



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)
- Configuração Único Estágio (Polarização DC):
 - Polarização por Realimentação;
 - Polarização por Divisor de Tensão.
- Simulação (Análise DC):
 - Polarização por Realimentação;
 - Polarização por Divisor de Tensão.

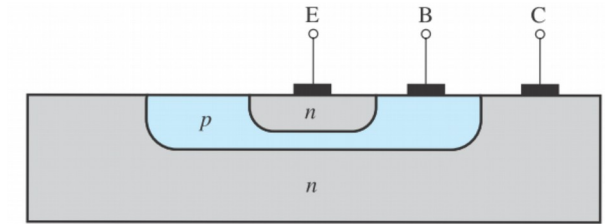
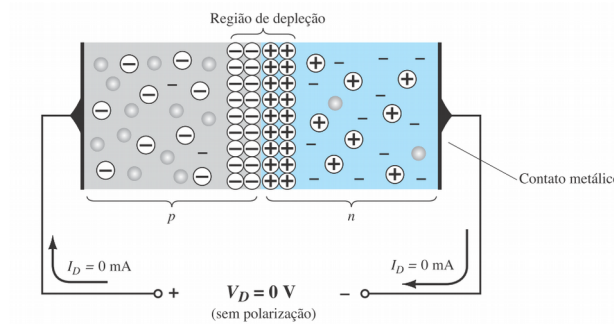
Introdução

Vacuum Tube Op-Amps

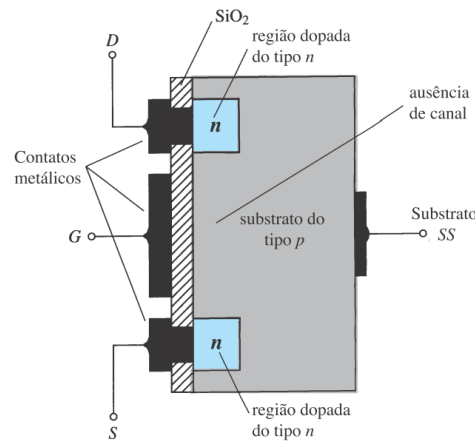
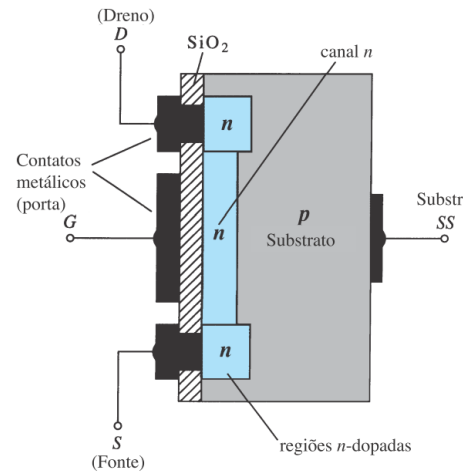
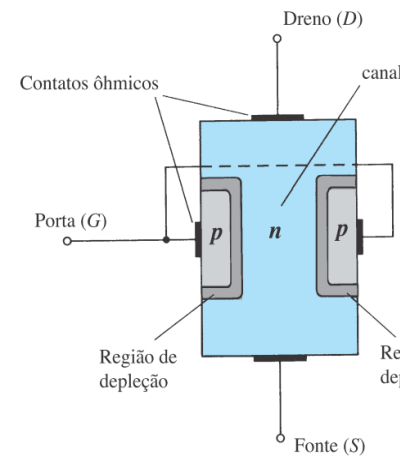
- First op amps built in 1930's-1940's
 - Technically feedback amplifiers due to only having one useable input
- Used in WWII to help how to strike military targets
 - Buffers, summers, differentiators, inverters
- Took $\pm 300V$ to $\pm 100V$ to power



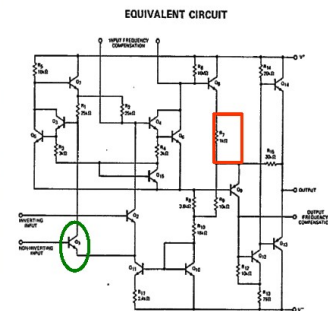
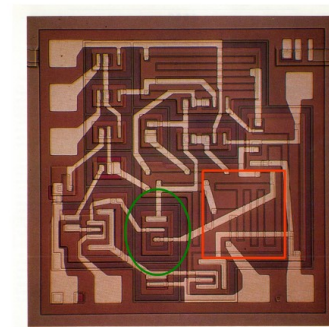
http://en.wikipedia.org/wiki/Image:K2-W_vacuum_tube_op-amp.jpg



Cross section of an npn BJT.



