

Aula 9

Polarização do FET

EECP0001 - Eletrônica Aplicada
Kauane Paixão, Rhuã Yuri e Wesley Barbosa

Sumário

- MOSFETs tipo intensificação;
- Circuitos combinados;
- Projeto;
- Análise de defeitos;
- FET de canal p;
- Curva universal de polarização para o JFET;

MOSFETs tipo intensificação

Para o MOSFET tipo intensificação de canal n, a corrente de dreno é igual a zero para valores de tensão porta-fonte menores do que o valor de limiar $V_{GS(Th)}$, como mostra a Figura 7.36. Para valores de V_{GS} maiores do que $V_{GS(Th)}$, a corrente de dreno é definida por:

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

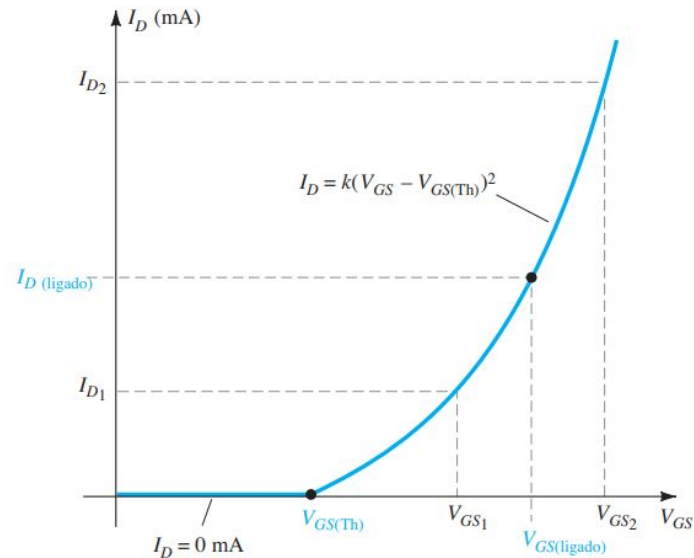


Figura 7.36 Curva característica de transferência de um MOSFET tipo intensificação de canal n.

Para completar a curva, a constante k da Equação 7.33 deve ser determinada a partir dos valores obtidos das folhas de dados substituídos na Equação 7.33 e resolvendo para k , como indicado a seguir:

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

$$k = \frac{I_{D(ligado)}}{(V_{GS(ligado)} - V_{GS(Th)})^2} \quad (7.34)$$

Uma vez que k esteja definido, podemos determinar outros valores de I_D para valores selecionados de V_{GS} .

Configuração de polarização com realimentação

Existe uma conexão direta entre dreno e porta, o que resulta em:

O resistor R_G oferece um valor apropriadamente alto de tensão à porta do MOSFET para “ligá-lo”. Uma vez que $I_G = 0$ mA e $V_{RG} = 0$ V, o circuito CC equivalente tem a forma mostrada na Figura 7.38

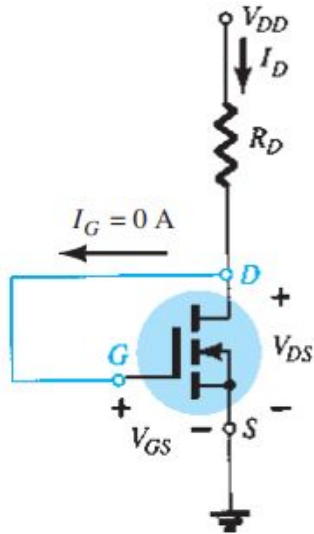


Figura 7.38 Equivalente CC do circuito da Figura 7.37.

