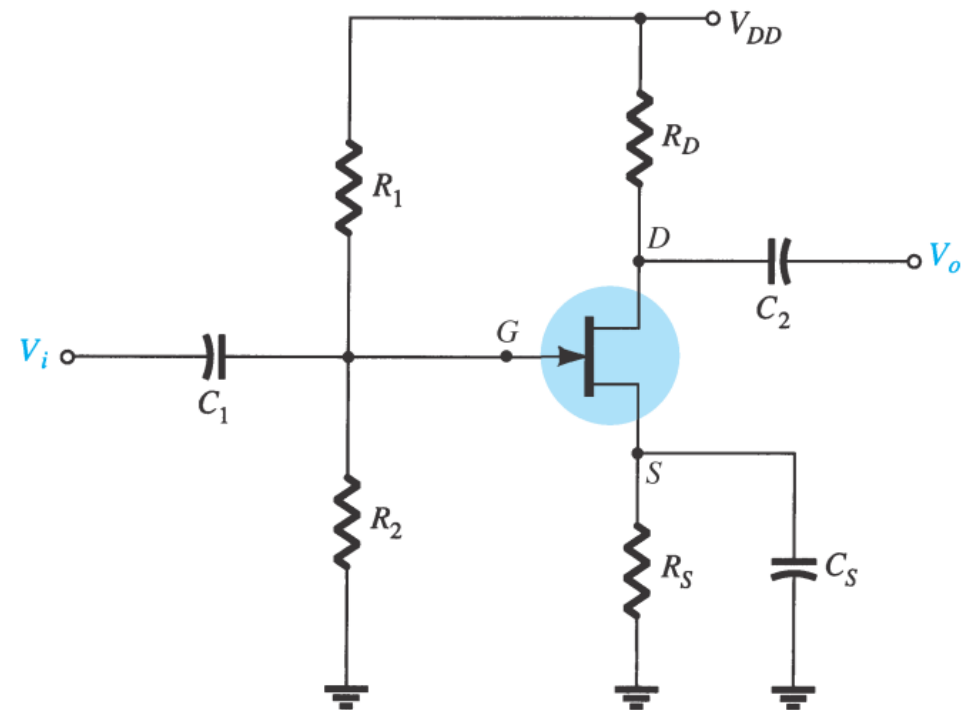
$$V_D = V_{DS} + V_S = V_{DD} - V_{RD}$$



Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET)

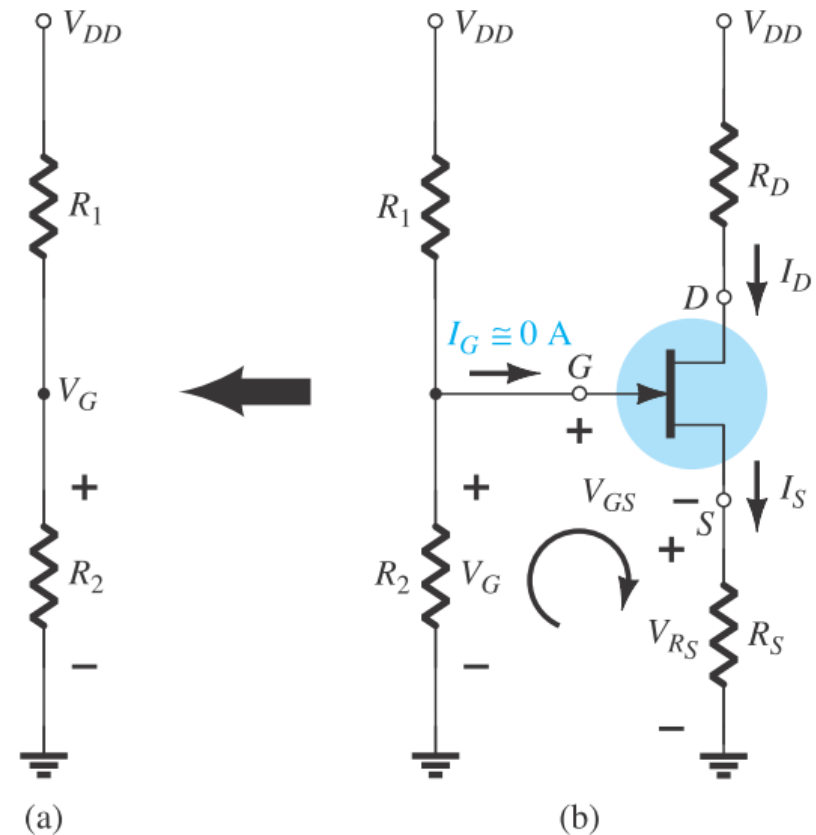
(Polarização por Divisor de Tensão)

