

MÓDULO QUATRO: AMPLIFICADOR DE PEQUENOS SINAIS A JFET.

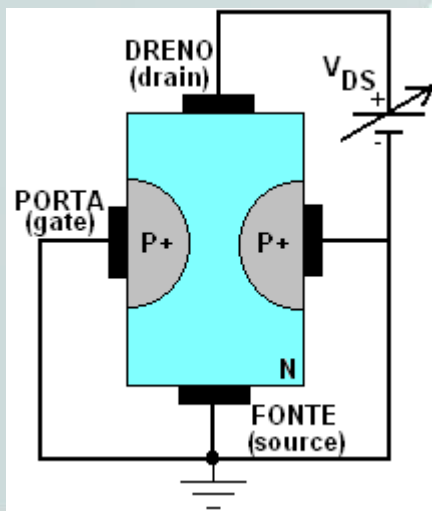
INTRODUÇÃO: O transistor J-FET é da família de transistores por efeito de campo. Compõem essa família o transistor de junção J-FET, o transistor mosfet modo depleção e o mosfet modo intensificação. O termo J-FET significa um transistor de junção e o termo “mosfet” significa “metal oxide surface”, depósito de uma camada fina de óxido de silício sobre a superfície do semiconductor. São transistores com grande número de aplicações no campo da eletrônica, o J-FET nos circuitos analógicos e o MOSFET circuitos de pulsos. O J-FET é o principal elemento para a construção dos amplificadores de pequenos sinais por ter característica de alta impedância de entrada, boa resposta em frequência e de simples e comum polarização. O MOSFET trataremos nos próximos módulos.

TECNOLOGIA DO JFET – Apresentamos a seguir o processo de fabricação e o funcionamento do dispositivo, tudo de forma bem resumida. Detalhes maiores no livro referência.

FABRICAÇÃO: O processo se resume na seqüência a seguir:

1. Parte-se de uma pastilha de silício do tipo P ou N;
2. Difunde-se 2 camadas tipo N+ ou P+ de acordo com a pastilha de silício;
3. Inserem-se terminais no dreno, fonte e nas camadas as portas;

FUNCIONAMENTO: Aplica-se uma polarização entre dreno e fonte V_{DS} e aterramos o terminal da fonte com os terminais das portas. Entre dreno e fonte formará um canal como mostrado a seguir.

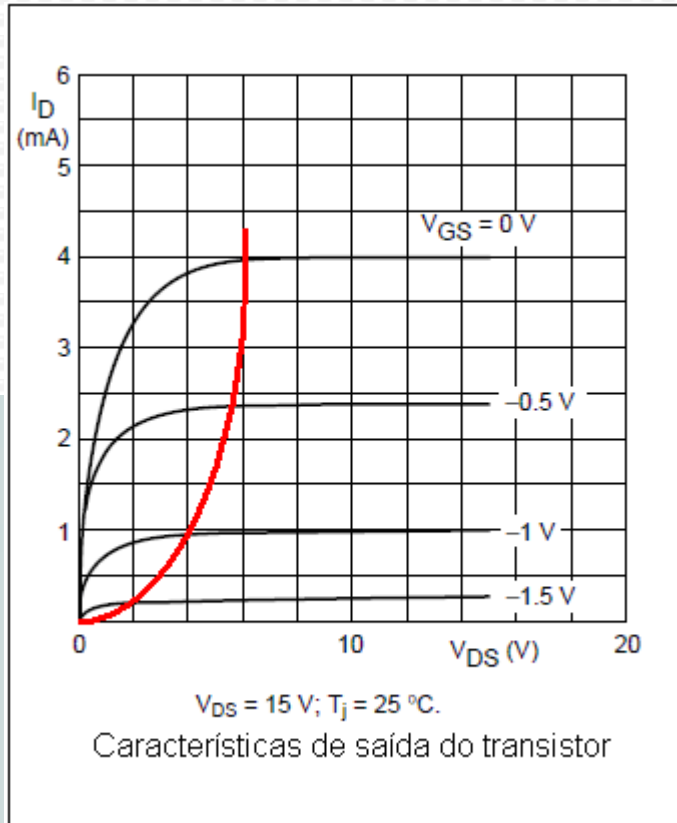


Início: A tensão V_{DS} varia linearmente de 0 a V_{DS} máximo.