$$V_D = V_G$$
$$V_{DS} = V_{GS}$$

Para o circuito de saída,

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

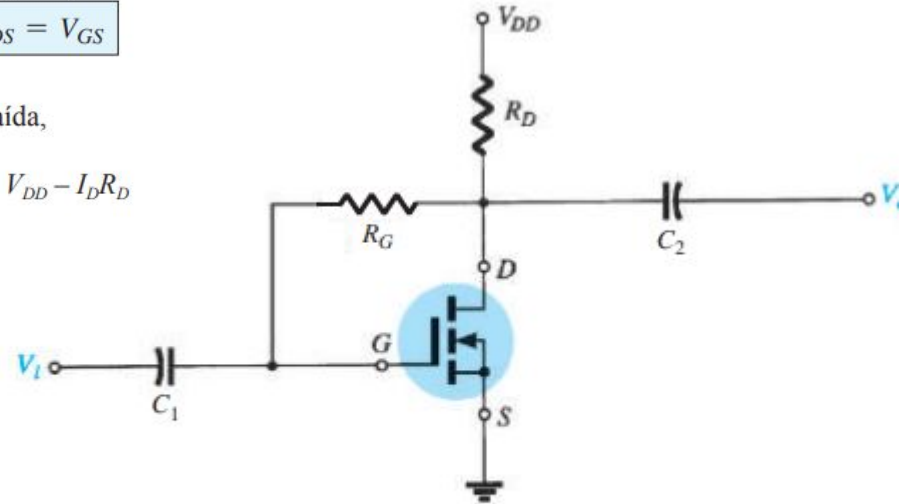


Figura 7.37 Configuração de polarização com realimentação.

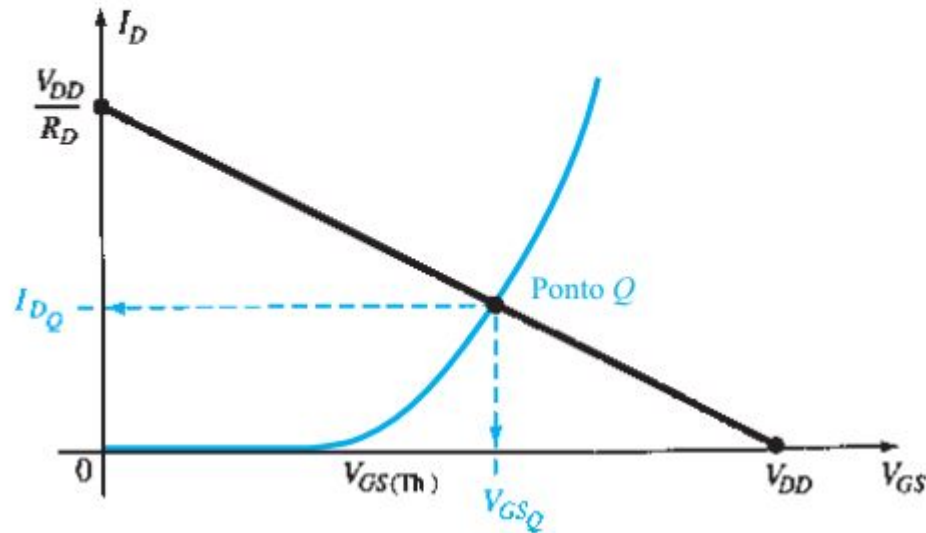
Uma vez que a Equação 7.36 representa uma linha reta, podemos empregar o mesmo procedimento descrito anteriormente para determinar os dois pontos que definem o traçado no gráfico. Substituindo $I_D = 0$ mA na Equação 7.36, obtemos:

Os gráficos definidos pelas equações 7.33 e 7.36 aparecem na Figura 7.39 com o ponto de operação resultante.