- A polarização por divisor de tensão aplicada aos amplificadores com TBJ é aplicada também aos amplificadores com FET, como demonstra a Figura ao lado. A estrutura básica é exatamente a mesma, porém a análise CC de cada um é bastante diferente. Para os amplificadores com FET, $I_G = 0A$, mas o valor de I_B para amplificadores emissor-comum com TBJ pode afetar os valores de corrente e tensão nos circuitos de entrada e saída. Lembramos que I_B é o elo entre os circuitos de entrada e saída na configuração TBJ com divisor de tensão, e que V_{GS} cumpre esse mesmo papel para a configuração com FET.



Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) (Polarização por Divisor de Tensão)

- O circuito da Figura do “slide 23” é redesenhado para a análise CC, como mostra a Figura ao lado. Observe que todos os capacitores, inclusive o capacitor C_S de desvio, foram substituídos por um “circuito aberto” equivalente na Figura ao lado. Além disso, a fonte V_{DD} foi separada em duas fontes equivalentes para permitir a distinção entre a região de entrada e de saída do circuito. Uma vez que $I_G \approx 0A$, a Lei das Correntes de Kirchhoff permite afirmar que $I_{R1} = I_{R2}$, e o circuito em série equivalente que aparece à esquerda da figura pode ser utilizado para determinar o valor de V_G . A tensão V_G igual à tensão através de R_2 pode ser determinada pelo uso da regra do divisor de tensão e da Figura ao lado, como mostramos a seguir:



$$V_G = \frac{R_2 V_{DD}}{R_1 + R_2}$$

Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) (Polarização por Divisor de Tensão)

- Aplicando a Lei das Tensões de Kirchhoff no sentido horário na malha indicada da Figura ao lado, obtemos:

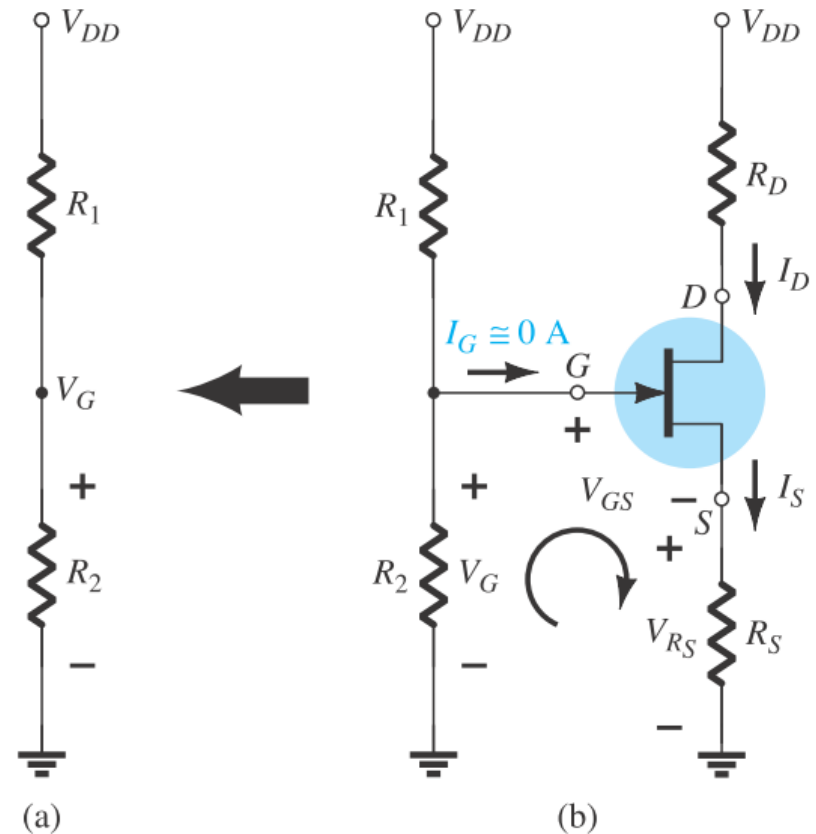
$$V_G - V_{GS} - V_{RS} = 0$$

e

$$V_{GS} = V_G - V_{RS}$$

Substituindo $V_{RS} = I_S R_S = I_D R_S$, temos

$$V_{GS} = V_G - I_D R_S$$



Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) (Polarização por Divisor de Tensão)

