

# LOM3221 – LABORATÓRIO DE ELETRÔNICA

## AULA 5

Prof. Dr. Emerson G. Melo

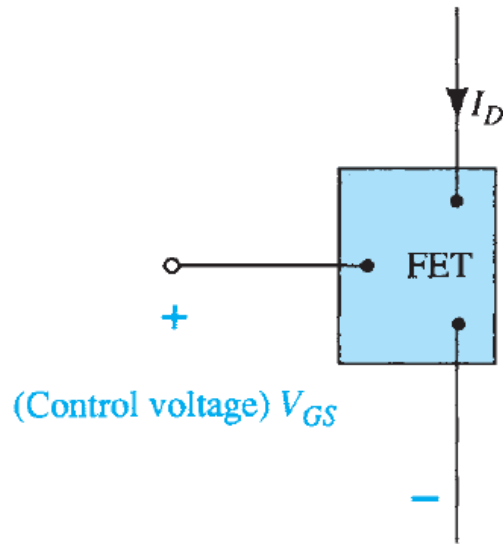
## ❑ Circuitos de Polarização do JFET e D-MOSFET;

- ❑ Polarização Fixa;
- ❑ Auto polarização;
- ❑ Polarização com Divisor de Tensão;

## ❑ Circuitos de Polarização do E-MOSFET;

- ❑ Polarização com Realimentação;
- ❑ Polarização com Divisor de Tensão;

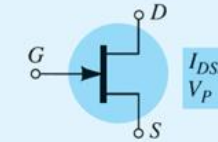
# Transistores de Efeito de Campo (FET)



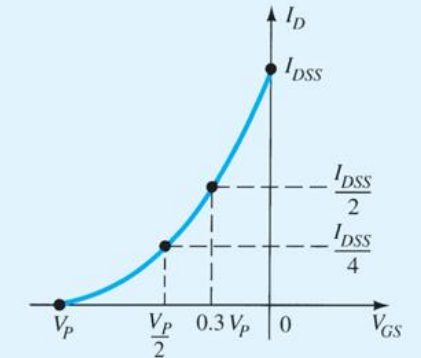
- Fonte de corrente controlada por tensão;
- Altas impedâncias de entrada ( $> M\Omega$ );
- Maior estabilidade quanto a variações de temperatura;
- Mais adequados para produção de circuitos integrados;
- Mais sensíveis a energia estática.

## JFET

$$I_G = 0 \text{ A}, I_D = I_S$$

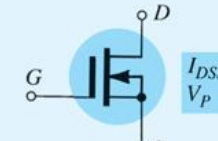


$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$$

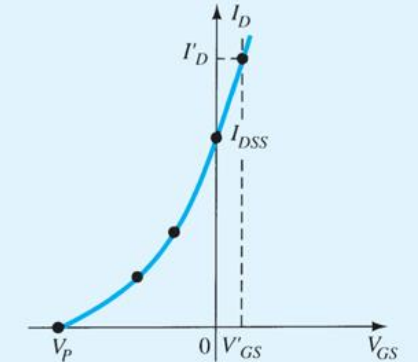


## D-MOSFET

$$I_G = 0 \text{ A}, I_D = I_S$$

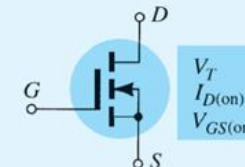


$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$$



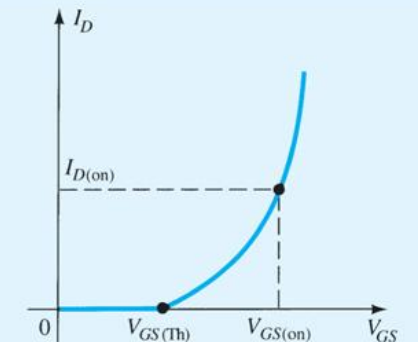
## E-MOSFET

$$I_G = 0 \text{ A}, I_D = I_S$$



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

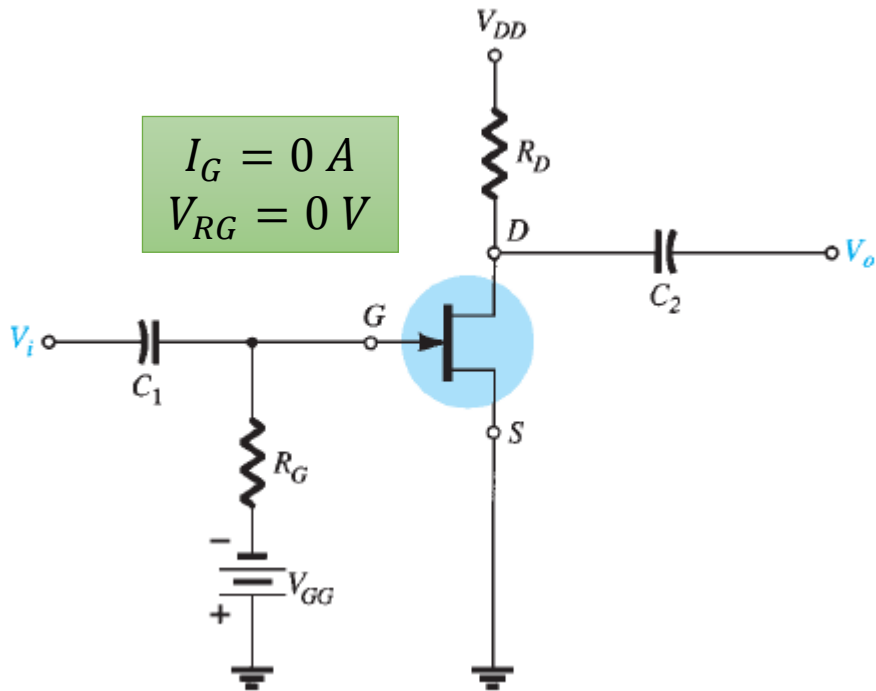
$$k = \frac{I_{D(on)}}{(V_{GS(on)} - V_{GS(Th)})^2}$$



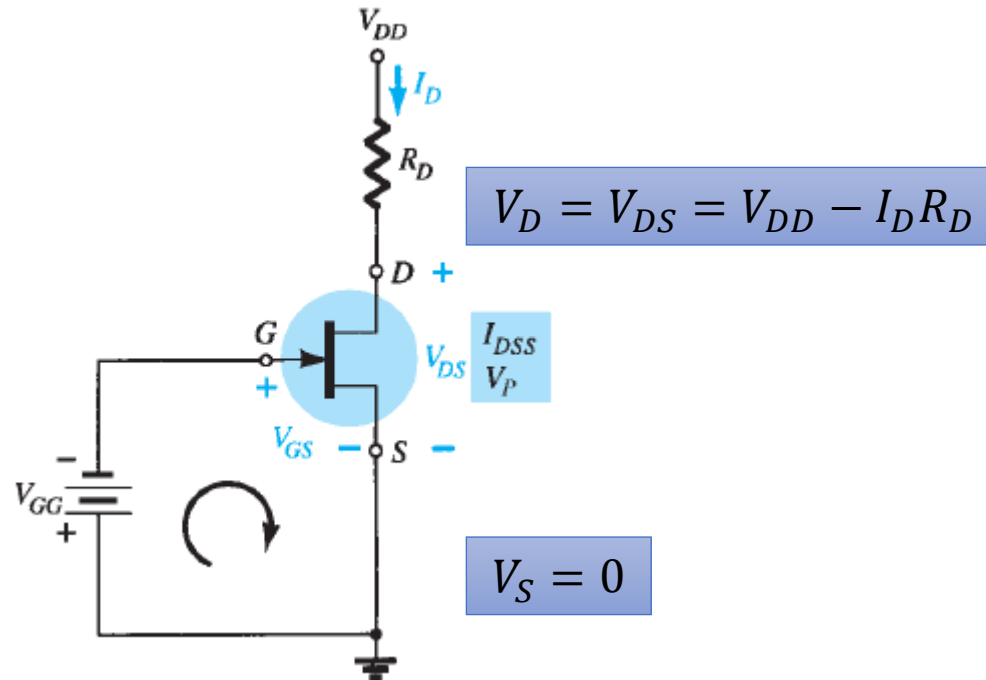
# Circuitos de Polarização do JFET e D-MOSFET