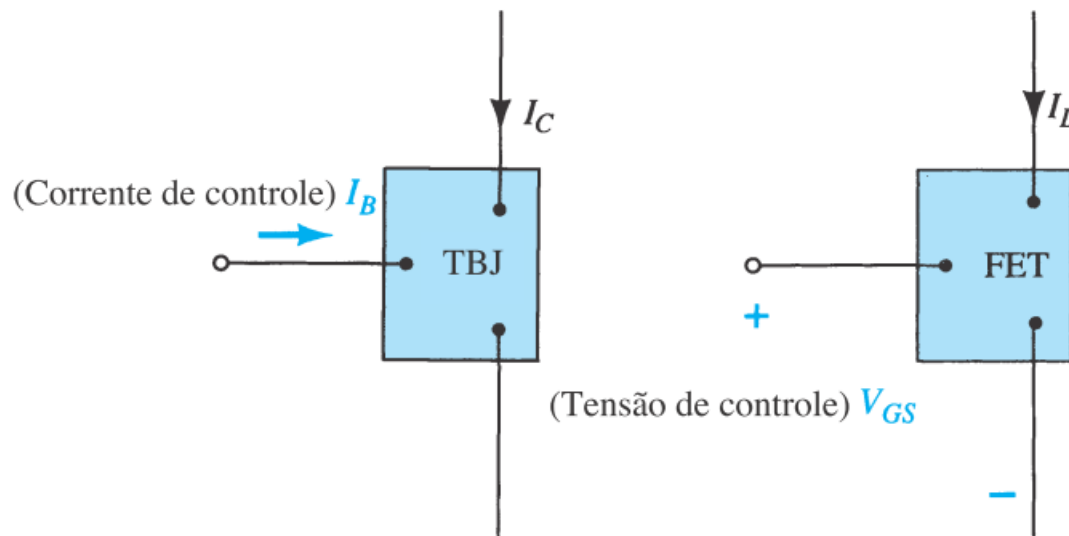
(Exemplos de AmpOp - 1964 - Op-Amp A702, Fairchild)



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:

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

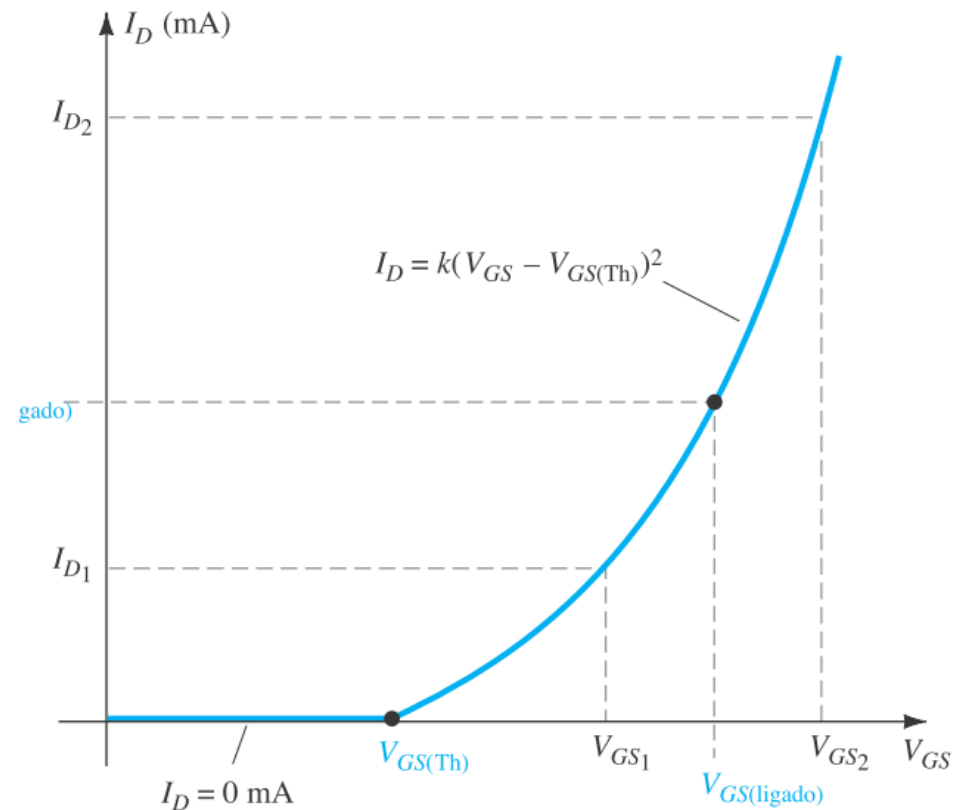
- MOSFET

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

Transistor Efeito de Campo (FET)

- E-MOSFET:
 - A curva característica de transferência do MOSFET tipo intensificação difere bastante daquela obtida para o JFET e para os MOSFETs tipo depleção, o que resulta em uma solução gráfica bem diferente daquela apresentada em aulas anteriores. Antes de qualquer coisa, lembramos que, 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 ao lado. Para valores de V_{GS} maiores do que $V_{GS(Th)}$, a corrente de dreno é definida por:

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



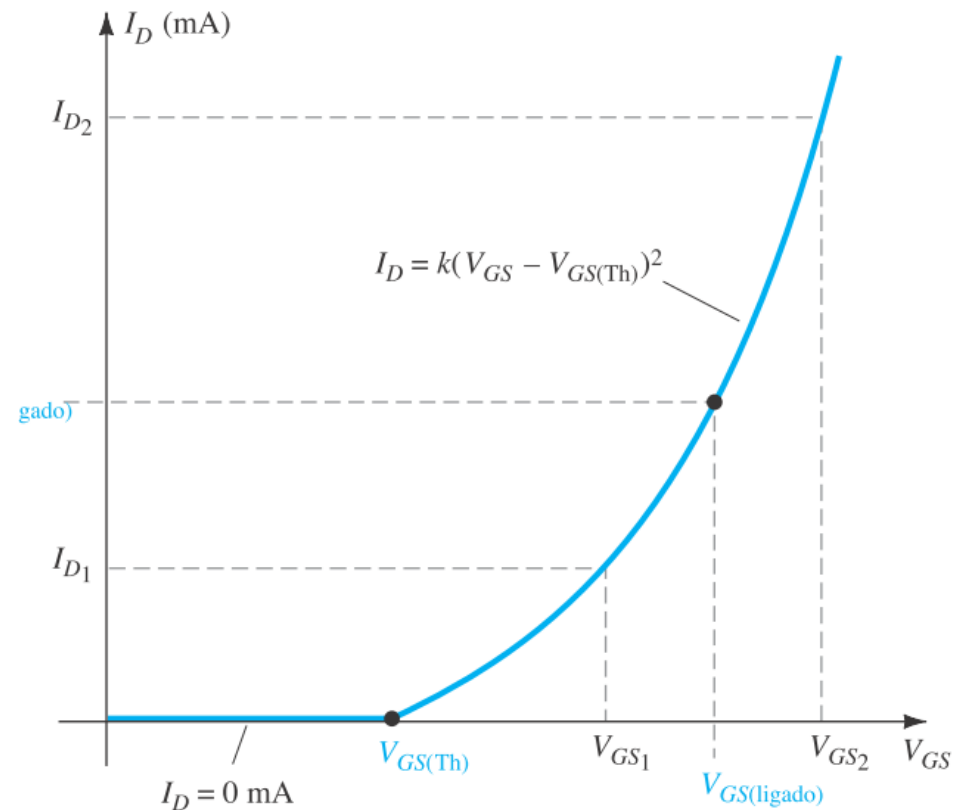
Curva característica de transferência de um MOSFET tipo intensificação de canal n.