Efeito: O canal N formado entre as regiões P^+ vai estrangulando, conforme o aumento de V_{DS} , pois as junções P^+N estão reversamente polarizadas e ocorre a expansão da zona de depleção. Quando o canal é estrangulado a tensão a qual provoca esse efeito é chamada de “pinch-off” ou tensão de estrangulamento V_P . Pode-se controlar a corrente que circula entre dreno e fonte modulando-se o canal N, pela polarização da junção PN. Nesse caso, $V_{GS} = 0$, o canal apresenta uma determinada resistência entre dreno e fonte e, portanto tensões que variam ao longo do corpo do canal, sendo máxima no dreno e mínima na fonte. A corrente entre dreno e fonte cresce linearmente para baixas tensões de V_{DS} até o ponto onde ocorre o “pinch-off”, nesse ponto em diante a corrente permanece constante, pois é uma região de saturação e quando $V_{DS} = 0$ a

Aplicando-se uma polarização independente negativa e constante entre os terminais de fonte e porta pode-se obter o estrangulamento do canal N aplicando-se uma tensão menor em V_{DS} . Por exemplo, suponha que atingimos o estrangulamento do canal N com uma tensão V_{DS} igual a +4V. Se aplicarmos entre porta e fonte uma tensão reversa de -2V, então o canal será estrangulado com uma tensão de V_{DS} menor do que +4V e a corrente que circula no canal será menor do que I_{DSS} , pois a tensão aplicada em V_{DS} foi menor do que a inicial de +4V. A curva a seguir mostra a curva característica $V_{DS} \times I_D$ para várias tensões de V_{GS} . Os pontos de estrangulamento estão na curva em vermelho que é uma parábola.

CURVA CARACTERÍSTICA DO JFET TÍPICO



Obs.: Os pontos das intersecções entre a equação de Schocley: $I_D = I_{DSS}(1 - V_{GS}/V_P)^2$ e na curva em vermelho estão os pontos de constricção ou seja os pontos onde é o início da corrente de dreno de saturação. Do gráfico vemos que para $V_P = -6\text{V}$ para $V_{GS} = 0$.

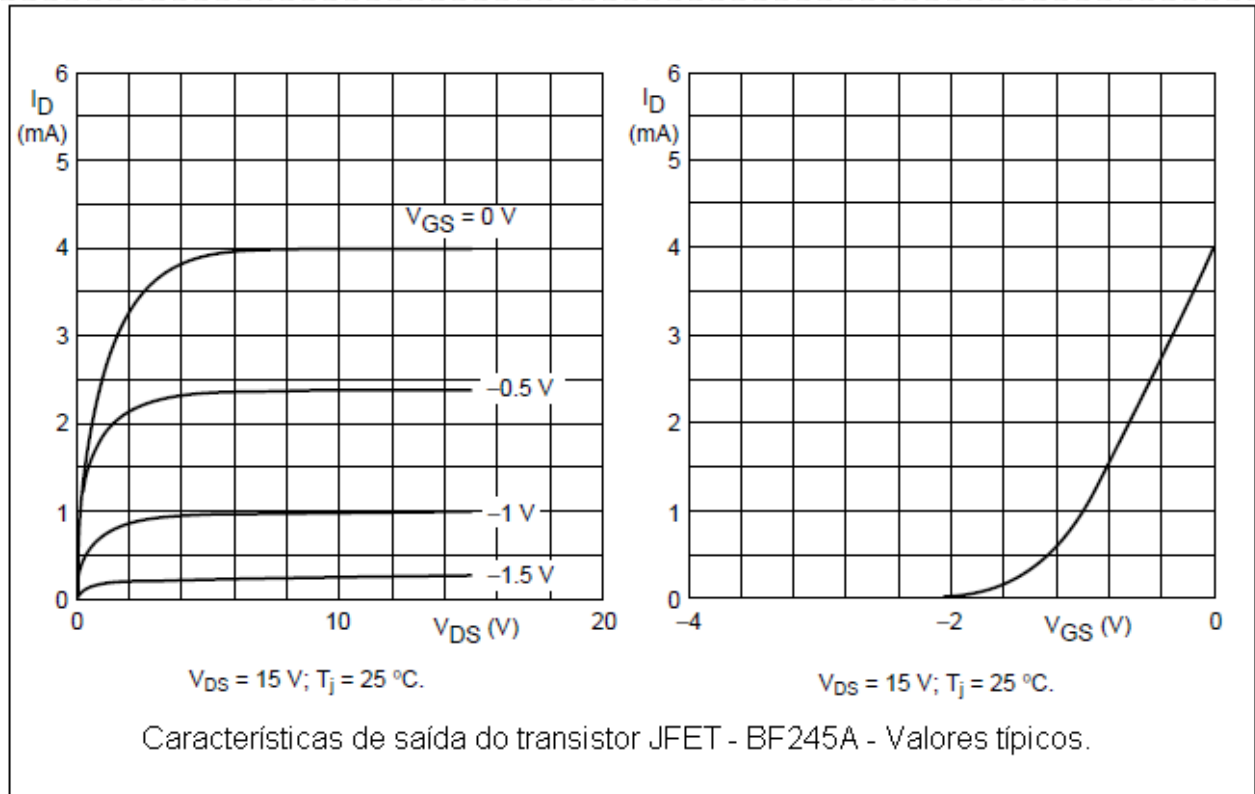
EQUAÇÃO DE SCHOCLEY

O comportamento do JFET pode ser descrito por uma equação matemática de segundo grau chamada de equação de Schocley. A parábola descrita pela equação envolve parâmetros como a corrente I_D , a tensão entre o terminal da porta e fonte V_{GS} , a tensão de estrangulamento “pinch-off” e a corrente máxima de dreno I_{DSS} . Esses parâmetros determinarão a polarização particular para o JFET. Cada JFET tem seus próprios parâmetros e assim uma equivalência deverá ser cuidadosamente estudada, pois a influência é grande na polarização do transistor. Por exemplo, o transistor **JFET BF245** possui três tipos especificados A,B e C e os parâmetros são completamente diferentes.