## ■ Polarização Fixa

Circuito completo

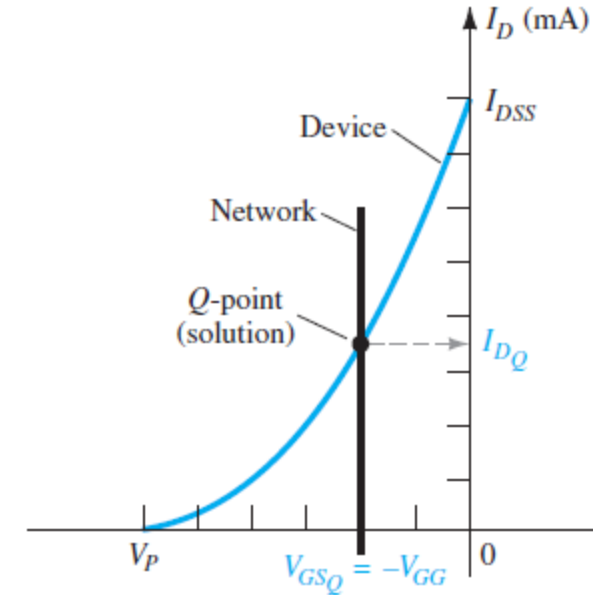


Circuito DC equivalente



$$V_{GS} + V_{GG} = 0 V$$

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

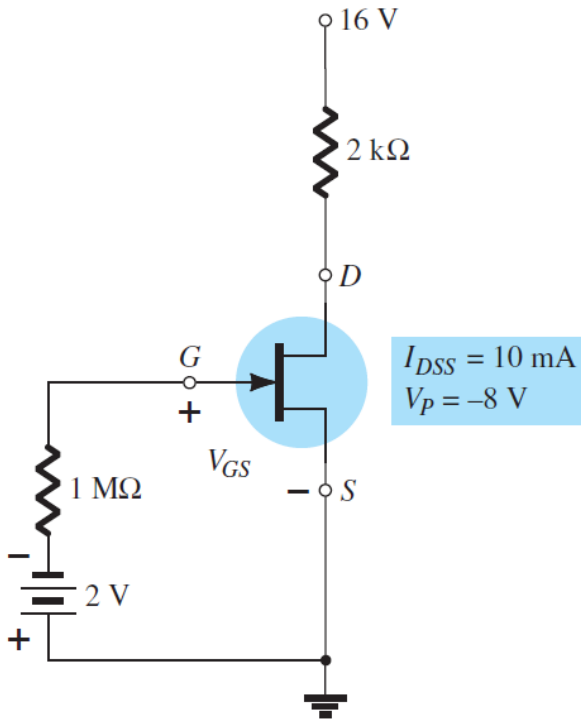


Função de Transferência

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

# Circuitos de Polarização do JFET e D-MOSFET

❑ Polarização Fixa: Determinar  $V_{GSQ}$ ,  $I_{DQ}$ ,  $V_{DS}$ ,  $V_D$ ,  $V_G$ ,  $V_S$ .



Abordagem Matemática:

$$V_{GSQ} = -V_{GG} = -2 \text{ V}$$

$$I_{DQ} = I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2 = 10 \text{ mA} \left( 1 - \frac{-2 \text{ V}}{-8 \text{ V}} \right)^2$$
$$= 10 \text{ mA} (1 - 0.25)^2 = 10 \text{ mA} (0.75)^2 = 10 \text{ mA} (0.5625)$$
$$= \mathbf{5.625 \text{ mA}}$$

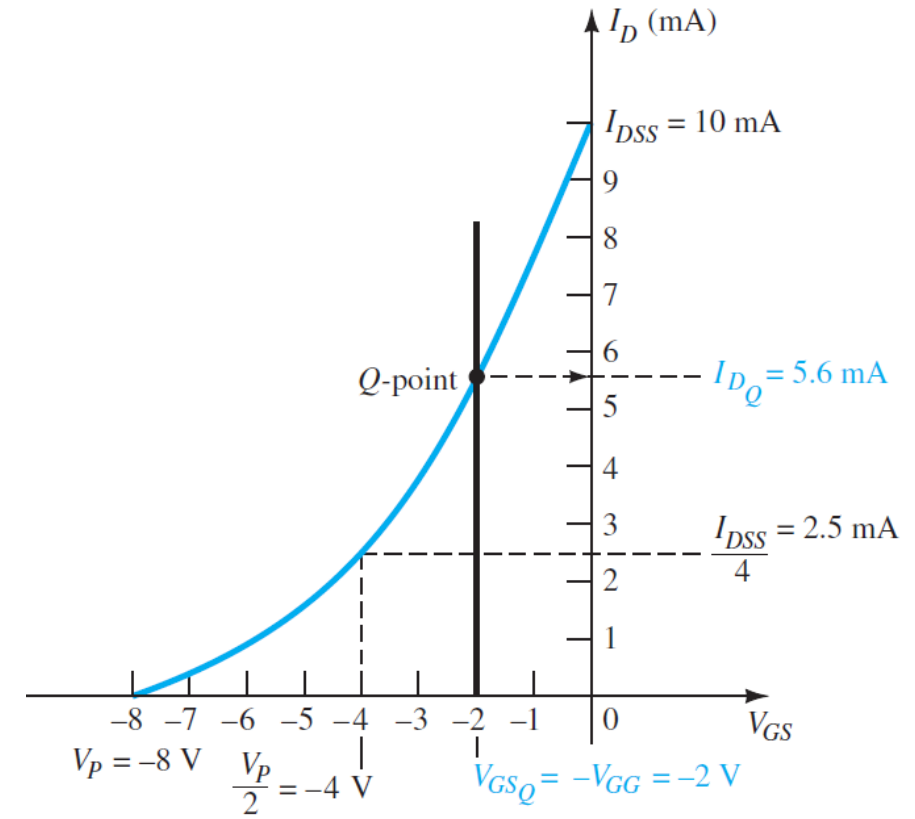
$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D = 16 \text{ V} - (5.625 \text{ mA})(2 \text{ k}\Omega)$$
$$= 16 \text{ V} - 11.25 \text{ V} = \mathbf{4.75 \text{ V}}$$

$$V_D = V_{DS} = \mathbf{4.75 \text{ V}}$$

$$V_G = V_{GS} = -2 \text{ V}$$

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

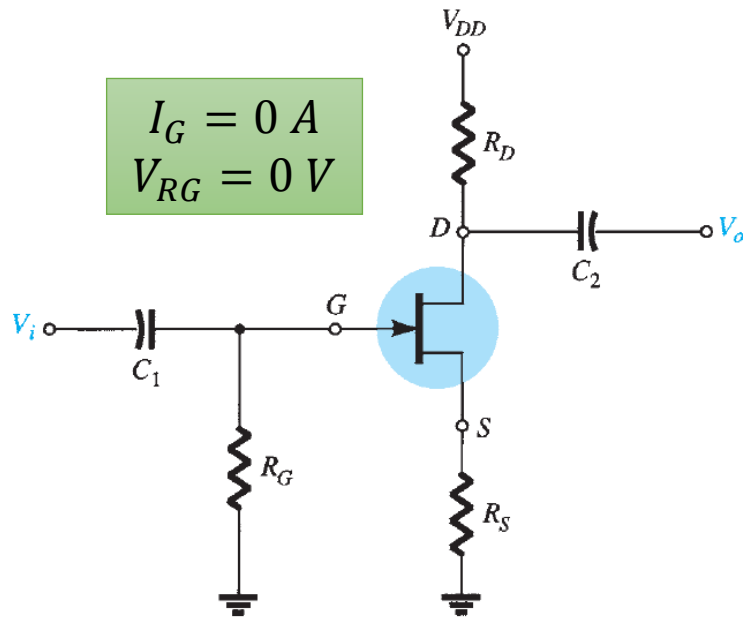
Abordagem Gráfica:



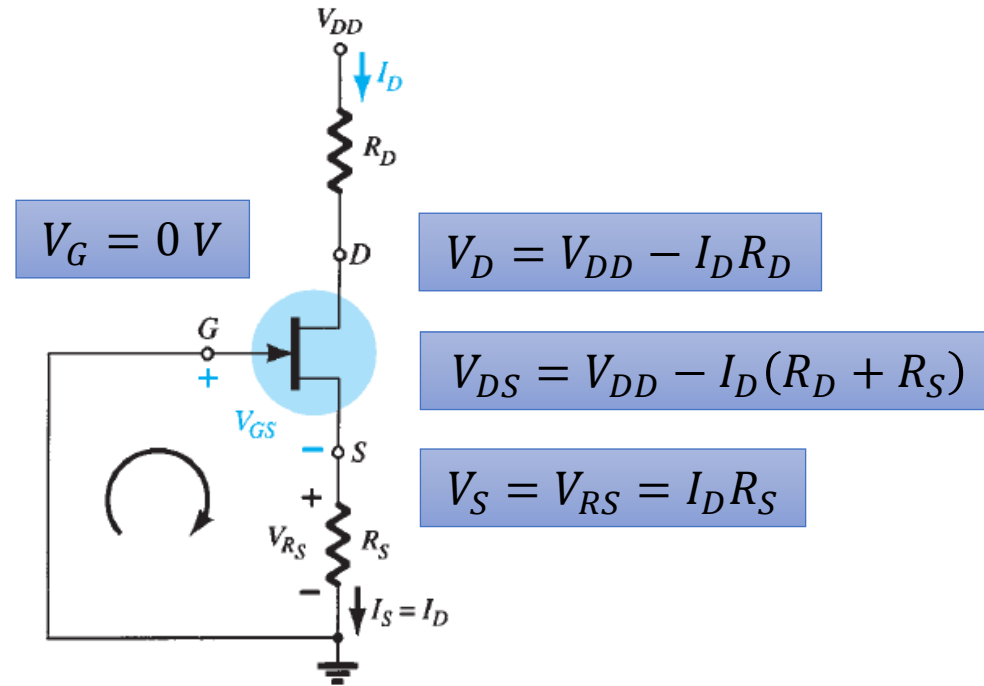
# Circuitos de Polarização do JFET e D-MOSFET

- Auto polarização: não necessita de fonte adicional para polarização da porta.