Transistor Efeito de Campo (FET)

- E-MOSFET:

- Visto que as folhas de dados geralmente fornecem a tensão de limiar e um valor de corrente de dreno $I_{D(\text{ligado})}$ ou $(I_{D(\text{on})})$ e um valor correspondente de $V_{GS(\text{ligado})}$ (ou $V_{GS(\text{on})}$), são definidos dois pontos imediatamente, como mostra a Figura ao lado. Para completar a curva, a constante k da Equação abaixo deve ser determinada a partir dos valores obtidos das folhas de dados substituídos e resolvendo para k , como indicado a seguir:

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



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

Transistor Efeito de Campo (FET)

- E-MOSFET:

- Visto que as folhas de dados geralmente fornecem a tensão de limiar e um valor de corrente de dreno $I_{D(\text{ligado})}$ ou $(I_{D(\text{on})})$ e um valor correspondente de $V_{GS(\text{ligado})}$ (ou $V_{GS(\text{on})}$), são definidos dois pontos imediatamente, como mostra a Figura do “slide 6”. Para completar a curva, a constante k da Equação do slide anterior deve ser determinada a partir dos valores obtidos das folhas de dados substituídos e resolvendo para k , como indicado a seguir:

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

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

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

Uma vez que k esteja definido, podemos determinar outros valores de I_D para valores selecionados de V_{GS} . Normalmente, um ponto entre $V_{GS(\text{Th})}$ e $V_{GS(\text{ligado})}$ e outro um pouco maior do que $V_{GS(\text{ligado})}$ oferecem um número suficiente de pontos para traçar a Equação:

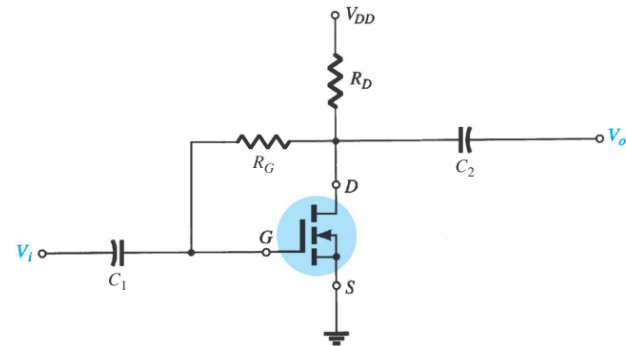
$$I_D = k(V_{GS} - V_{GS(\text{Th})})^2$$

(observe I_{D1} e I_{D2} na Figura do “slide 6”)₈

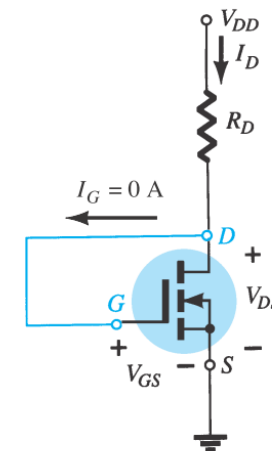
Transistor Efeito de Campo (MOSFET) (Configuração de Polarização com Realimentação)

Análise DC:

A Figura ao lado mostra uma configuração de polarização bastante utilizada para os MOSFETs tipo intensificação. 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 ao lado.



Configuração de polarização com realimentação.



Circuito equivalente CC da figura acima

Transistor Efeito de Campo (MOSFET) (Configuração de Polarização com Realimentação)

Análise DC:

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

e $V_D = V_G$

$$V_{DS} = V_{GS}$$

Para o circuito de saída,

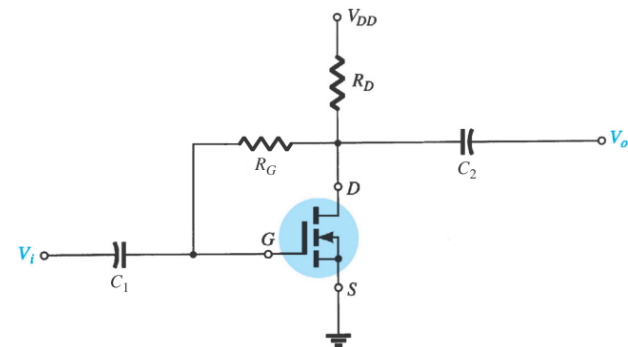
$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D$$