$$V_{GS} = V_{DD} \big|_{I_D=0 \text{ mA}} \quad (7.37)$$

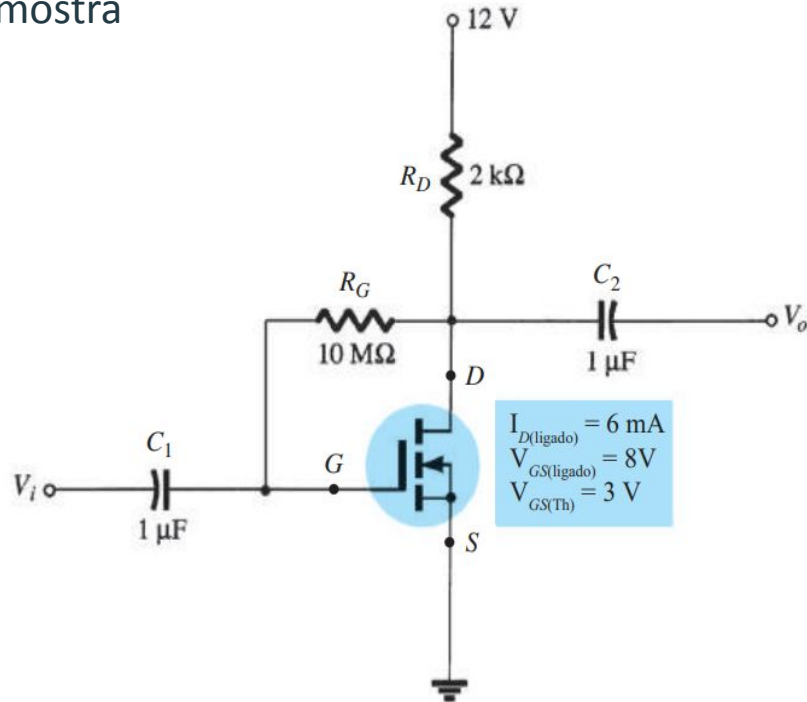
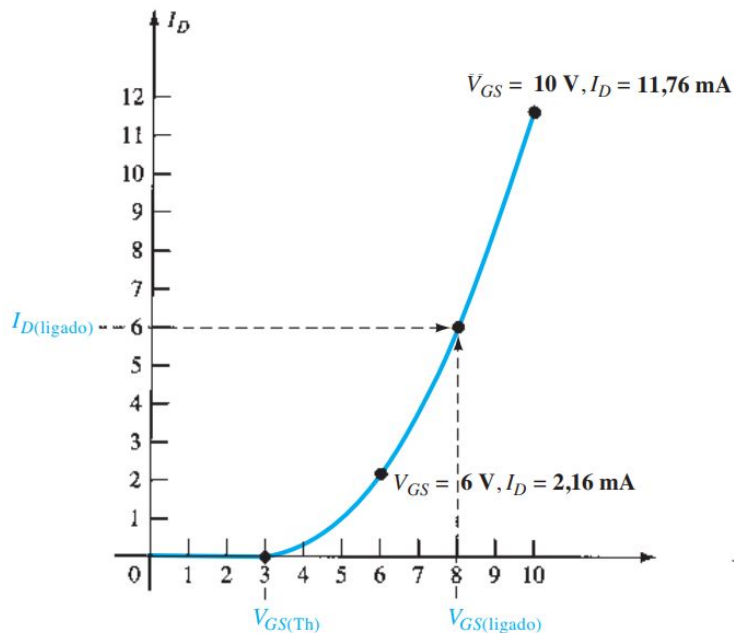
Substituindo $V_{GS} = 0$ V na Equação 7.36, obtemos:

$$I_D = \frac{V_{DD}}{R_D} \big|_{V_{GS}=0 \text{ V}} \quad (7.38)$$



EXEMPLO 7.10 Determine I_{DQ} e V_{DSQ} para o MOSFET tipo intensificação da Figura 7.40.

Solução: Gráfico da curva de transferência. Dois pontos são definidos imediatamente, como mostra a Figura 7.41.



Resolvendo para k, temos:

$$\begin{aligned}
 k &= \frac{I_{D(\text{ligado})}}{(V_{GS(\text{ligado})} - V_{GS(\text{Th})})^2} \\
 &= \frac{6 \text{ mA}}{(8 \text{ V} - 3 \text{ V})^2} = \frac{6 \times 10^{-3}}{25} \text{ A/V}^2 \\
 &= \mathbf{0,24 \times 10^{-3} \text{ A/V}^2}
 \end{aligned}$$

Para $V_{GS} = 6 \text{ V}$ (entre 3 e 8 V):

$$\begin{aligned}
 I_D &= 0,24 \times 10^{-3} (6 \text{ V} - 3 \text{ V})^2 = 0,24 \times 10^{-3} (9) \\
 &= 2,16 \text{ mA}
 \end{aligned}$$

como mostra a Figura 7.41. Para $V_{GS} = 10 \text{ V}$ (um pouco maior do que $V_{GS(\text{Th})}$),

$$\begin{aligned}
 I_D &= 0,24 \times 10^{-3} (10 \text{ V} - 3 \text{ V})^2 = 0,24 \times 10^{-3} (49) \\
 &= 11,76 \text{ mA}
 \end{aligned}$$

Para a reta de polarização do circuito

$$\begin{aligned}
 V_{GS} &= V_{DD} - I_D R_D \\
 &= 12 \text{ V} - I_D (2 \text{ k}\Omega)
 \end{aligned}$$

Equação 7.37: $V_{GS} = V_{DD} = 12 \text{ V} |_{I_D=0 \text{ mA}}$

Equação 7.38: $I_D = \frac{V_{DD}}{R_D} = \frac{12 \text{ V}}{2 \text{ k}\Omega} = 6 \text{ mA} |_{V_{GS}=0 \text{ V}}$