Circuito completo



Circuito DC equivalente

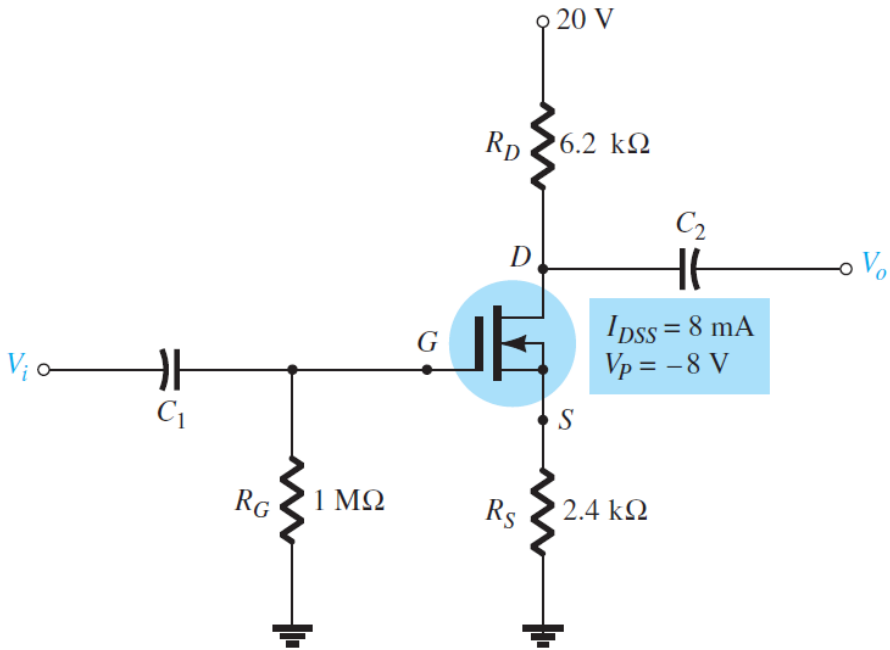


$$V_{GS} + V_{RS} = 0 V$$

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

# Circuitos de Polarização do JFET e D-MOSFET

Auto polarização: Determinar  $V_{GSQ}$ ,  $I_{DQ}$  e  $V_D$ .



Abordagem Gráfica:

Ponto 1:  $I_D = 0 A$

$$V_{GS} = -I_D R_S = -0 R_S = 0 V$$

Ponto 2:  $V_{GS} = -6 V$

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

$$I_D = -\frac{V_{GS}}{R_S} = \frac{6}{2400} = 2,5 mA$$

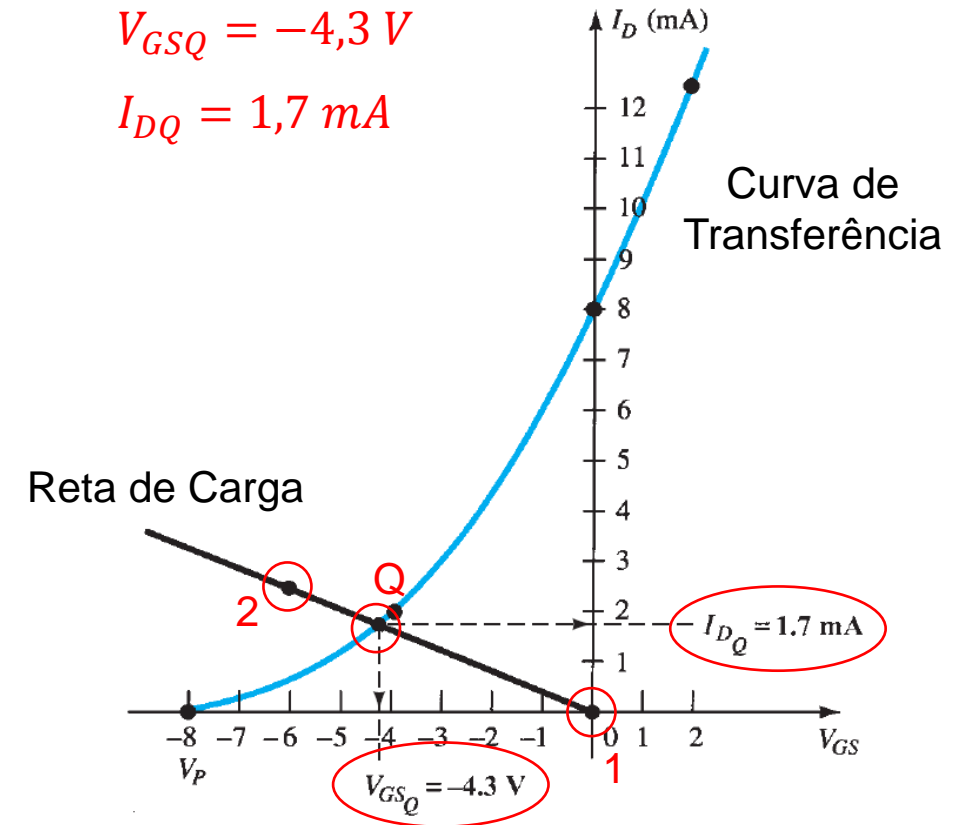
$$V_D = V_{DD} - I_D R_D$$

$$V_D = 20 - 1,7 \times 10^{-3} \times 6200$$

$$V_D = 9,46 V$$

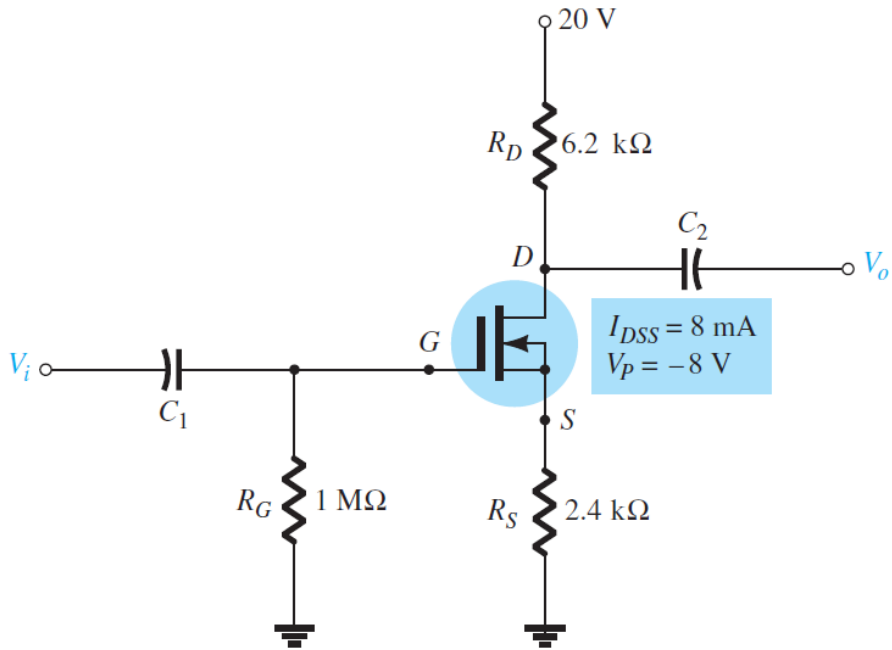
$$V_{GSQ} = -4,3 V$$

$$I_{DQ} = 1,7 mA$$



# Circuitos de Polarização do JFET e D-MOSFET

Auto polarização: Determinar  $V_{GSQ}$ ,  $I_{DQ}$  e  $V_D$  para o ponto de operação indicado.



Abordagem Matemática:

Circuito

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

Dispositivo

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

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

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

$$I_D^2 \left( \frac{R_S}{V_P} \right)^2 + I_D \left( -\frac{1}{I_{DSS}} + 2 \frac{R_S}{V_P} \right) + 1 = 0$$

a

b

c

$$aI_D^2 + bI_D + c = 0$$

$$90000I_D^2 - 725I_D + 1 = 0$$

Solução válida

$$I_{DQ} = 1,76 \text{ mA}$$

$$V_{GSQ} = -4,22 \text{ V}$$

Solução inválida!!!

$$I_{D2} = 6,28 \text{ mA}$$

$$V_{GSQ} = -15,07 \text{ V} < V_P$$

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

$$V_D = 20 - 1,76 \times 10^{-3} \times 6200$$

$$V_D = 9,09 \text{ V}$$

$$R_S = 2,4 \text{ k}\Omega$$

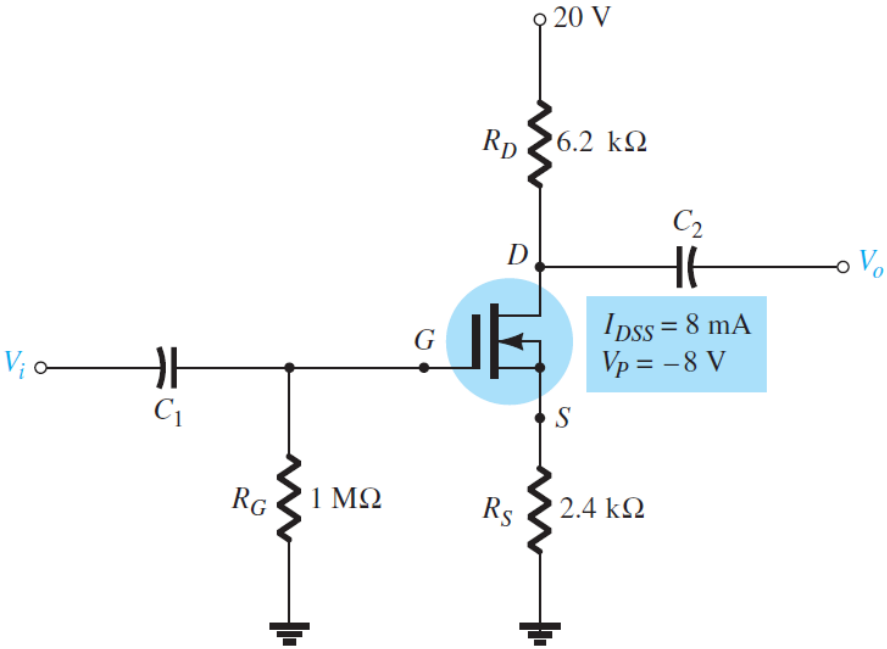
$$I_{DSS} = 8 \text{ mA}$$

$$V_P = -8 \text{ V}$$



# Circuitos de Polarização do JFET e D-MOSFET

Auto polarização: Determinar  $R_D$  e  $R_S$  para obter  $I_{DQ} = 1,76 \text{ mA}$ .