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

CURVA CARACTERÍSTICA DO JFET.

Os parâmetros I_{DSS} e V_P são dados do transistor JFET e a partir da equação de Schocley é possível construir as curvas características. As curvas características são apresentadas a seguir de $I_D \times V_{DS}$ e de $I_D \times V_{GS}$. As curvas serão muito úteis na polarização do transistor na construção de circuitos.

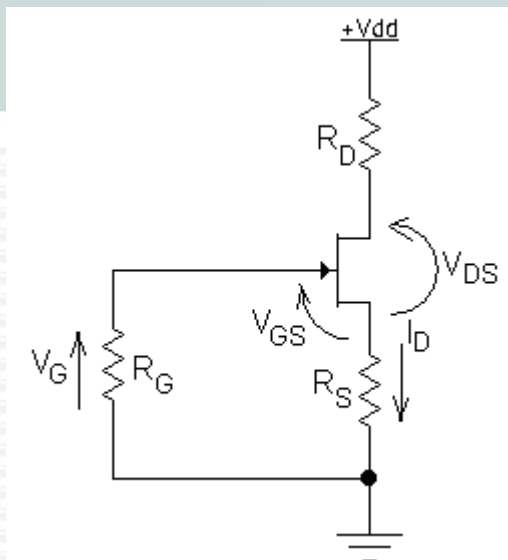


POLARIZAÇÃO DO JFET

Podemos construir dois circuitos básicos para a polarização do JFET, autopolarização e divisor de tensão. Os circuitos podem ser utilizados na construção dos amplificadores de pequenos sinais.

AUTOPOLARIZAÇÃO

O circuito de autopolarização é um circuito que aproveita a característica do transistor em zero Volt para auto se polarizar. O ponto quiescente Q depende dos parâmetros do transistor e a corrente I_D depende de V_{GS} e da tensão de estrangulamento V_P . O circuito é apresentado a seguir.



Relações de correntes x tensões no circuito.

$$I_D = I_{DSS}[1 - (V_{GS}/V_P)]^2, \text{ equação de Schocley; (1)}$$

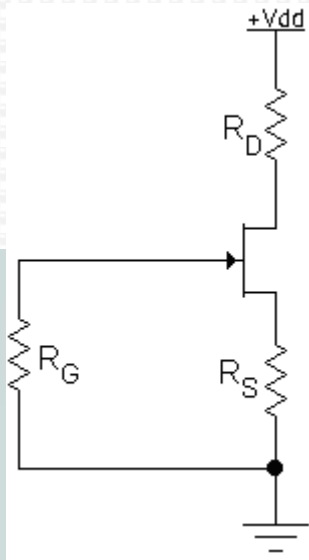
$$V_{dd} = V_{DS} + I_D (R_S + R_D), \text{ (3) sendo } V_{DS} \geq (V_{GS} - V_P)$$

$$V_G = 0; V_{GS} = - R_S I_D; \text{ (2)}$$

Obs.: A intersecção entre a curva (1) parábola e a (2) a reta define o ponto quiescente ou de trabalho do circuito.

DETERMINAÇÃO DO PONTO QUIESCENTE DO CIRCUITO

Para determinar o ponto quiescente do circuito, a partir dos dados do transistor I_{DSS} e V_P e do componente R_S e R_D , e da fonte de polarização V_{dd} existem dois métodos sendo gráfico e algébrico.



SOLUÇÃO: Modo gráfico

Procedimento:

1. Construir 2 tabelas com os parâmetros I_D e V_{GS} ;
2. Traçar a curva $I_D \times V_{GS}$, use a equação de Schocley;
3. Calcular valores de I_D impondo valores de $V_{GS} = f(V_P)$;
4. Traçar a curva $I_D \times V_{GS}$, use a equação $V_{GS} = -R_S I_D$;
5. Achar o ponto de polarização $Q(I_{Dq}, V_{GSq})$;
6. Do ponto Q , no eixo horizontal projete I_D e no vertical V_{GS} ;
7. Calcule V_{DS} usando a relação (3).