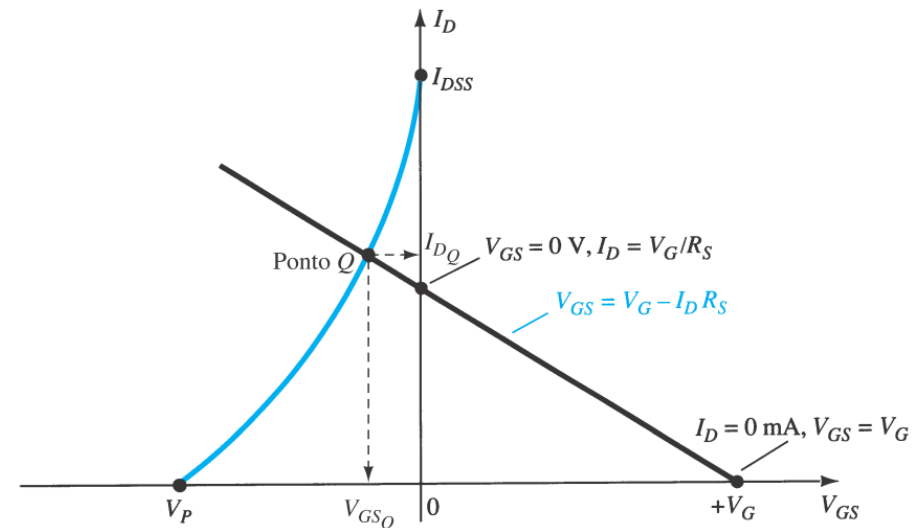
- O resultado é uma equação que inclui as mesmas duas variáveis da equação de Shockley: V_{GS} e I_D . As quantidades V_G e R_S são fixas pela configuração do circuito. A Equação abaixo ainda é a equação de uma reta, mas a origem não está mais contida nela.

$$V_{GS} = V_G - I_D R_S$$

- O procedimento para traçar a Equação acima não é complicado e será demonstrado a seguir. Uma vez que são necessários dois pontos para definir uma reta, utilizemos o fato de que em qualquer ponto no eixo horizontal da Figura ao lado a corrente $I_D = 0$ mA. Então, ao selecionarmos $I_D = 0$ mA, declaramos essencialmente que estamos em algum ponto do eixo horizontal. A posição exata pode ser determinada pela simples substituição de $I_D = 0$ mA na Equação acima e pelo cálculo do valor resultante de V_{GS} , como a seguir:

$$\begin{aligned} V_{GS} &= V_G - I_D R_S \\ &= V_G - (0 \text{ mA}) R_S \end{aligned}$$

$$V_{GS} = V_G |_{I_D = 0 \text{ mA}}$$



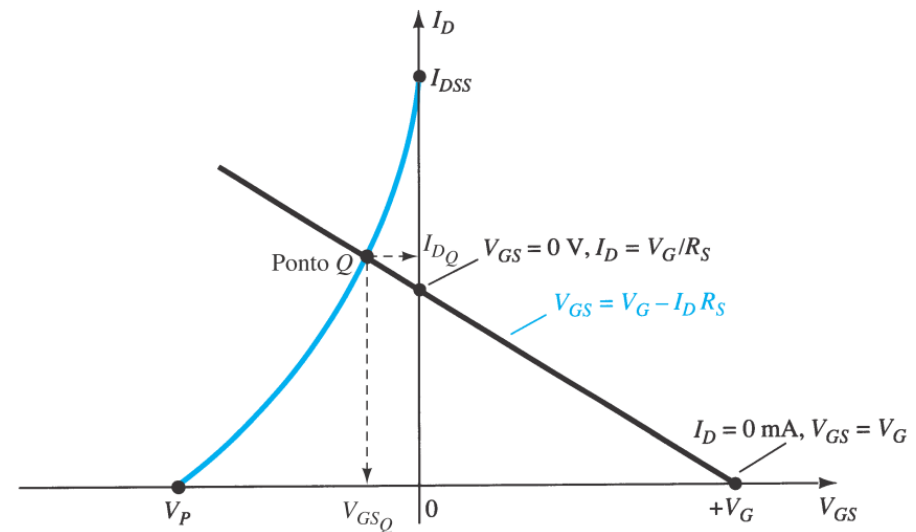
Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) (Polarização por Divisor de Tensão)