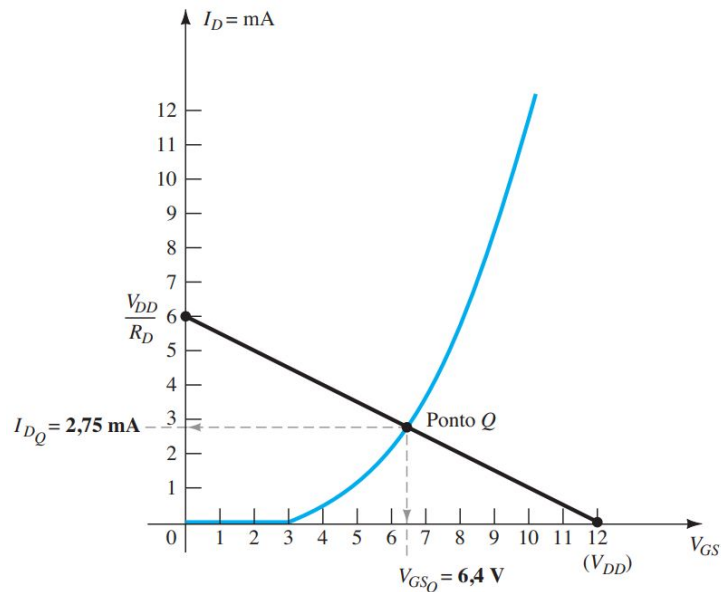
A reta de polarização resultante aparece na Figura 7.42.

No ponto de operação,

e

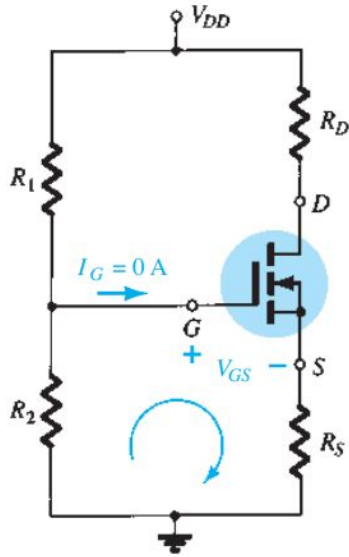
$$\begin{aligned}
 I_{DQ} &= \mathbf{2,75 \text{ mA}} \\
 V_{GSQ} &= \mathbf{6,4 \text{ V}} \\
 V_{DSQ} &= V_{GSQ} = \mathbf{6,4 \text{ V}}
 \end{aligned}$$

com



Configuração de polarização por divisor de tensão

A Figura 7.43 mostra outra configuração de polarização muito utilizada para o MOSFET tipo intensificação. O fato de que $I_G = 0$ mA resulta na equação a seguir para V_{GG} , derivada da aplicação da regra do divisor de tensão:



$$V_G = \frac{R_2 V_{DD}}{R_1 + R_2} \quad (7.39)$$

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

$$V_{GS} = V_G - I_D R_S \quad (7.40)$$

Para a seção de saída,

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

e

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

ou

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D (R_S + R_D) \quad (7.41)$$

Figura 7.43 Configuração de polarização por divisor de tensão para um MOSFET intensificação de canal n .

EXEMPLO 7.11 Determine I_{DQ} , V_{GSQ} e V_{DS} para o circuito da **Figura 7.4**

Solução: Circuito Equação 7.39:

Circuito

Equação 7.39:

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

Equação 7.40: $V_{GS} = V_G - I_D R_S = 18 \text{ V} - I_D(0,82 \text{ k}\Omega)$

Quando $I_D = 0 \text{ mA}$,

$$V_{GS} = 18 \text{ V} - (0 \text{ mA})(0,82 \text{ k}\Omega) = 18 \text{ V}$$

como mostra a Figura 7.45. Quando $V_{GS} = 0 \text{ V}$,

$$V_{GS} = 18 \text{ V} - I_D(0,82 \text{ k}\Omega)$$

$$0 = 18 \text{ V} - I_D(0,82 \text{ k}\Omega)$$

$$I_D = \frac{18 \text{ V}}{0,82 \text{ k}\Omega} = 21,95 \text{ mA}$$

como mostra a Figura 7.45.