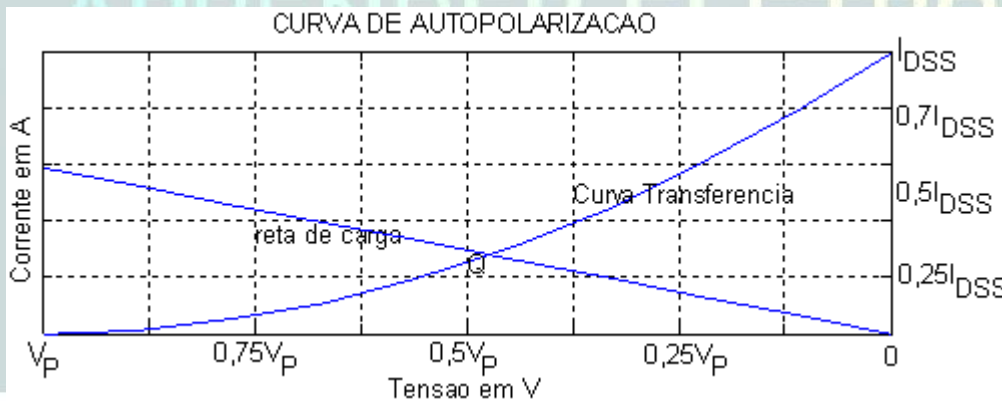
Tabela I

V_{GS}	I_D
0	I_{DSS}
$0,25V_P$	$0,5I_{DSS}$
$0,5V_P$	$0,25I_{DSS}$
$0,70V_P$	$0,1I_{DSS}$
V_P	0

Tabela II

V_{GS}	I_D
0	0
-1	$1/R_S$

Graficamente a curva média é traçada de acordo com os pontos da tabela I e II.



SOLUÇÃO: Modo algébrico

Usando a equação de Schocley: $I_D = I_{DSS}[1 - (V_{GS}/V_P)^2]$ (1) e a relação (2) $V_{GS} = -R_S I_D$, temos:

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



Circuitos Eletrônicos

Substituindo (2) em (1): $V_{GS} = -R_S I_D$, teremos:

$$\frac{I_D}{I_{DSS}} V_P^2 = (V_P^2 - 2V_P(-R_S I_D) + (-R_S I_D)^2); \quad (3)$$

Desenvolvendo (3), temos:

$$\frac{I_D}{I_{DSS}} V_P^2 = V_P^2 + 2V_P R_S I_D + R_S^2 I_D^2; \quad (4)$$

Rearranjando a equação (4), temos:

$$R_S^2 I_D^2 + (2V_P R_S - \frac{V_P^2}{I_{DSS}}) I_D + V_P^2 = 0 \quad (5), \text{ a equação do segundo grau: } Ax^2 + Bx + C = 0.$$

Relacionando os coeficientes da equação A, B e C com os termos da equação (5), temos:

$$A = R_S^2, B = (2V_P R_S - \frac{V_P^2}{I_{DSS}}) \text{ e } C = V_P^2;$$

A solução da equação de segundo grau leva a duas raízes I_D' e I_D'' , a raiz escolhida será a menor entre elas.

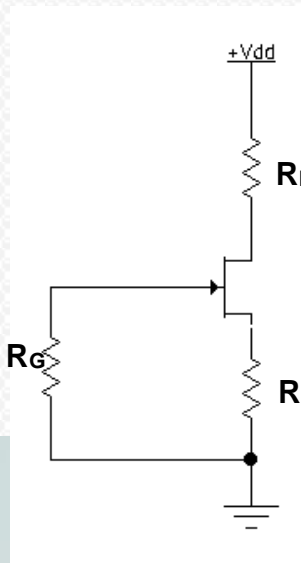
$$I_D = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

A partir da determinação da corrente quiescente do circuito I_D , se determina os outros parâmetros como a tensão em (2) V_{GS} e em (3) V_{DS} .

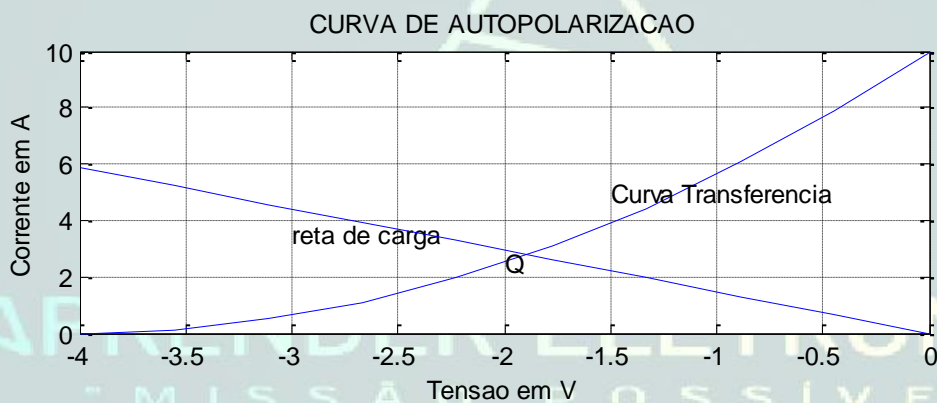
EXERCÍCIO: Para o amplificador a seguir, são dados:

$I_{DSS} = 10\text{mA}$, $V_P = -4\text{V}$, $R_S = 680\Omega$, $R_D = 2\text{K}\Omega$, $V_{dd} = 12\text{V}$, $R_G = 1\text{M}\Omega$. Pede-se:

- O valor de I_{Dq} e V_{GSq} , solução pelo método gráfico.
- O valor de I_{Dq} e V_{GSq} , solução pelo método algébrico.
- O valor de V_{DS} .