Abordagem Matemática:

Circuito

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

Dispositivo

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

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

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

$$R_S^2 \left( \frac{I_D}{V_P} \right)^2 + R_S \frac{2I_D}{V_P} - \frac{I_D}{I_{DSS}} + 1 = 0$$

a
b
c

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

$$V_D = 20 - 1,76 \times 10^{-3} \times 6200$$

$$V_D = 9,09 \text{ V}$$

$$I_D = 1,76 \text{ mA}$$

$$I_{DSS} = 8 \text{ mA}$$

$$V_P = -8 \text{ V}$$

$$aR_S^2 + bR_S + c = 0$$

$$90000I_D^2 - 725I_D + 1 = 0$$

Solução válida

$$R_S = 2,413 \text{ k}\Omega$$

$$V_{GSQ} = -4,25 \text{ V}$$

Solução inválida!!!

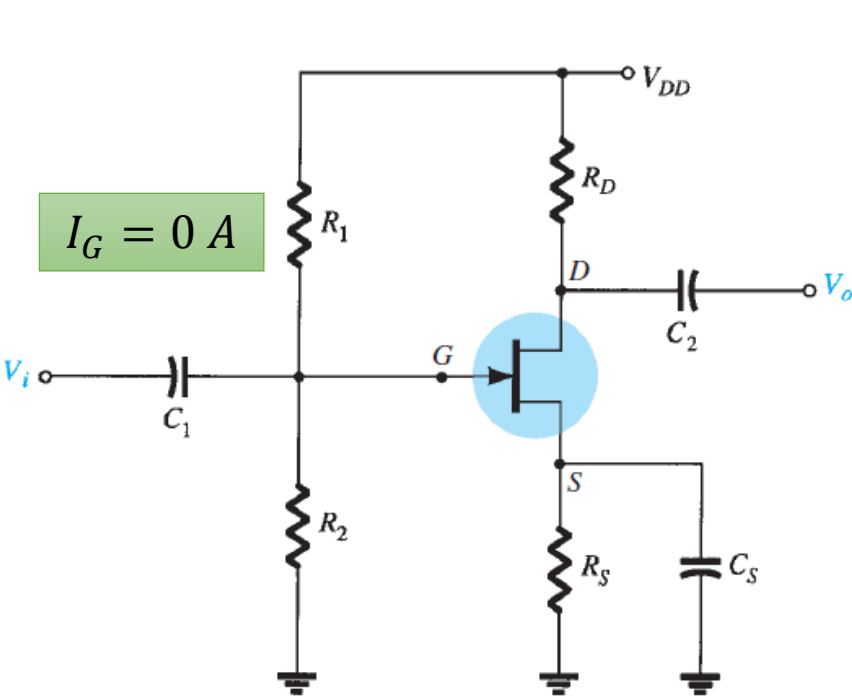
$$R_S = 6,677 \text{ k}\Omega$$

$$V_{GSQ} = -11,75 \text{ V} < V_P$$

# Circuitos de Polarização do JFET e D-MOSFET

## □ Polarização com divisor de tensão

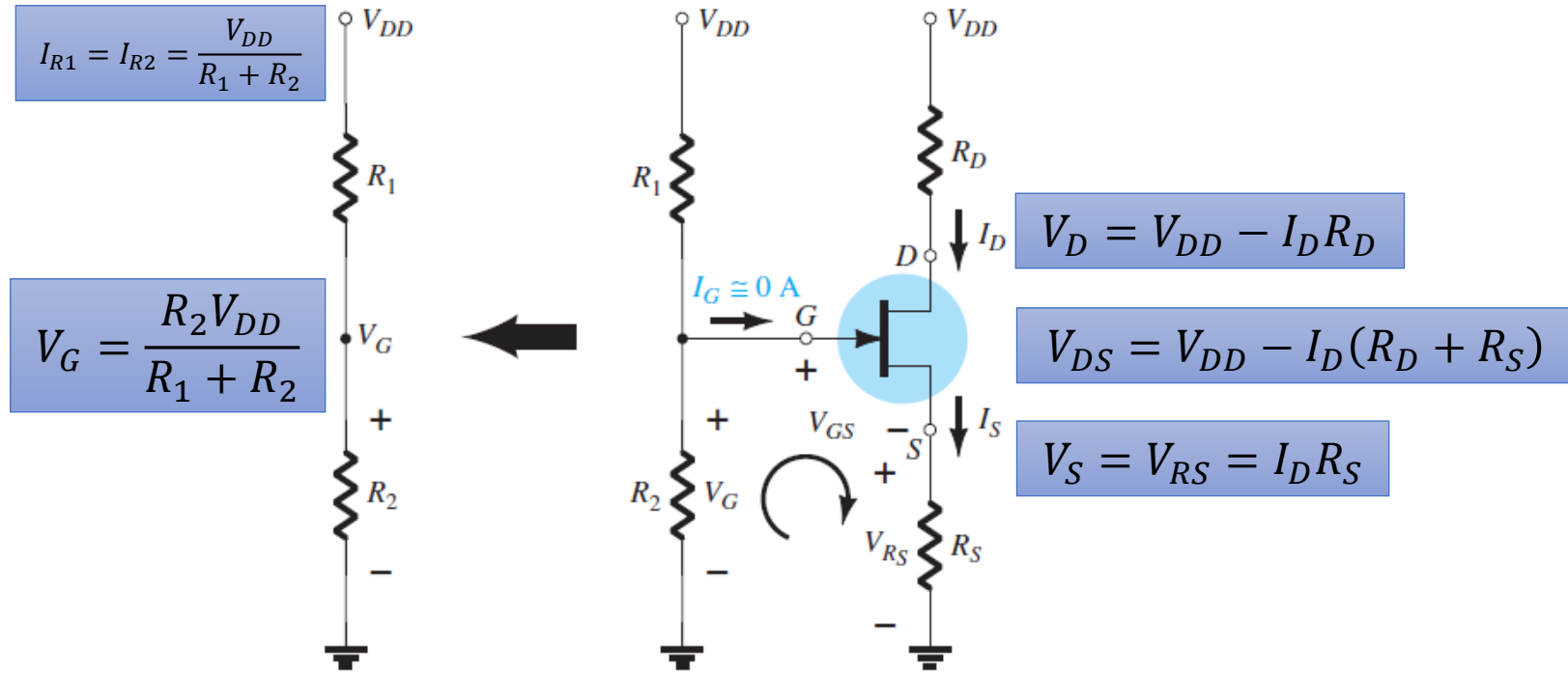
Circuito completo



$$I_{R1} = I_{R2} = \frac{V_{DD}}{R_1 + R_2}$$

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

Circuito DC equivalente



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

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

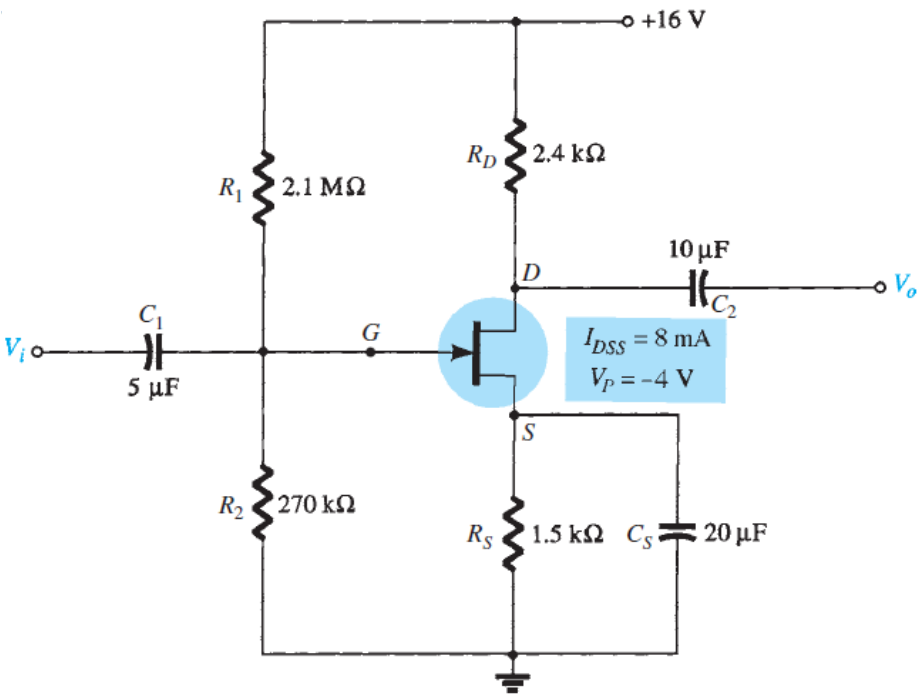
$$V_S = V_{RS} = I_D R_S$$

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

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

# Circuitos de Polarização do JFET e D-MOSFET

❑ Polarização com divisor de tensão: Determinar  $V_{GSQ}$ ,  $I_{DQ}$  e  $V_D$ .