Se

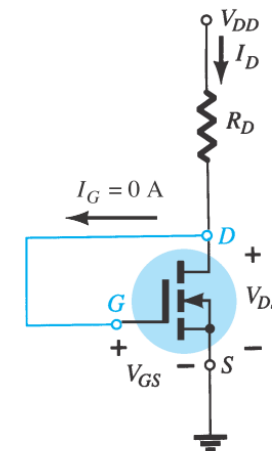
$$V_{DS} = V_{GS}$$

Temos,

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



Configuração de polarização com realimentação.



Circuito equivalente CC da figura acima

Transistor Efeito de Campo (MOSFET) (Configuração de Polarização com Realimentação)

Análise DC:

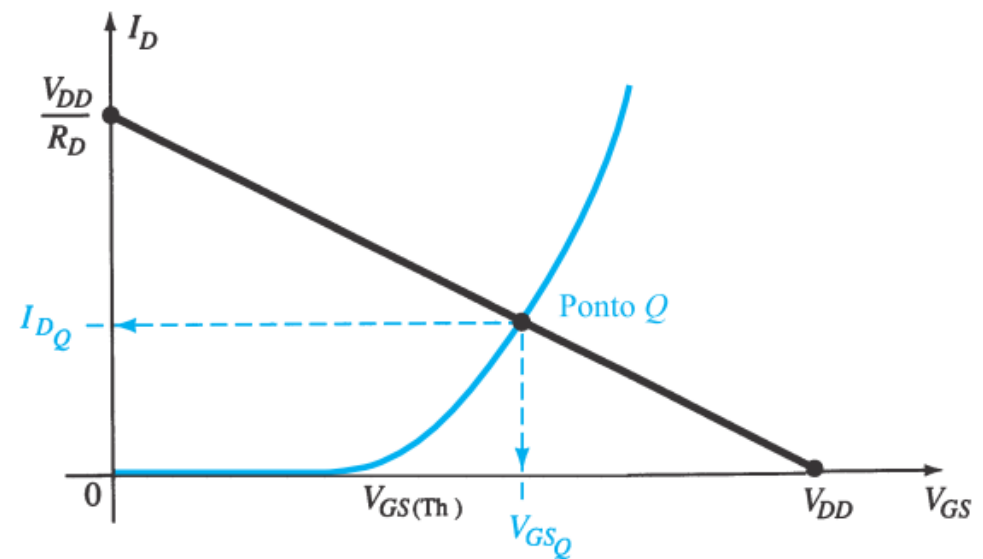
Os gráficos definidos pelas equações:

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

e

$$I_D = \frac{V_{DD}}{R_D} \Big|_{V_{GS} = 0 \text{ V}}$$

Aparecem na Figura ao lado com o ponto de operação resultante.

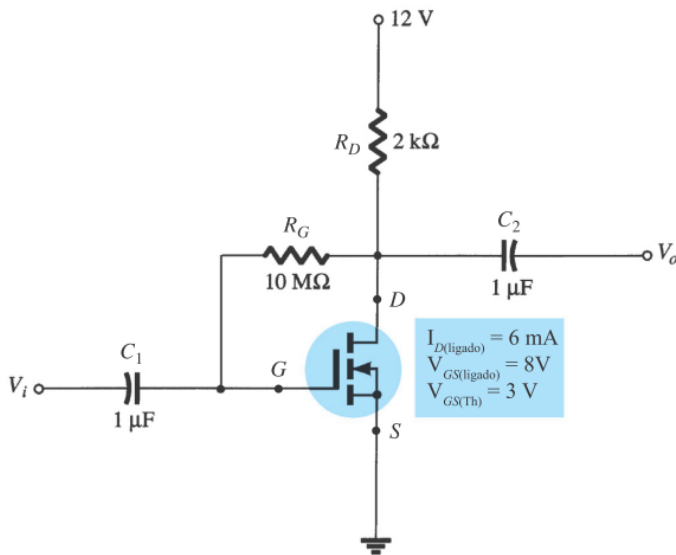


Determinação do ponto Q para o circuito da configuração de polarização com realimentação.