Solução: O valor de V_{GSq} e I_{Dq} , serão retirados do gráfico a seguir.



Os valores retirados do gráfico são:

$$V_{GSq} = -1,9V \text{ e } I_{Dq} = 2,8mA.$$

b) Método algébrico.

Resulta:

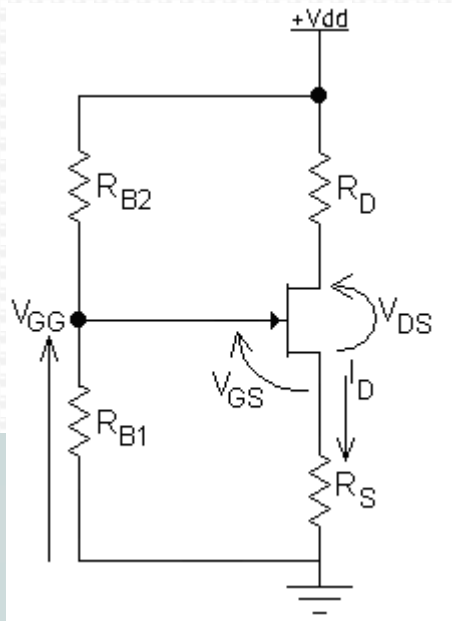
$$R_S^2 I_D^2 + 2(V_P \cdot R_S - V_P^2 / 2I_{DSS})I_D + V_P^2 = 0$$

$$V_{GSq} = -1,89V \text{ e } I_{Dq} = 2,78mA. \text{ (Solução mais adequada).}$$

$$c) V_{DS} = V_{DD} - I_D(R_S + R_D) = 12 - 2,78 \cdot 10^{-3} \cdot (680 + 2000) = 4,54V.$$

DIVISOR DE TENSÃO

O circuito divisor de tensão é um circuito muito utilizado na polarização do ponto quiescente. É um circuito que apresenta estabilidade no ponto de operação, pois o ponto é amarrado pelos resistores inseridos no terminal da porta. O circuito a seguir apresenta o circuito a JFET do divisor de tensão.



Relações de correntes x tensões no circuito.

$$I_D = I_{DSS}[1 - (V_{GS}/V_P)]^2, \text{ equação de Schocley; (1)}$$

$$V_{dd} = V_{DS} + I_D (R_S + R_D), \text{ (3) sendo } V_{DS} \geq (V_{GS} - V_P)$$

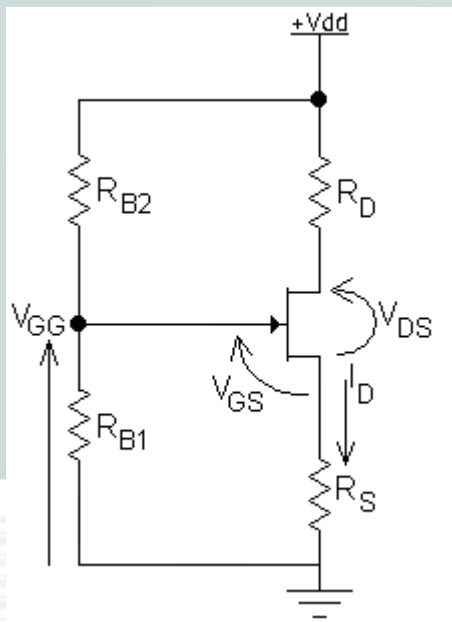
$$V_{GG} = V_{dd} \cdot R_{B1} / (R_{B1} + R_{B2});$$

$$V_{GS} = V_{GG} - R_S I_D; \text{ (2)}$$

Obs.: A intersecção entre a curva (1) parábola e a (2) a reta define o ponto quiescente ou de trabalho do circuito.

DETERMINAÇÃO DO PONTO QUIESCENTE DO CIRCUITO

Para determinar o ponto quiescente do circuito, a partir dos dados do transistor I_{DSS} e V_P e dos componentes R_{B1} , R_{B2} , R_S e R_D , e da fonte de polarização V_{dd} existem dois métodos sendo gráfico e algébrico.