Abordagem Gráfica:

Ponto 1:  $I_D = 0 A$

$$V_G = \frac{R_2 V_{DD}}{R_1 + R_2} = \frac{270 \text{ k}\Omega \times 16 \text{ V}}{270 \text{ k}\Omega + 2,1 \text{ M}\Omega} = 1,82 \text{ V}$$

$$V_{GS} = V_G - I_D R_S = V_G - 0 R_S = 1,82 \text{ V}$$

Ponto 2:  $V_{GS} = 0 V$

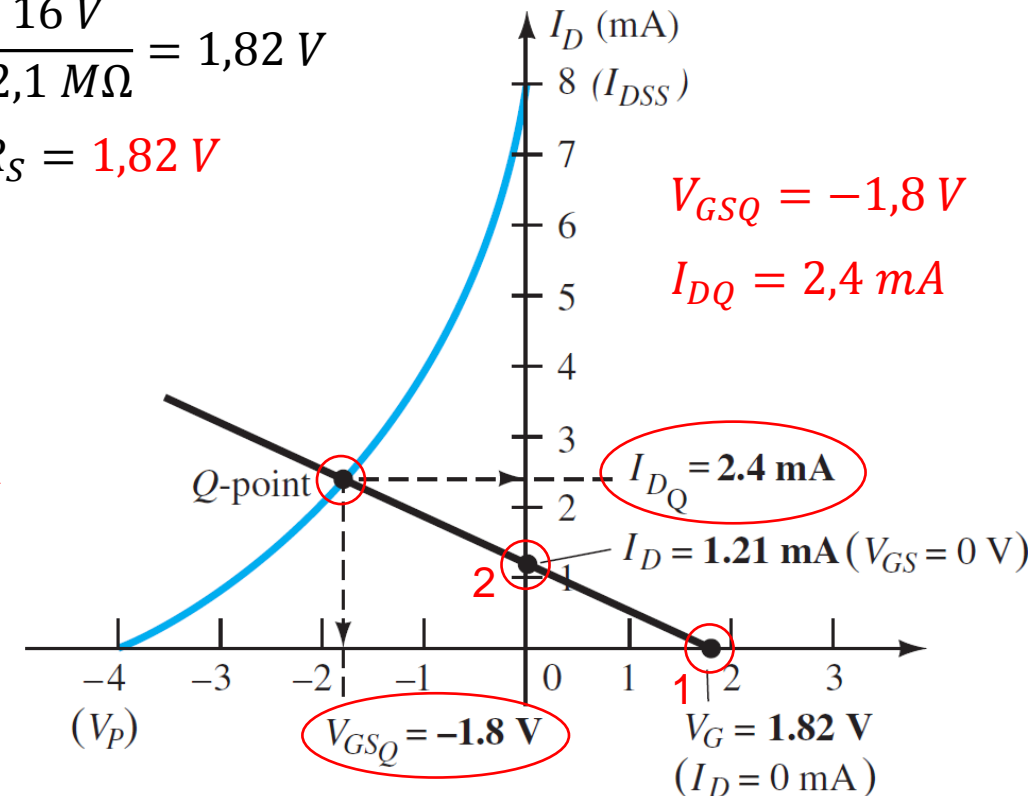
$$V_{GS} = V_G - I_D R_S$$

$$I_D = \frac{V_G}{R_S} = \frac{1,82}{1500} = 1,21 \text{ mA}$$

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

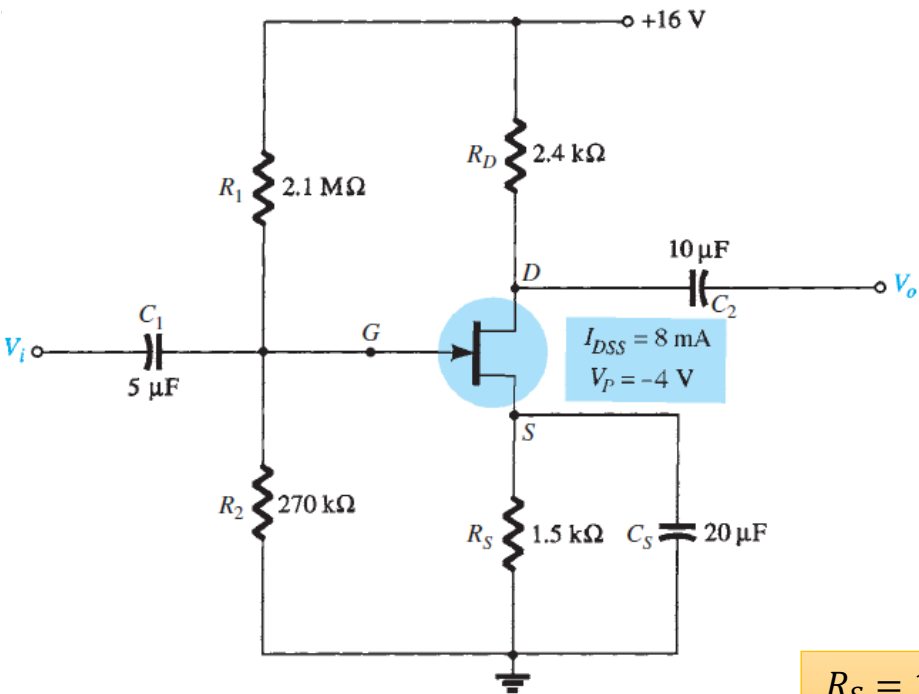
$$V_D = 16 - 2,4 \times 10^{-3} \times 2400$$

$$V_D = 10,24 \text{ V}$$



# Circuitos de Polarização do JFET e D-MOSFET

❑ Polarização com divisor de tensão: Determinar  $V_{GSQ}$ ,  $I_{DQ}$  e  $V_D$ .



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

$$V_D = 16 - 2,41 \times 10^{-3} \times 2400$$

$$V_D = 10,21 \text{ V}$$

$$R_S = 1,5 \text{ k}\Omega$$

$$I_{DSS} = 8 \text{ mA}$$

$$V_P = -4 \text{ V}$$

$$V_G = 1,82 \text{ V}$$

Abordagem Matemática:

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

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

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

$$I_D^2 \left( \frac{R_S}{V_P} \right)^2 + I_D \left( -\frac{1}{I_{DSS}} + 2 \frac{R_S}{V_P} - 2 \frac{V_G R_S}{V_P^2} \right) + 1 - 2 \frac{V_G}{V_P} + \left( \frac{V_G}{V_P} \right)^2 = 0$$

a

b

c

$$aI_D^2 + bI_D + c = 0$$

Solução válida

$$I_{DQ} = 2,41 \text{ mA}$$

$$V_{GSQ} = -1,79 \text{ V}$$

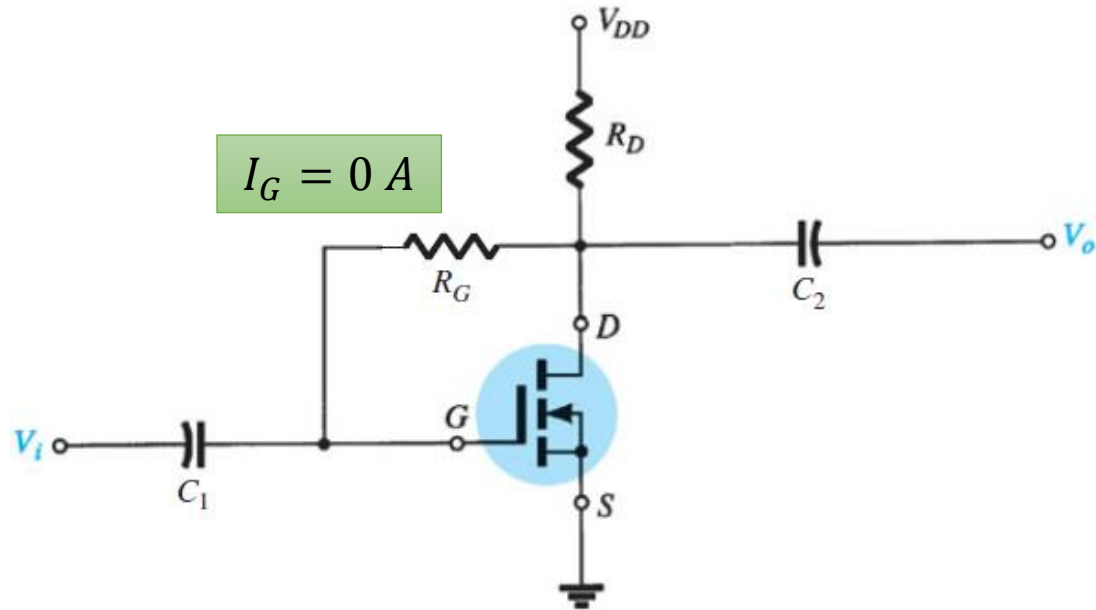
Solução inválida!!!