- Para o outro ponto, levemos em conta o fato de que, em qualquer ponto do eixo vertical, $V_{GS}=0V$, e façamos o cálculo para obter o valor resultante de I_D :

$$V_{GS} = V_G - I_D R_S$$
$$0 \text{ V} = V_G - I_D R_S$$

e

$$I_D = \frac{V_G}{R_S} \Big|_{V_{GS}=0 \text{ V}}$$

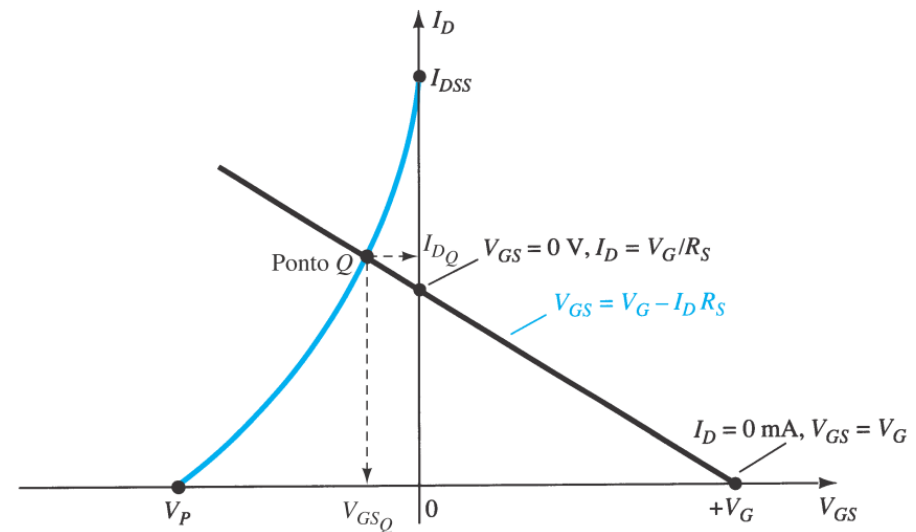


Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) (Polarização por Divisor de Tensão)

- Os dois pontos definidos anteriormente permitem o traçado de uma linha reta para representar a Equação abaixo:

$$V_{GS} = V_G - I_D R_S$$

- A interseção da linha reta com a curva de transferência na região à esquerda do eixo vertical define o ponto de operação e os valores correspondentes de I_D e V_{GS} .

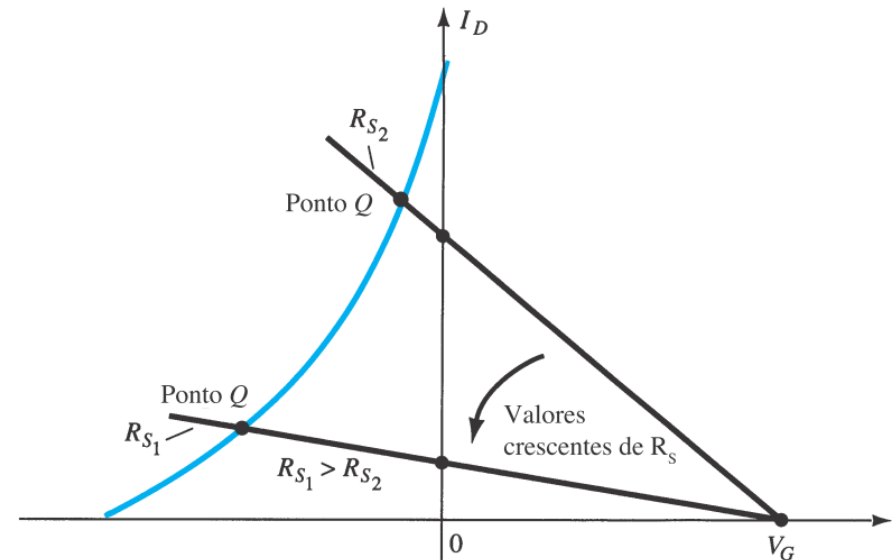


Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET)

(Polarização por Divisor de Tensão)

- Visto que a interseção no eixo vertical é determinada por $I_D = V_G / R_S$ e que V_G é fixo devido ao circuito de entrada, valores crescentes de R_S reduzem o valor de I_D na interseção, como mostrado na Figura ao lado. Essa figura deixa claro que:

“Valores crescentes de R_S resultam em menores valores quiescentes de I_D e em valores mais negativos de V_{GS} ”.



Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) (Polarização por Divisor de Tensão)

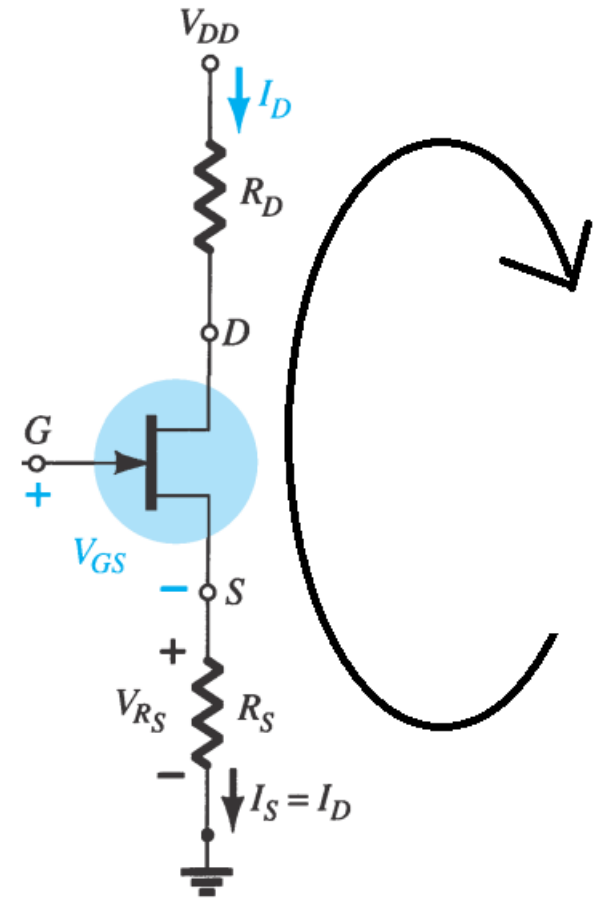
- Uma vez determinados os valores quiescentes de I_{DQ} e V_{GSQ} , a análise restante do circuito poderá ser feita da maneira usual. Isto é:

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D(R_D + R_S)$$

$$V_D = V_{DD} - I_D R_D$$

$$V_S = I_D R_S$$

$$I_{R_1} = I_{R_2} = \frac{V_{DD}}{R_1 + R_2}$$



FET

(ATIVIDADES)

1- Determine os seguintes parâmetros para o circuito da Figura abaixo:

a) V_{GSQ} ;

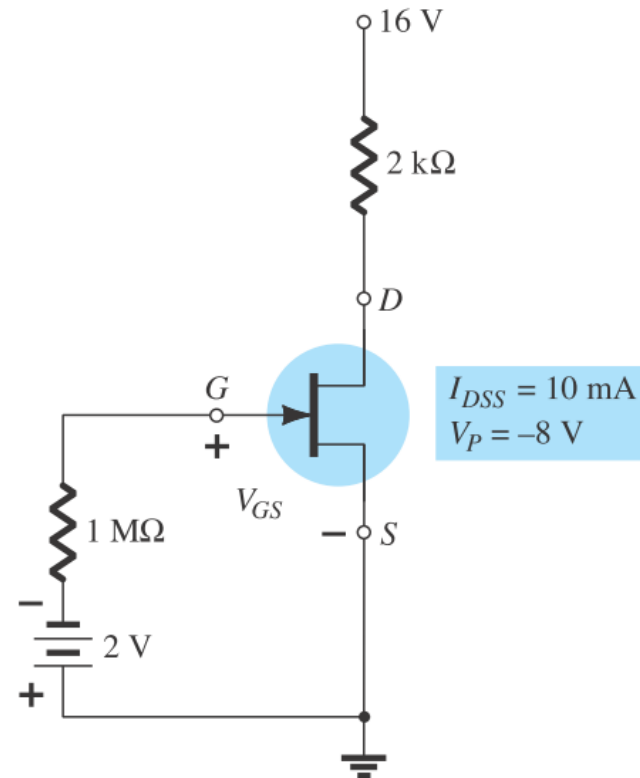
b) I_{DQ} ;

c) V_{DS} ;

d) V_D ;

e) V_G ;

f) V_S .