SOLUÇÃO: Modo gráfico

Procedimento:

1. Construir 2 tabelas com os parâmetros I_D e V_{GS} ;
2. Traçar a curva $I_D \times V_{GS}$, use a equação de Schocley;
3. Calcular valores de I_D impondo valores de $V_{GS} = f(V_P)$;
4. Traçar a curva $I_D \times V_{GS}$, use a equação $V_{GS} = V_{GG} - R_S I_D$;
5. Achar o ponto de polarização $Q(I_{Dq}, V_{GSq})$;
6. Do ponto Q, no eixo horizontal projete I_D e no vertical V_{GS} ;
7. Calcule V_{DS} usando a relação (3).

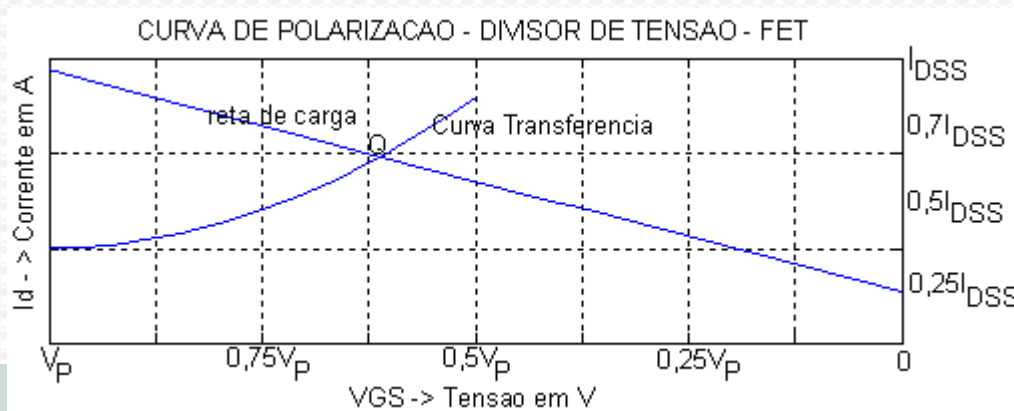
Tabela I

V_{GS}	I_D
0	I_{DSS}
$0,25V_P$	$0,5I_{DSS}$
$0,5V_P$	$0,25I_{DSS}$
$0,70V_P$	$0,1I_{DSS}$

Tabela II

V_{GS}	I_D
V_{GG}	0
0	V_{GG}/R_S

Graficamente a curva média é traçada de acordo com os pontos da tabela I e II.



SOLUÇÃO: Modo algébrico

Usando a equação de Schocley: $I_D = I_{DSS}[1 - (V_{GS}/V_P)^2]$ (1) e a relação (2) $V_{GS} = V_{GG} - R_S I_D$, temos:

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

Substituindo-se (2) em (1): $V_{GS} = V_{GG} - R_S I_D$, teremos:

$$\frac{I_D}{I_{DSS}} V_P^2 = (V_P^2 - 2V_P(V_{GG} - R_S I_D) + (V_{GG} - R_S I_D)^2); \quad (3)$$

Desenvolvendo (3), temos:

$$\frac{I_D}{I_{DSS}} V_P^2 = V_P^2 - 2V_P V_{GG} + 2V_P R_S I_D + V_{GG}^2 - 2V_{GG} R_S I_D + R_S^2 I_D^2; \quad (4)$$

Rearranjando a equação (4), temos:

$$R_S^2 I_D^2 + (2V_P R_S - 2V_{GG} R_S - \frac{V_P^2}{I_{DSS}}) I_D + V_{GG}^2 - 2V_P V_{GG} + V_P^2 = 0 \quad (5),$$

$$R_S^2 I_D^2 + 2R_S[(V_P - V_{GG}) - \frac{V_P^2}{2R_S I_{DSS}}] I_D + (V_P - V_{GG})^2 = 0, \text{ onde a equação do segundo}$$

grau: $Ax^2 + Bx + C = 0$.

Relacionando os coeficientes da equação A, B e C com os termos da equação (5), temos:

$$A = R_S^2, B = (2R_S[V_P - V_{GG}] - \frac{V_P^2}{2R_S I_{DSS}}) \text{ e } C = (V_P - V_{GG})^2;$$

A solução da equação de segundo grau leva a duas raízes I_D' e I_D'' , a raiz escolhida será a menor entre elas.

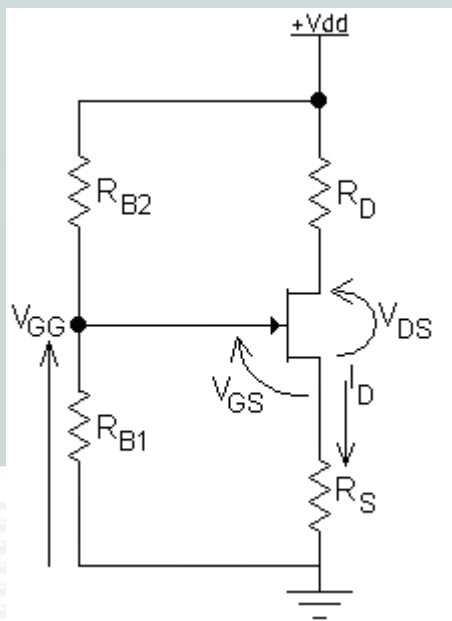
$$I_D = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

A partir da determinação da corrente quiescente do circuito I_D , se determina os outros parâmetros como a tensão em (2) V_{GS} e em (3) V_{DS} .