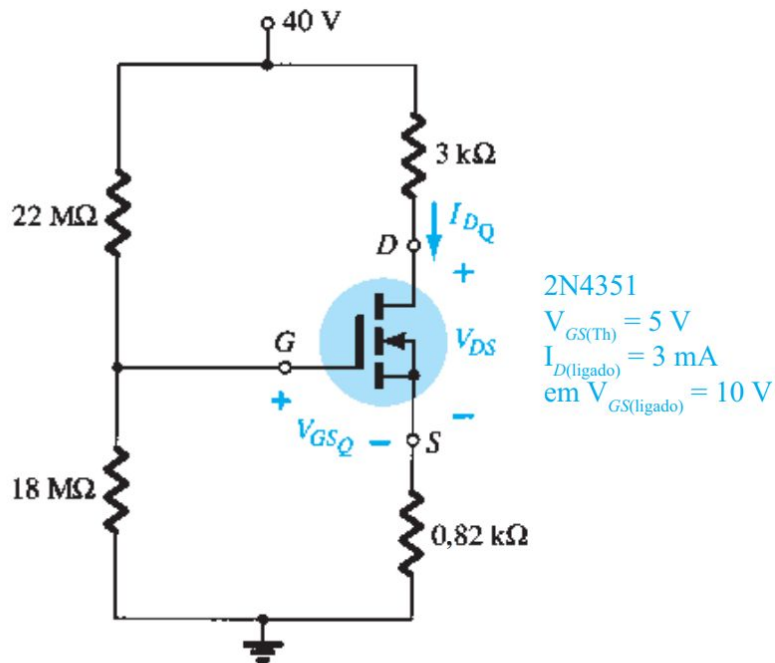


Figura 7.44 Exemplo 7.11.

Dispositivo

$V_{GS(Th)} = 5 \text{ V}$, $I_{D(ligado)} = 3 \text{ mA}$ com $V_{GS(ligado)} = 10 \text{ V}$

Equação 7.34:

$$k = \frac{I_{D(ligado)}}{(V_{GS(ligado)} - V_{GS(Th)})^2}$$
$$= \frac{3 \text{ mA}}{(10 \text{ V} - 5 \text{ V})^2} = 0,12 \times 10^{-3} \text{ A/V}^2$$

e

$$I_D = k(V_{GS} - V_{GS(Th)})^2$$
$$= 0,12 \times 10^{-3} (V_{GS} - 5)^2$$

que é traçado no mesmo gráfico (Figura 7.45). Da Figura 7.45,

$$I_{DQ} \cong 6,7 \text{ mA}$$
$$V_{GSQ} = 12,5 \text{ V}$$

Equação 7.41:

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D(R_S + R_D)$$
$$= 40 \text{ V} - (6,7 \text{ mA})(0,82 \text{ k}\Omega + 3,0 \text{ k}\Omega)$$
$$= 40 \text{ V} - 25,6 \text{ V}$$
$$= 14,4 \text{ V}$$