$$I_{D2} = 6,23 \text{ mA}$$

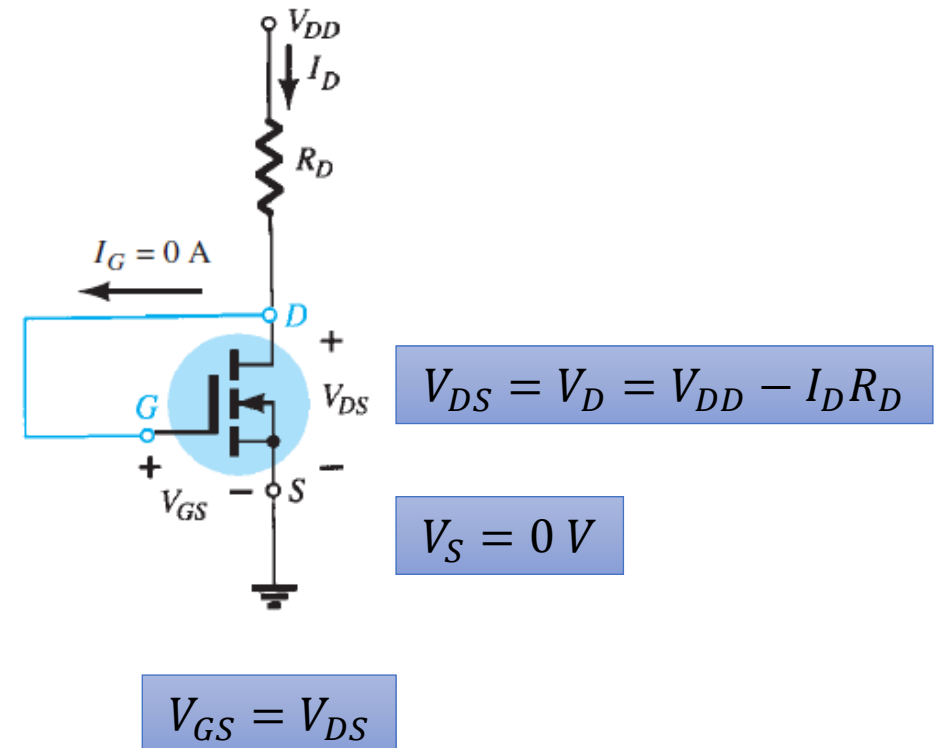
$$V_{GSQ} = -7,52 \text{ V} < V_P$$

## □ Polarização com Realimentação

Circuito completo

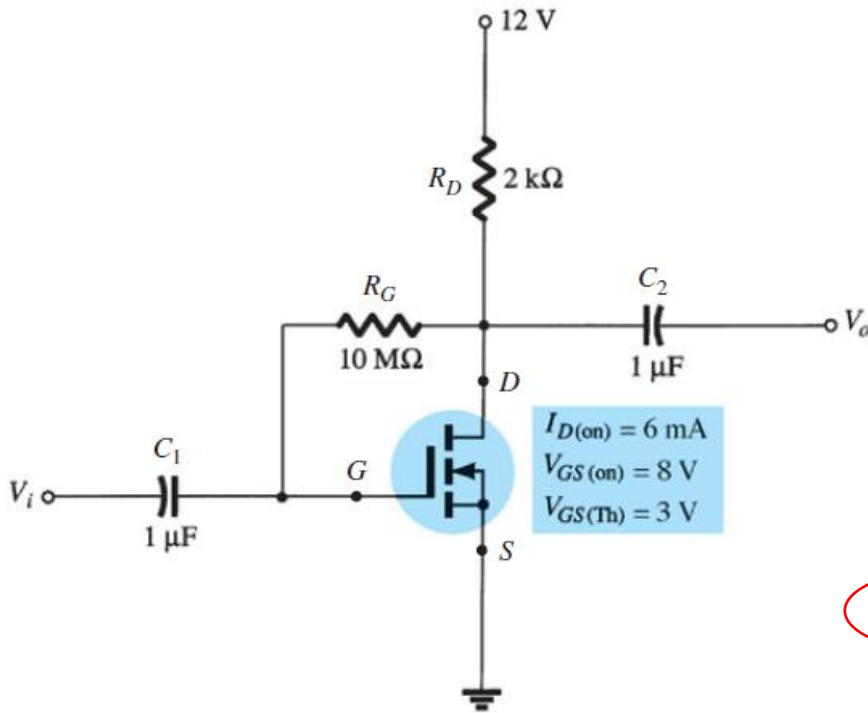


Circuito DC equivalente



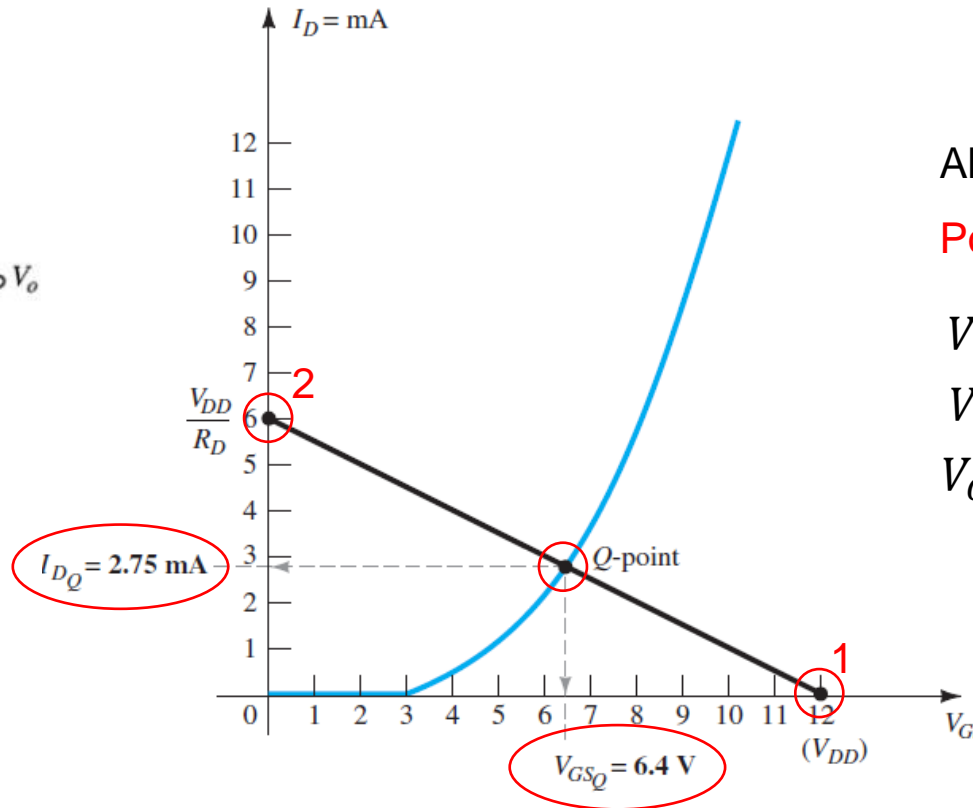
# Circuitos de Polarização do E-MOSFET

❑ Polarização com Realimentação : Determinar  $V_{GSQ}$  e  $I_{DQ}$ .



$$V_{GSQ} = 6,40 V$$

$$I_{DQ} = 2,75 mA$$



Abordagem Gráfica:

Ponto 1:  $I_D = 0 A$

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

$$V_{GS} = V_{DS} = V_{DD} - 0 R_D$$

$$V_{GS} = V_{DS} = 12 V$$

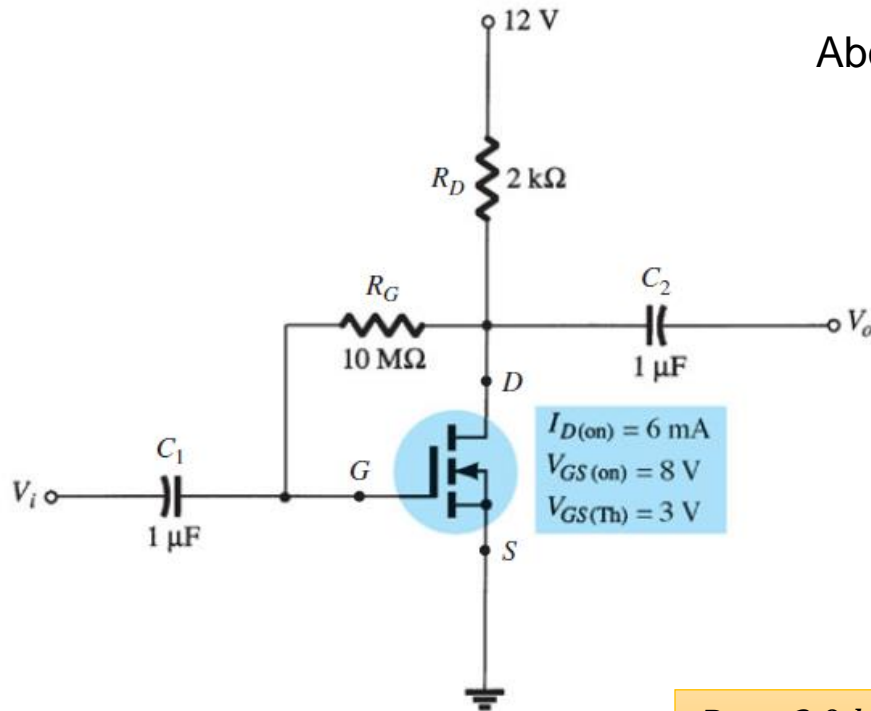
Ponto 2:  $V_{GS} = 0 V$

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

$$I_D = \frac{V_{DD}}{R_D} = \frac{12}{2000} = 6,0 mA$$

# Circuitos de Polarização do E-MOSFET

❑ Polarização com Realimentação : Determinar  $V_{GSQ}$  e  $I_{DQ}$ .