MOSFET

(Exemplo)

1 - Determine I_{DQ} e V_{DSQ} para o MOSFET tipo intensificação da Figura abaixo.:



MOSFET

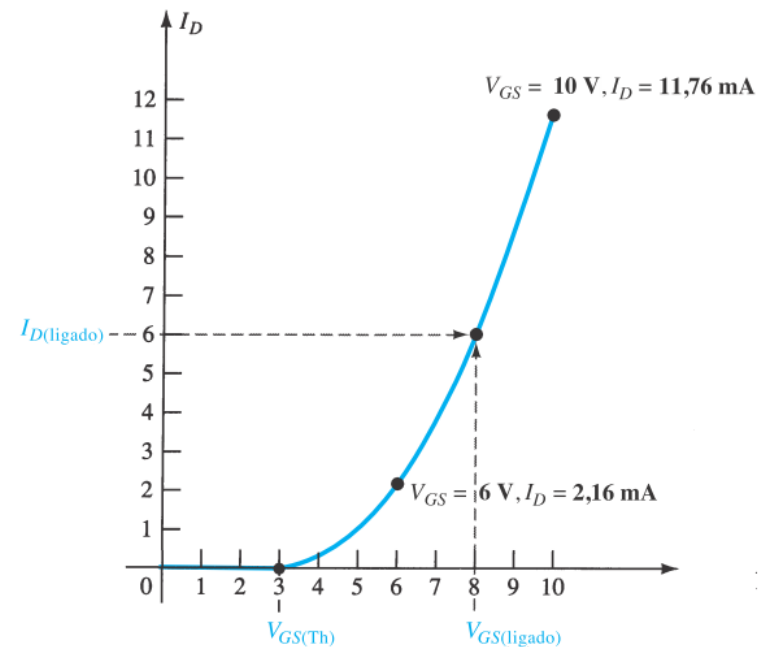
(Exemplo)

Solução:

Gráfico da curva de transferência:

Dois pontos são definidos imediatamente, como mostra a Figura ao lado. Resolvendo para k , da Equação abaixo, temos,

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



MOSFET

(Exemplo)

Solução:

Gráfico da curva de transferência:

Como mostrado na figura ao lado:

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

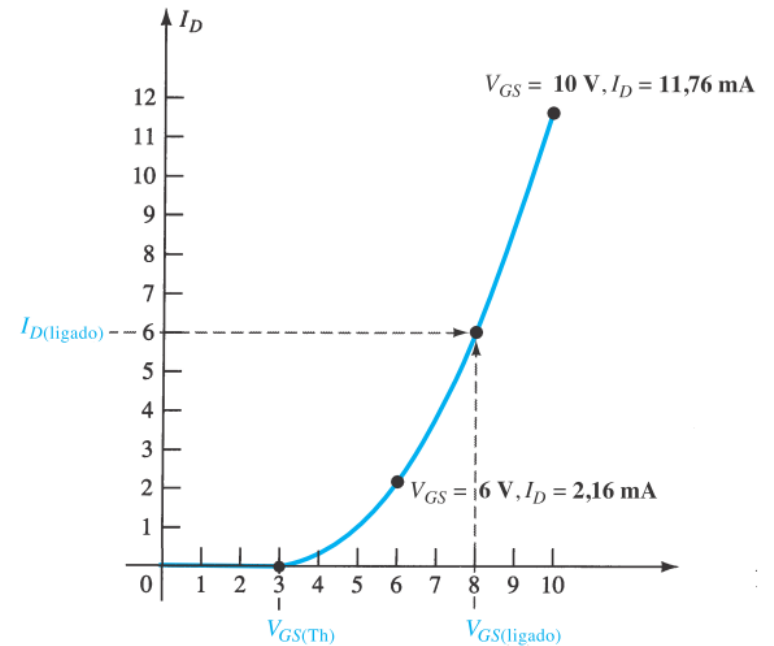
$$I_D = 0,24 \times 10^{-3} (6\text{V} - 3\text{V})^2 = 0,24 \times 10^{-3}$$

$$I_D = \mathbf{2,16\text{ mA}}$$

Para $V_{GS} = 10\text{ V}$ (um pouco maior do que $V_{GS(Th)}$),

$$I_D = 0,24 \times 10^{-3} (10\text{V} - 3\text{V})^2 = 0,24 \times 10^{-3}$$

$$I_D = \mathbf{11,76\text{ mA}}$$



MOSFET

(Exemplo)