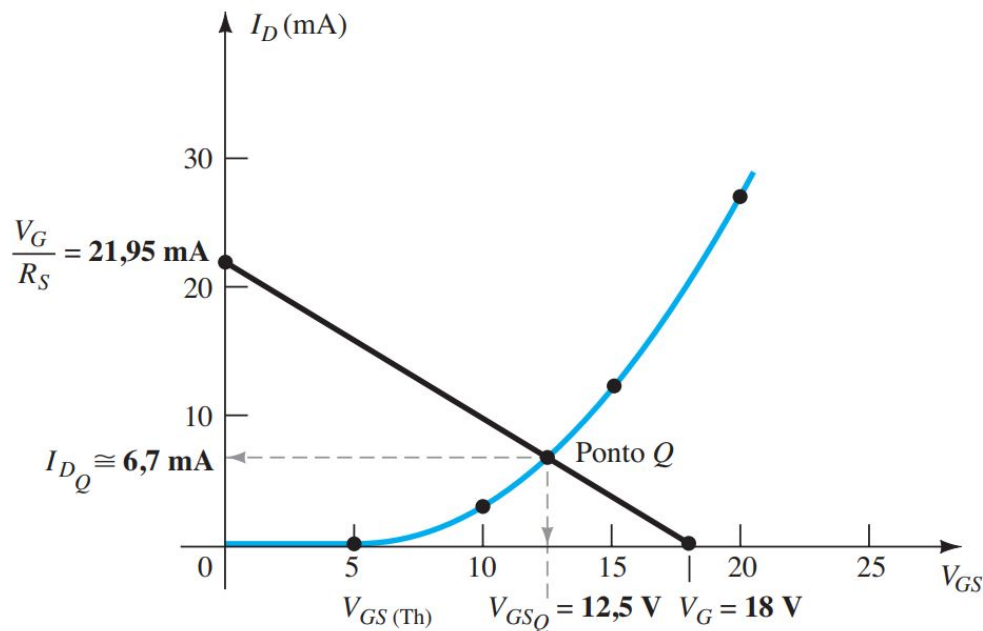


Figura 7.45 Determinação do ponto Q para o circuito do Exemplo 7.11.

TABELA-RESUMO

Tabela 7.1 Configurações de polarização para FET.

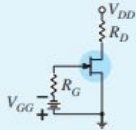
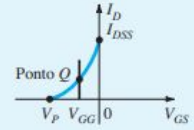
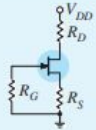
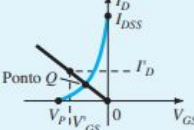
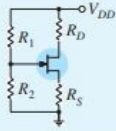
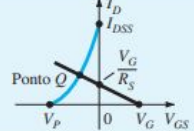
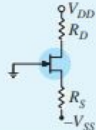
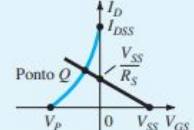
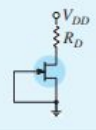
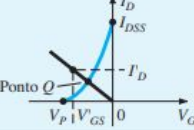
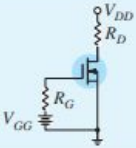
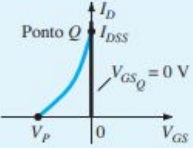
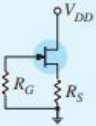
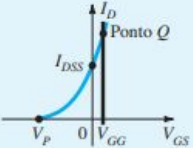
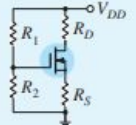
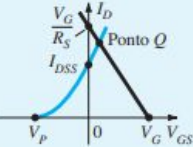
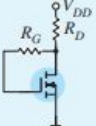
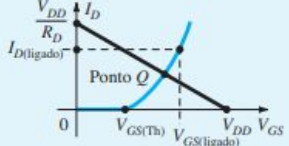
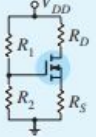
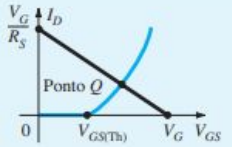
Tipo	Configuração	Equações pertinentes	Solução gráfica
JFET com polarização fixa		$V_{GS_Q} = -V_{GG}$ $V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D$	
JFET com autopolarização		$V_{GS} = -I_D R_S$ $V_{DS} = V_{DD} - I_D (R_D + R_S)$	
JFET com polarização por divisor de tensão		$V_G = \frac{R_2 V_{DD}}{R_1 + R_2}$ $V_{GS} = V_G - I_D R_S$ $V_{DS} = V_{DD} - I_D (R_D + R_S)$	
JFET porta-comum		$V_{GS} = V_{SS} - I_D R_S$ $V_{DS} = V_{DD} + V_{SS} - I_D (R_D + R_S)$	
JFET ($R_D = 0 \Omega$)		$V_{GS} = -I_D R_S$ $V_D = V_{DD}$ $V_S = I_D R_S$ $V_{DS} = V_{DD} - I_S R_S$	

TABELA-RESUMO

JFET caso especial ($V_{GS_Q} = 0 \text{ V}$)		$V_{GS_Q} = 0 \text{ V}$ $I_{D_Q} = I_{DSS}$	
MOSFET tipo depleção com polarização fixa (e MESFETs)		$V_{GS_Q} = +V_{GG}$ $V_{DS} = V_{DD} - I_{D_Q} R_S$	
MOSFET tipo depleção com polarização por divisor de tensão (e MESFETs)		$V_G = \frac{R_2 V_{DD}}{R_1 + R_2}$ $V_{GS} = V_G - I_S R_S$ $V_{DS} = V_{DD} - I_D (R_D + R_S)$	
MOSFET tipo intensificação com configuração de polarização com realimentação (e MESFETs)		$V_{GS} = V_{DS}$ $V_{GS} = V_{DD} - I_D R_D$	
MOSFET tipo intensificação com polarização por divisor de tensão (e MESFETs)		$V_G = \frac{R_2 V_{DD}}{R_1 + R_2}$ $V_{GS} = V_G - I_D R_S$	

Circuitos combinados

- Analisar circuitos com os dois tipos de dispositivo.
- Para essa análise é necessário apenas que seja abordado primeiro o dispositivo que fornece uma tensão ou um valor de corrente em um terminal.
- A porta estará aberta para calcularmos os outros parâmetros de circuito e nos concentrarmos nas incógnitas restantes.