Abordagem Matemática:

Circuito

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

Dispositivo

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

$$k = \frac{I_{D(ON)}}{(V_{GS(ON)} - V_T)^2}$$

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

$$\frac{I_D}{k} = -2V_{DD}I_D R_D - 2V_{DD}V_T + 2I_D R_D V_T + V_{DD}^2 + (I_D R_D)^2 + V_T^2$$

$$I_D^2 \underbrace{R_D^2}_a + I_D \underbrace{\left(-\frac{1}{k} - 2V_{DD}R_D + 2R_D V_T\right)}_b - 2V_{DD}V_T + V_{DD}^2 + V_T^2 = 0 \quad c$$

Solução válida

$$I_{DQ} = 2,79 \text{ mA}$$

$$V_{GSQ} = 6,42 \text{ V}$$

Solução inválida!!!

$$I_{D2} = 7,24 \text{ mA}$$

$$V_{GSQ} = -2,48 \text{ V} < V_T$$

$$aI_D^2 + bI_D + c = 0$$

$$k = \frac{0,006}{(8 - 3)^2} = 0,00024 \text{ A/V}^2$$

$$R_D = 2,0 \text{ k}\Omega$$

$$V_{DD} = 12 \text{ V}$$

$$V_T = 3 \text{ V}$$

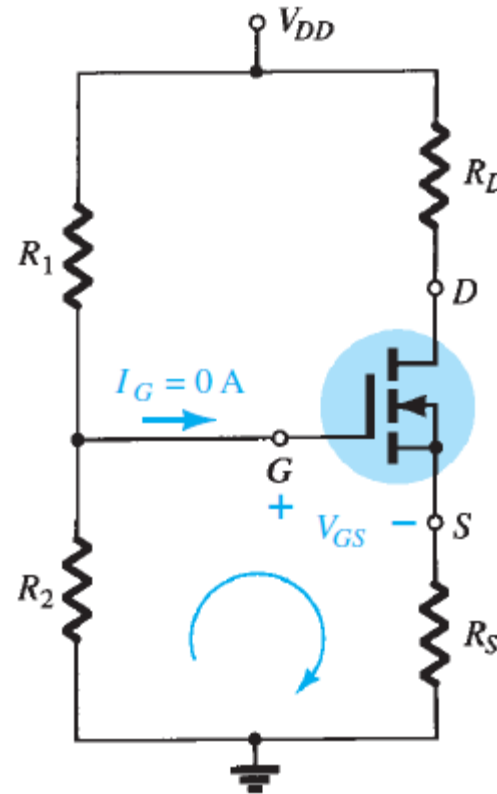
$I_{D(on)} = 6 \text{ mA}$   
 $V_{GS(on)} = 8 \text{ V}$   
 $V_{GS(th)} = 3 \text{ V}$

# Circuitos de Polarização do E-MOSFET

## □ Polarização com divisor de tensão

$$I_{R1} = I_{R2} = \frac{V_{DD}}{R_1 + R_2}$$

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



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

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

$$V_S = V_{RS} = I_D R_S$$

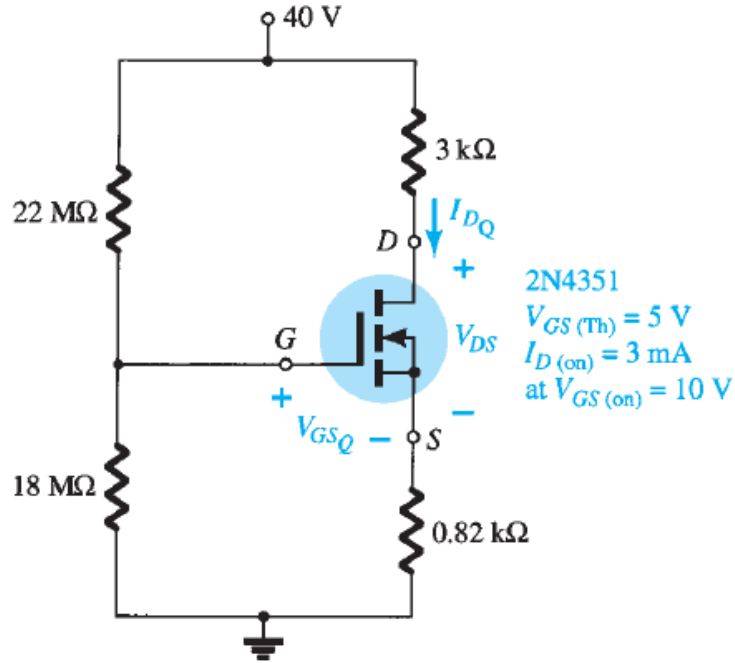
$$V_{GS} + V_{RS} - V_G = 0 \text{ V}$$

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



# Circuitos de Polarização do E-MOSFET

❑ Polarização com divisor de tensão: Determinar  $V_{GSQ}$ ,  $I_{DQ}$  e  $V_D$ .



Abordagem Gráfica:

Ponto 1:  $I_D = 0 A$

$$V_G = \frac{R_2 V_{DD}}{R_1 + R_2} = \frac{18 M\Omega \times 40 V}{22 M\Omega + 18 M\Omega} = 18 V$$

$$V_{GS} = V_G - I_D R_S = V_G - 0 R_S = 18 V$$

Ponto 2:  $V_{GS} = 0 V$

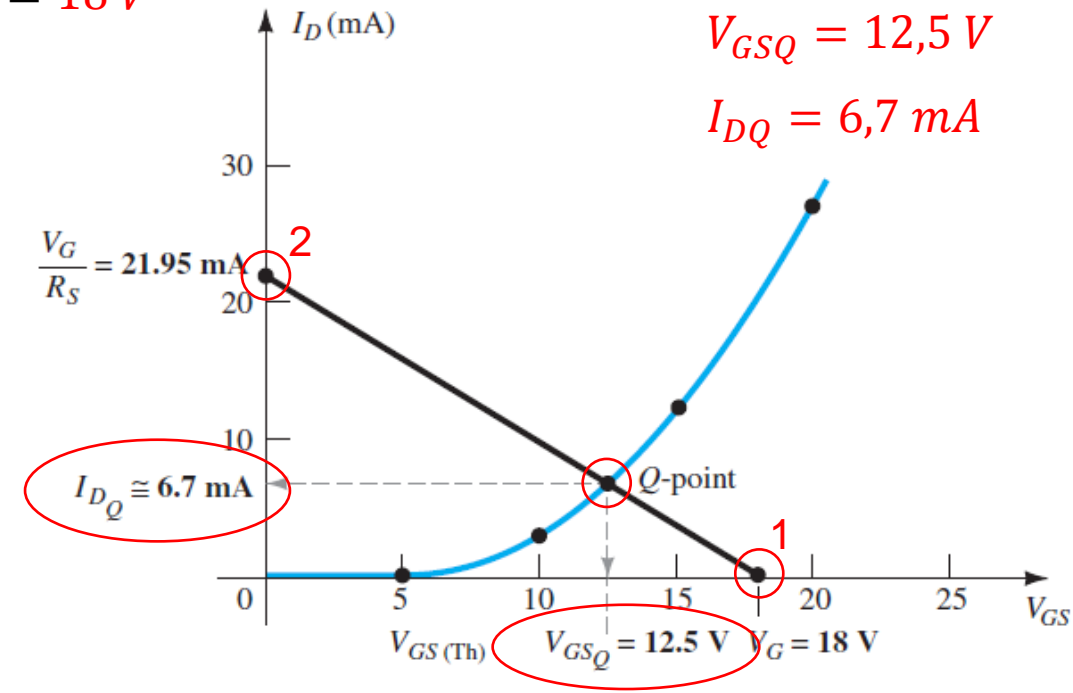
$$V_{GS} = V_G - I_D R_S$$

$$I_D = \frac{V_G}{R_S} = \frac{18}{820} = 21,95 mA$$

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

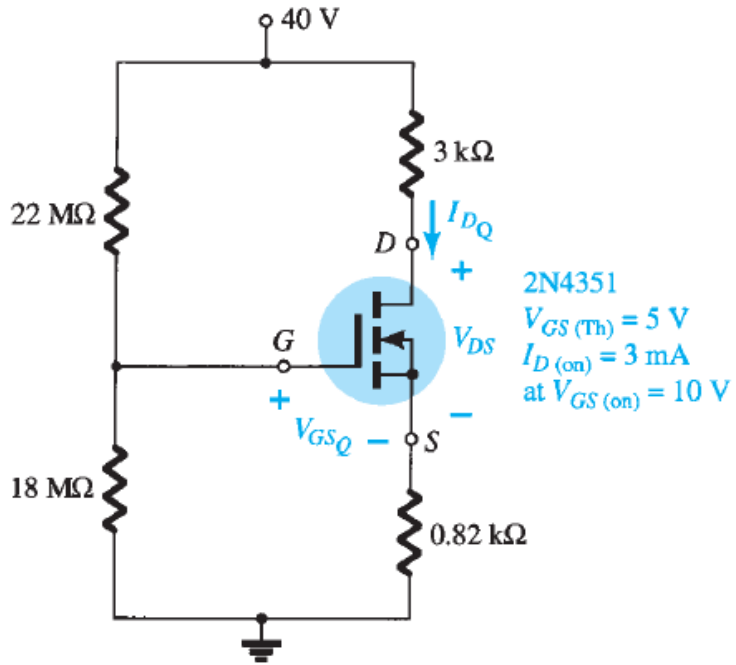
$$V_D = 40 - 6,7 \times 10^{-3} \times 3000$$

$$V_D = 19,90 V$$



# Circuitos de Polarização do E-MOSFET

❑ Polarização com divisor de tensão: Determinar  $V_{GSQ}$ ,  $I_{DQ}$  e  $V_{DS}$ .



Abordagem Matemática:

Circuito

Dispositivo

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

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

$$I_D = k(V_G - I_D R_S - V_T)^2$$

$$\frac{I_D}{k} = -2V_G I_D R_S - 2V_G V_T + 2I_D R_S V_T + V_G^2 + (I_D R_S)^2 + V_T^2$$

$$I_D^2 R_S^2 + I_D \left( -\frac{1}{k} - 2V_G R_S + 2R_S V_T \right) - 2V_G V_T + V_G^2 + V_T^2 = 0$$

a

b

c

$$k = \frac{0,003}{(10 - 5)^2} = 0,00012 \text{ A/V}^2$$

$$R_S = 820 \Omega$$

$$V_G = 18 \text{ V}$$

$$V_T = 5 \text{ V}$$

$$aI_D^2 + bI_D + c = 0$$

Solução válida

$$I_{DQ} = 6,72 \text{ mA}$$

$$V_{GSQ} = 12,48 \text{ V}$$

Solução inválida!!!