Solução:

Reta de polarização do circuito:

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

$$V_{GS} = 12 \text{ V} - I_D (2 \text{ k}\Omega)$$

Considerando $V_{GS} = V_{DD}$

Tem-se

$$V_{GS} = 12 \text{ V para } I_D = 0 \text{ mA}$$

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

Considerando $I_D = V_{DD} / R_D$

Tem-se

$$I_D = V_{DD} / R_D = 12 \text{ V} / (2 \text{ k}) \text{ para } V_{GS} = 0 \text{ V}$$

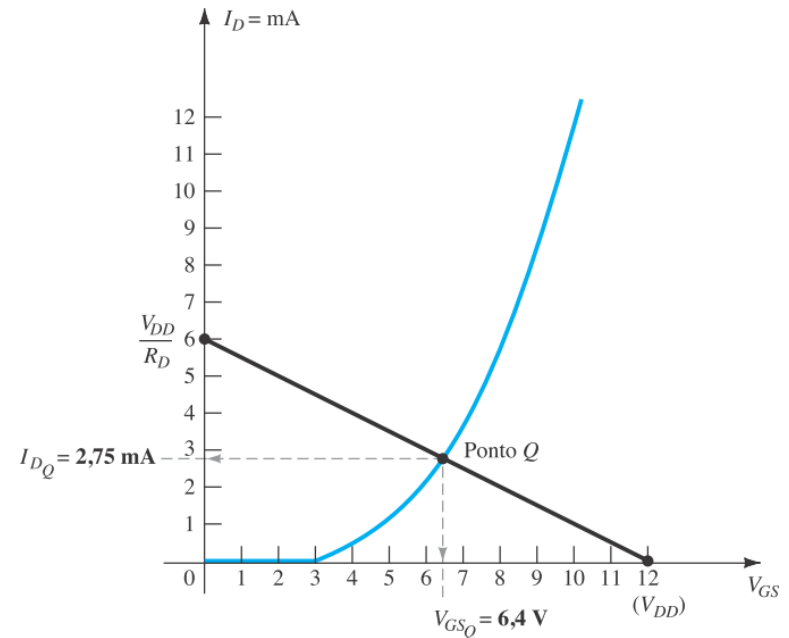
$$I_D = 6 \text{ mA}$$

A reta de polarização resultante aparece na Figura abaixo. No ponto de operação,

$$I_{DQ} = 2,75 \text{ mA e } V_{GSQ} = 6,4 \text{ V}$$

Com

$$V_{DSQ} = V_{GSQ} = 6,4 \text{ V}$$

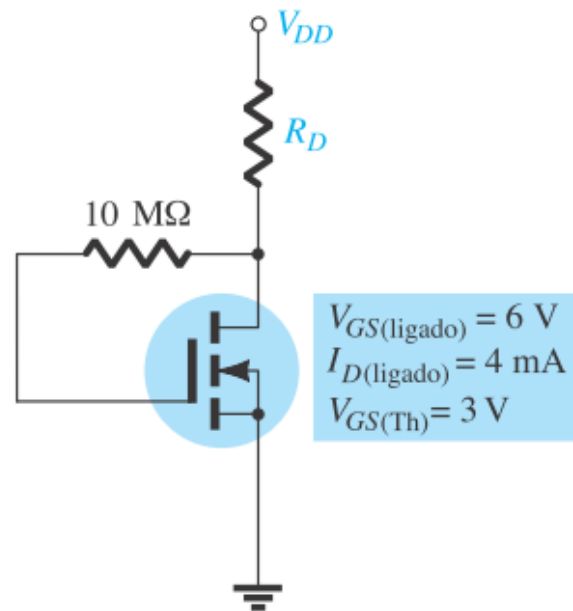


Determinação do ponto Q para o circuito

MOSFET

(Atividades)

1 - Os valores de V_{DS} e I_D especificados são $V_{DS}=1/2V_{DD}$ e $I_D=I_{D(\text{ligado})}$ para o circuito da Figura abaixo. Determine os valores de V_{DD} e R_D .