EXEMPLO 7.13 Determine V_D para o circuito da Figura 7.48. Solução: Nesse caso, não há um método óbvio para a determinação dos valores de tensão e corrente para a configuração do transistor. Entretanto, observando o JFET autopolarizado, podemos montar uma equação para V_{GS} e obter o ponto quiescente resultante por meio de técnicas gráficas

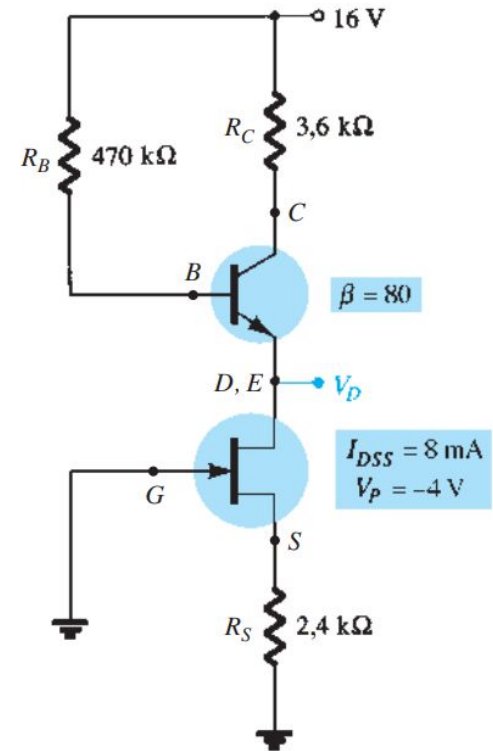


Figura 7.48 Exemplo 7.13.

Isto, é:

$$V_{GS} = -I_D R_S = -I_D (2,4 \text{ k}\Omega)$$

Figura 7.48 Exemplo 7.13.

resultando na reta de autopolarização da Figura 7.49, que estabelece um ponto quiescente em:

$$V_{GSQ} = -2,4 \text{ V}$$

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

Para o transistor,

$$I_E \cong I_C = I_D = 1 \text{ mA}$$

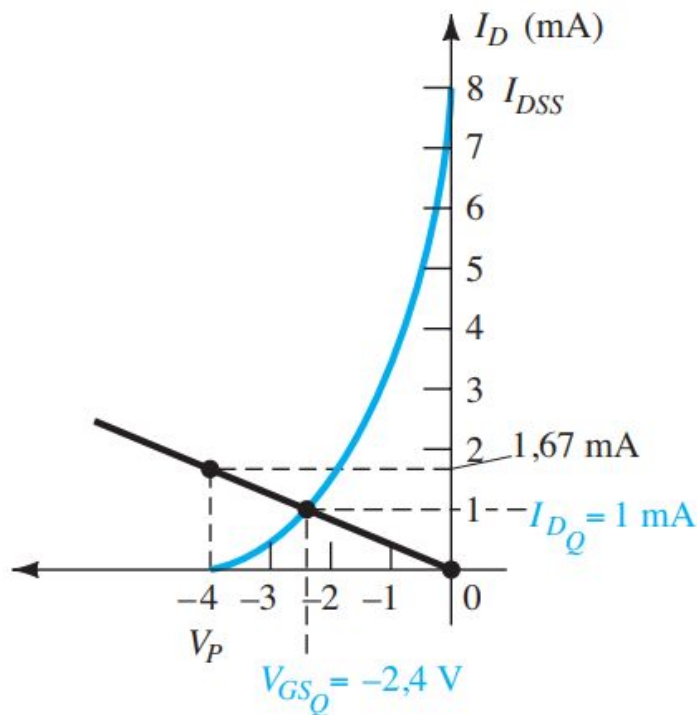
e

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{1 \text{ mA}}{80} = 12,5 \mu\text{A}$$

$$\begin{aligned} V_B &= 16 \text{ V} - I_B (470 \text{ k}\Omega) \\ &= 16 \text{ V} - (12,5 \mu\text{A})(470 \text{ k}\Omega) = 16 \text{ V} - 5,88 \text{ V} \\ &= 10,12 \text{ V} \end{aligned}$$

e

$$\begin{aligned} V_E &= V_D = V_B - V_{BE} \\ &= 10,12 \text{ V} - 0,7 \text{ V} \\ &= 9,42 \text{ V} \end{aligned}$$