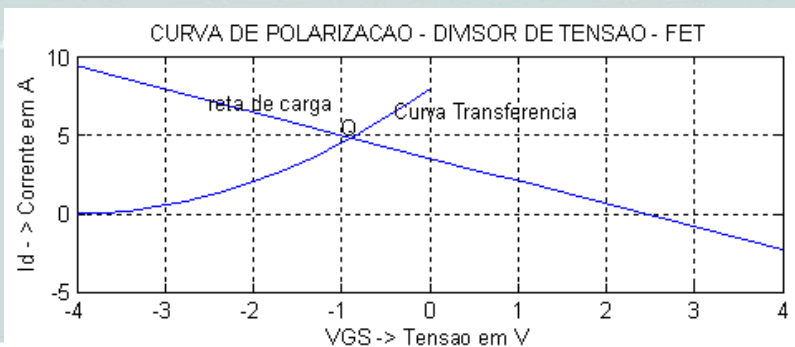
EXERCÍCIO: Para o amplificador a FET, são dados: $V_{DD} = 12V$, $I_{DSS} = 8mA$, $R_D = 1K$, $R_S = 680\Omega$, $V_P = -4V$, $R_{B1} = 200K$, $R_{B2} = 50K$. Pede-se :

- O valor de I_{Dq} e V_{GSq} , solução pelo método gráfico.
- O valor de I_{Dq} e V_{GSq} , solução pelo método algébrico.
- O valor de V_{DS} .

Solução : Pelo método gráfico, a polarização será:



a) Método gráfico



b) Método algébrico: Pelo método gráfico, os valores de:

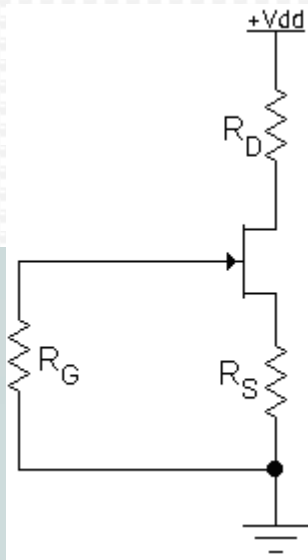
$$R_S^2 + 2.R_S.(V_P - V_{GG}) - 2.V_P/I_{DSS} + (V_P - V_{GG})^2 = 0$$

Daí, $I_{Dq} = 4,84mA$ e $V_{GSq} = -0,89V$.

c) O valor de $V_{DS} = V_{DD} - I_D.(R_S + R_D) = 8,71V$.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

As questões de 1 a 4 se referem a figura e os dados a seguir: Dados: $I_{DSS} = 10\text{mA}$, $V_P = -4\text{V}$, $P_D = 100\text{mW}$ e $V_{DD} = 20\text{V}$ e $R_G = 1\text{M}\Omega$.



1.o Exercício: São dados para o circuito de autopolarização: $I_D = 5\text{mA}$, $R_D = 2\text{K}$ e $R_S = 0.5\text{K}$. Qual a tensão V_{DS} e V_{GS} .

- a) $V_{DS} = 10,0\text{V}$ e $V_{GS} = -5,0\text{V}$
- b) $V_{DS} = 7,5\text{V}$ e $V_{GS} = -5,0\text{V}$
- c) $V_{DS} = 7,5\text{V}$ e $V_{GS} = -2,5\text{V}$
- d) $V_{DS} = 5,0\text{V}$ e $V_{GS} = -5,0\text{V}$
- e) $V_{DS} = 5,0\text{V}$ e $V_{GS} = -2,5\text{V}$

Resposta: c

2.o Exercício: São dados para o circuito de autopolarização: $I_D = 5\text{mA}$, $R_D = 2\text{K}$ e $R_S = 0.5\text{K}$. Qual a potência entre dreno e fonte P_{DS} .

- a) $P_D = 37,5\text{mW}$
- b) $P_D = 37,5\text{mW}$
- c) $P_D = 27,5\text{mW}$
- d) $P_D = 27,0\text{mW}$
- e) $P_D = 35,0\text{mW}$

Resposta: a

3.o Exercício: São dados para o circuito de autopolarização: Para $V_{GS} = 0\text{V}$ e $R_D = 1\text{K}$. Qual a corrente I_D ?