FET

(ATIVIDADES)

2- Determine os seguintes parâmetros para o circuito da figura abaixo:

a) V_{GSQ} ;

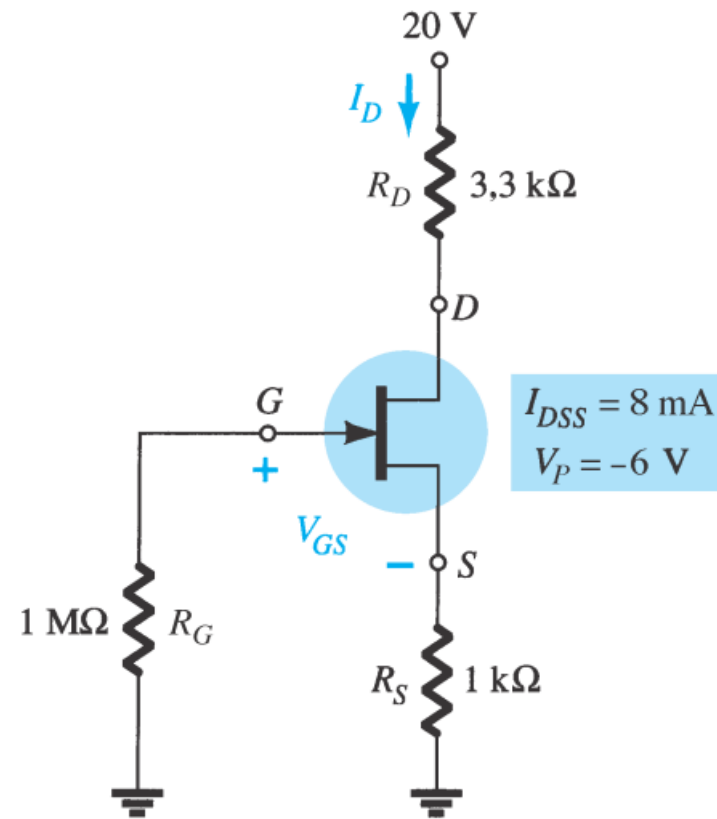
b) I_{DQ} ;

c) V_{DS} ;

d) V_D ;

e) V_G ;

f) V_S .



FET

(ATIVIDADES)

3- Determine os seguintes parâmetros para o circuito da Figura abaixo:

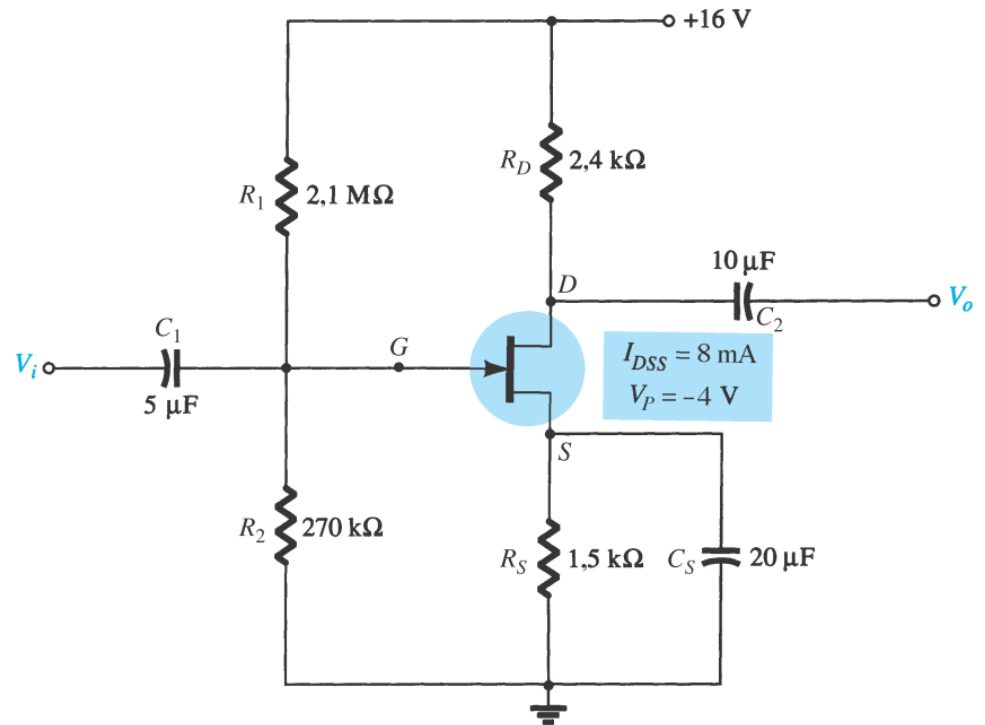
a) I_{DQ} e V_{GSQ} ;

b) V_D ;

c) V_S ;

d) V_{DS} ;

e) V_{DG} .



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.