Projeto

- O processo de projeto em dispositivos eletrônicos envolve a determinação dos valores de operação, como V_{GSQ} e I_{DQ} , com base na aplicação, amplificação desejada, intensidade do sinal e condições operacionais.
- A fase inicial costuma ser o estabelecimento dos valores CC apropriados, considerando parâmetros como V_D , I_D , V_{GSQ} , R_S e R
- Na escolha de valores-padrão comerciais, a tolerância dos parâmetros minimiza problemas no processo de projeto.
- Boa prática sugere escolher pontos de operação afastados da saturação e da região de corte, como V_{GSQ} próximos a $V_P/2$ ou I_{DQ} próximos a $I_{DSS}/2$, evitando ultrapassar os valores máximos de V_{DS} e I_D fornecidos na folha de dados.

EXEMPLO 7.14

Para o circuito da Figura 7.51, os valores de V_{DQ} e I_{DQ} são especificados. Determine os valores necessários de R_D e R_S . Quais são os valores comerciais padrão mais próximos?

Solução:

Conforme definido pela Equação 7.42,

$$R_D = \frac{V_{R_D}}{I_{D_Q}} = \frac{V_{DD} - V_{D_Q}}{I_{D_Q}}$$

e

$$= \frac{20 \text{ V} - 12 \text{ V}}{2,5 \text{ mA}} = \frac{8 \text{ V}}{2,5 \text{ mA}} = \mathbf{3,2 \text{ k}\Omega}$$

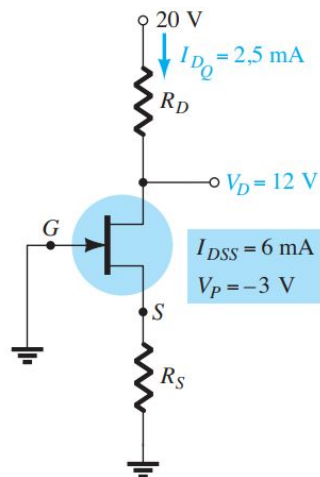
Traçando a curva de transferência da Figura 7.52 e desenhando uma reta horizontal em $I_{DQ} = 2,5 \text{ mA}$, obtemos $V_{GSQ} = -1 \text{ V}$. Aplicando $V_{GS} = -I_D R_S$, encontramos o valor de R_S :

$$R_S = \frac{-(V_{GSQ})}{I_{D_Q}} = \frac{-(-1 \text{ V})}{2,5 \text{ mA}} = \mathbf{0,4 \text{ k}\Omega}$$

Os valores comerciais padrão mais próximos são:

$$R_D = 3,2 \text{ k}\Omega \Rightarrow \mathbf{3,3 \text{ k}\Omega}$$

$$R_S = 0,4 \text{ k}\Omega \Rightarrow \mathbf{0,39 \text{ k}\Omega}$$



$$R_{\text{desconhecido}} = \frac{V_R}{I_R}$$

(7.42)

Figura 7.51 Exemplo 7.14.

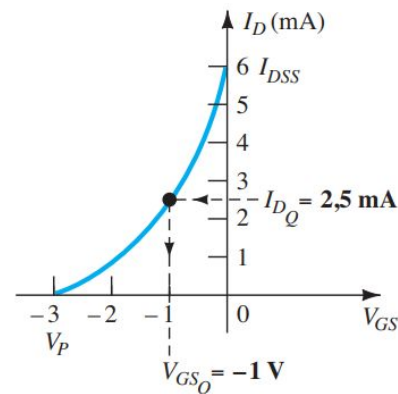


Figura 7.52 Determinação de V_{GSQ} para o circuito da Figura 7.51.

Análise de defeitos

FET de canal

Modelo de

Curva universal de polarização para o JFET