- a) $I_D = 1,0\text{mA}$
- b) $I_D = 2,5\text{mA}$
- c) $I_D = 7,5\text{mA}$
- d) $I_D = 5,0\text{mA}$
- e) $I_D = 10\text{mA}$

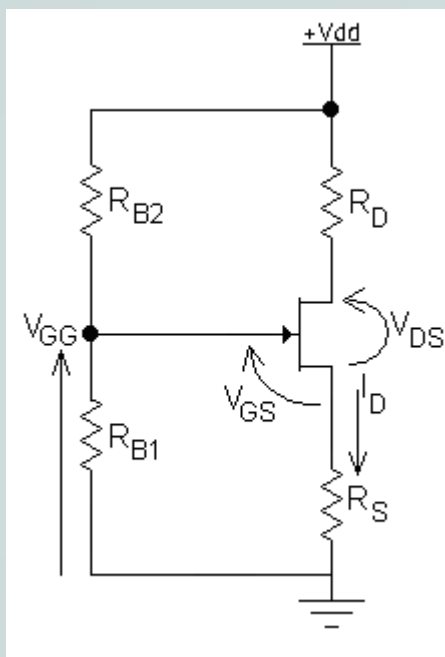
Resposta: e

4.o Exercício: Responda qual a alternativa correta.

- a) No circuito de autopolarização a tensão V_{GS} é sempre igual a zero.
- b) A corrente é máxima quando a tensão V_{GS} é máxima e maior que zero.
- c) A corrente é máxima quando a tensão V_{GS} é igual a zero.
- d) Quando a tensão V_{GS} é igual a V_P a corrente é máxima.
- e) A tensão V_P deve ser igual a zero quando V_{GS} é igual a zero.

Resposta: c

As questões de 5 a 8 são referentes aos dados e figura a seguir: Dados $V_{DD} = 20V$, $I_{DSS} = 10mA$ e $V_P = -5V$ e $P_D = 100mW$.



5.o Exercício: No circuito amplificador a divisor de tensão, são dados: $R_{B1} = 20K$, $R_{B2} = 80K$, $R_S = 1K$ e $I_D = 8,0mA$, qual a tensão V_{GS} ?

- a) $V_{GS} = - 2,0V$
- b) $V_{GS} = + 2,0V$
- c) $V_{GS} = - 1,0V$
- d) $V_{GS} = - 4,0V$
- e) $V_{GS} = + 1,0V$

Resposta: d

6.o Exercício: No circuito amplificador a divisor de tensão, são dados: $R_{B1} = 40K$, $R_{B2} = 60K$, $R_S = 1K$ e $I_D = 4,0mA$, qual a tensão V_{GG} ?

- a) $V_{GG} = + 2,0V$
- b) $V_{GG} = + 8,0V$
- c) $V_{GG} = + 1,0V$
- d) $V_{GG} = + 4,0V$
- e) $V_{GG} = + 6,0V$



Circuitos Eletrônicos

Resposta: b

7.o Exercício: No circuito amplificador a divisor de tensão, são dados: $R_{B1} = 20K$, $R_{B2} = 80K$, $R_D = R_S = 1K$ e $I_D = 8,0mA$, qual a tensão V_{DS} e potência no transistor P_D ?

- a) $V_{DS} = + 2,0V$ e $P_D = 16mW$
- b) $V_{DS} = + 3,0V$ e $P_D = 24mW$
- c) $V_{DS} = + 1,0V$ e $P_D = 8mW$
- d) $V_{DS} = + 4,0V$ e $P_D = 32mW$
- e) $V_{DS} = + 8,0V$ e $P_D = 64mW$

Resposta: d

8.o Exercício: Indique qual das alternativas a seguir é a correta.

- a) A tensão V_{GG} é positiva e daí a tensão V_{GS} será positiva.
- b) A corrente I_D é máxima quando V_{GS} é igual a tensão V_P .
- c) A tensão V_{DS} diminui quando V_{GS} aumenta negativamente em direção à tensão V_P .
- d) A tensão V_{DS} é constante quando V_{GS} aumenta negativamente.
- e) A corrente de dreno aumenta quando V_{GS} tende a zero.

Resposta: e

BIBLIOGRAFIA

Referência: Livro Texto: Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos.
Autores: Robert Boylestad e Louis Nashelsky, editora Pearson, Prentice Hall, 11.a edição, ano 2013.

OUTRAS REFERÊNCIAS

1. Microeletrônica – Sedra, A.S e Smith, K,C – 5.a edição Pearson.
2. Eletrônica Vol.1 – Malvino, A.P – 14.a edição, Editora Makron,
3. Circuitos Elétricos - Nilsson, J. W. / Riedel, S. A. / Marques, A. S., ano de 2008 Prentice Hall Brasil.
4. Circuitos com transistores Bipolares e MOS - Silva, M. M./Calouste, G., ano de 2010.
5. Dispositivos e Circuitos Eletrônicos, V.1 – Bogart, J. - ano de 2000 - Editora MAKRON.
6. Dispositivos e Circuitos Eletrônicos, V.2 – Bogart, J. - ano de 2000 - Editora MAKRON.