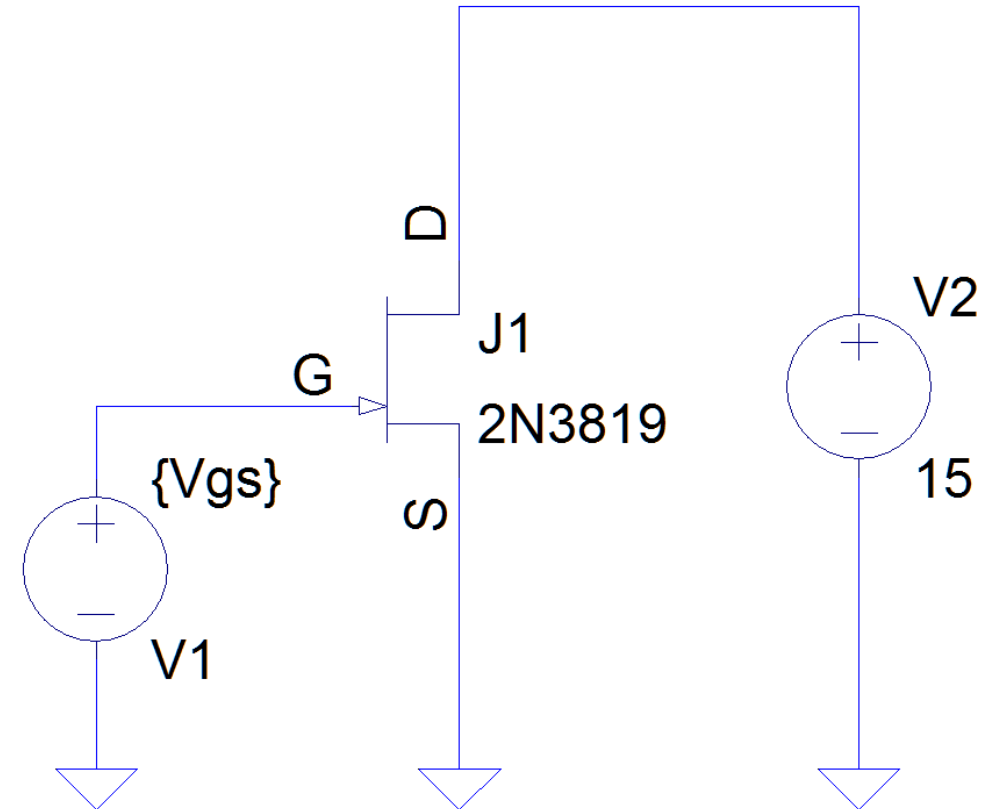
$$I_{D2} = 37,37 \text{ mA}$$

$$V_{GSQ} = -12,64 \text{ V} < V_T$$

# Experimento 1: Curva de Transferência

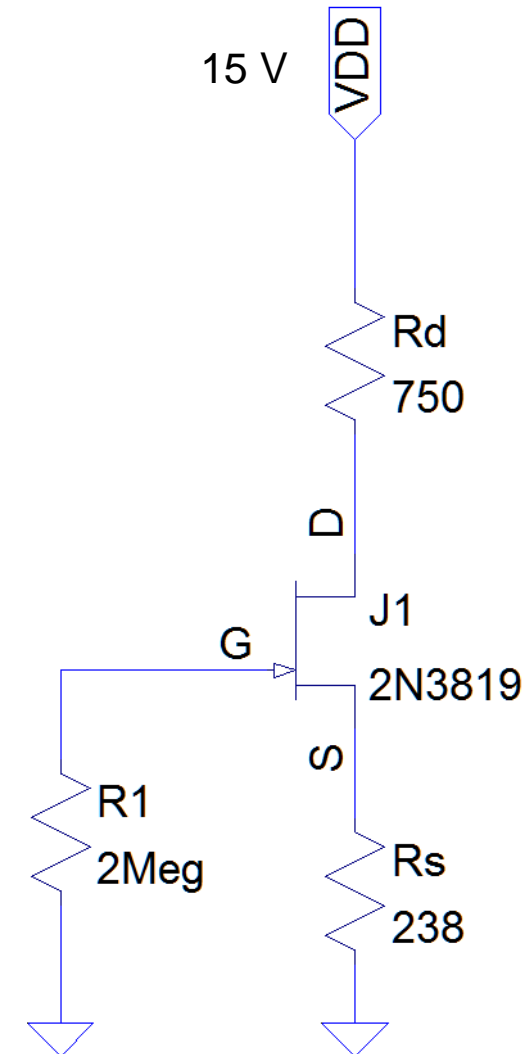
- ❑ **Objetivo:** Caracterizar o JFET 2N3819 através dos parâmetros  $V_P$  ( $V_{GS(off)}$ ) e  $I_{DSS}$ .
- ❑ A) Construir o circuito ao lado no LTspice e configurar a simulação conforme indicado nos comandos SPICE para variar a tensão  $V_{GS}$  entre -6 e 0 V.
- ❑ B) Rodar a simulação e plotar a corrente de dreno.
- ❑ C) A partir da curva de transferência dada por  $I_D \times V_{GS}$  obter os valores de  $V_P$  ( $V_{GS(off)}$ ) e  $I_{DSS}$ .
- ❑ D) Salve a curva de transferência: Clique com o botão esquerdo do mouse sobre o gráfico, vá em "**File-Export data as text**", selecione " **$I_D(J1)$** ", dê um nome para o arquivo e clique em "**OK**".

```
.param Vgs 0
.step param Vgs -6 0 0.1
.op
```



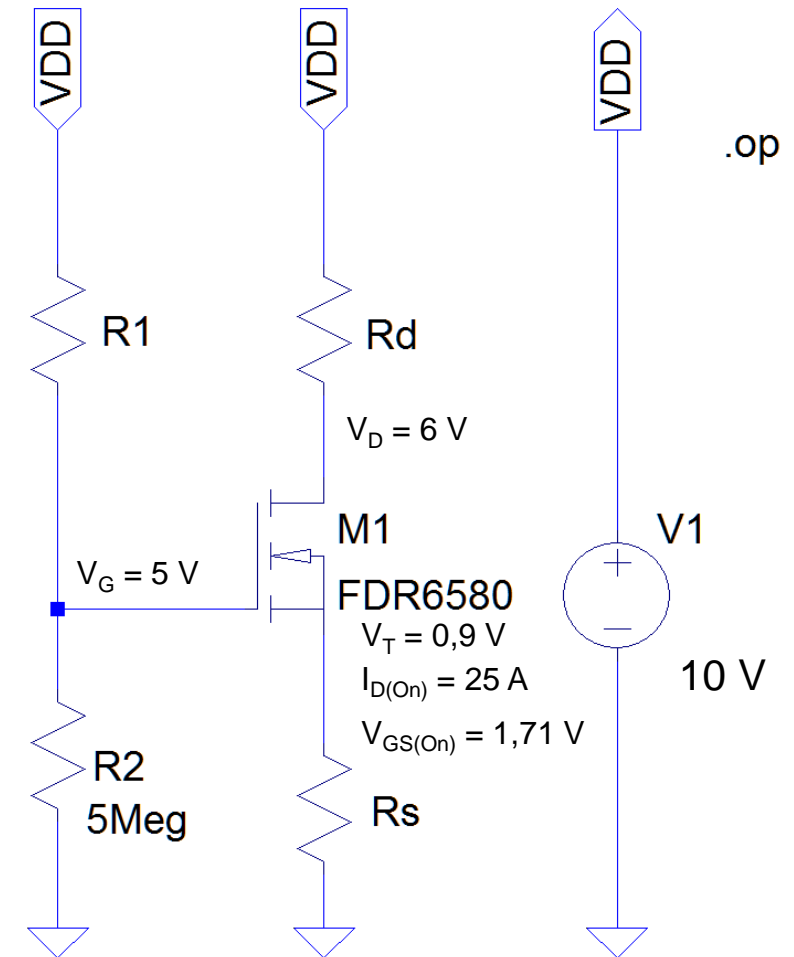
# Experimento 2: Análise do Ponto de Operação

- ❑ **Objetivo:** Definir o ponto de operação (Q) do circuito:  $I_{DQ}$  e  $V_{GSQ}$ .
- ❑ A) Utilizando seu software de preferência (Python, Matlab, Excel, Origin, Octave, etc), plote a curva de transferência do JFET 2N3819 obtida no *Experimento 1* e defina GRAFICAMENTE o ponto Q do circuito ao lado através dos valores de  $I_{DQ}$  e  $V_{GSQ}$ .
- ❑ B) Compare os valores obtidos com os resultados obtidos de forma analítica e através da simulação do ponto de operação no LTspice.
- ❑ C) Calcule o valor de  $V_D$ .



# Experimento 3: Projeto

- ❑ **Objetivo:** Projetar um circuito de polarização por divisor de tensão para um D-MOSFET.
- ❑ A) Considerando o circuito ao lado e os dados fornecidos, calcular os valores de  $R_S$ ,  $R_D$ , e  $R_1$  para  $I_{DQ} = 1$  A.
- ❑ B) Compare os valores obtidos com os resultados obtidos através da simulação do ponto de operação no LTspice.



- ❑ Boylestad, Robert L.; Nashelsky, Louis “Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos”, 6 ed., Rio de Janeiro, LTC (1998)
- ❑ Boylestad, Robert L.; Nashelsky, Louis “Electronic Devices and Circuit Theory”, 11 ed., Boston, Pearson (2013).