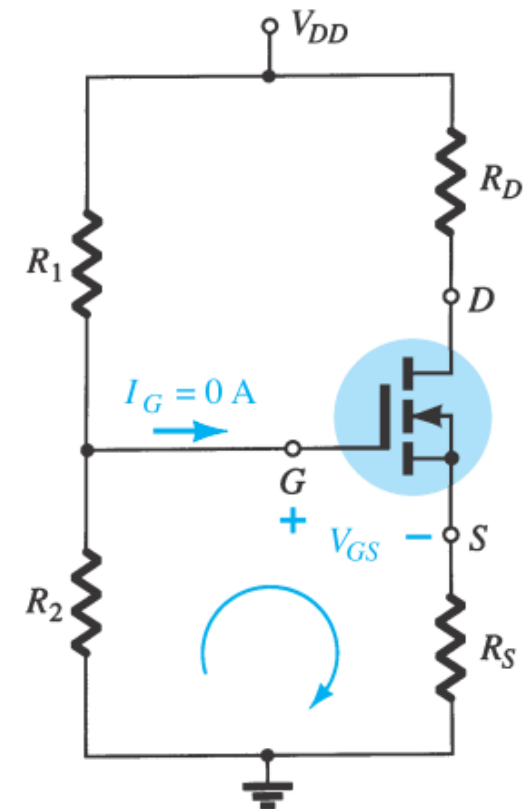


Transistor Efeito de Campo (MOSFET) (Configuração de Polarização Por Divisor de Tensão)

Análise DC:

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

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



Transistor Efeito de Campo (MOSFET) (Configuração de Polarização Por Divisor De Tensão)

Análise DC:

A aplicação da Lei das Tensões de Kirchhoff ao longo da malha indicada na Figura ao lado resulta em:

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

e

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

ou

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

Para a seção de saída,

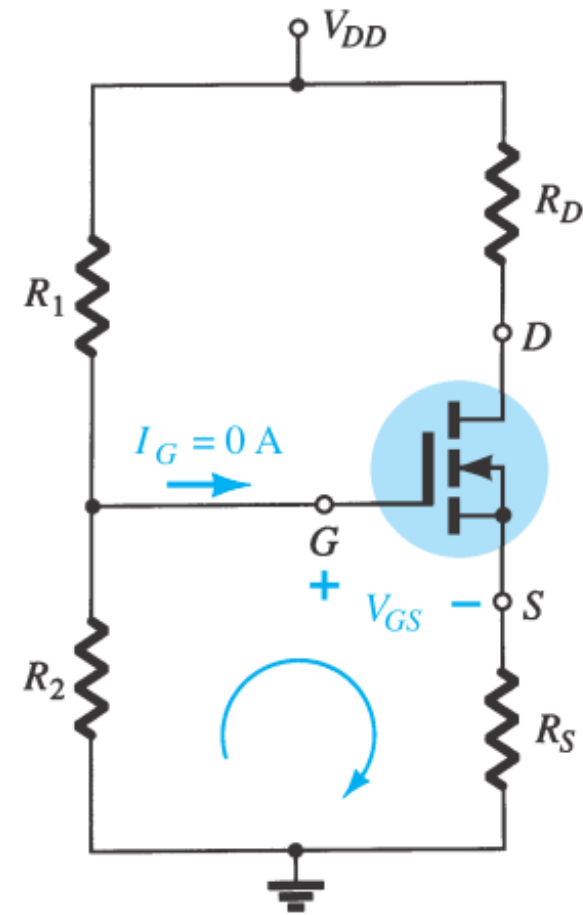
$$V_{RS} + V_{DS} + V_{RD} - V_{DD} = 0$$

e

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

ou

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

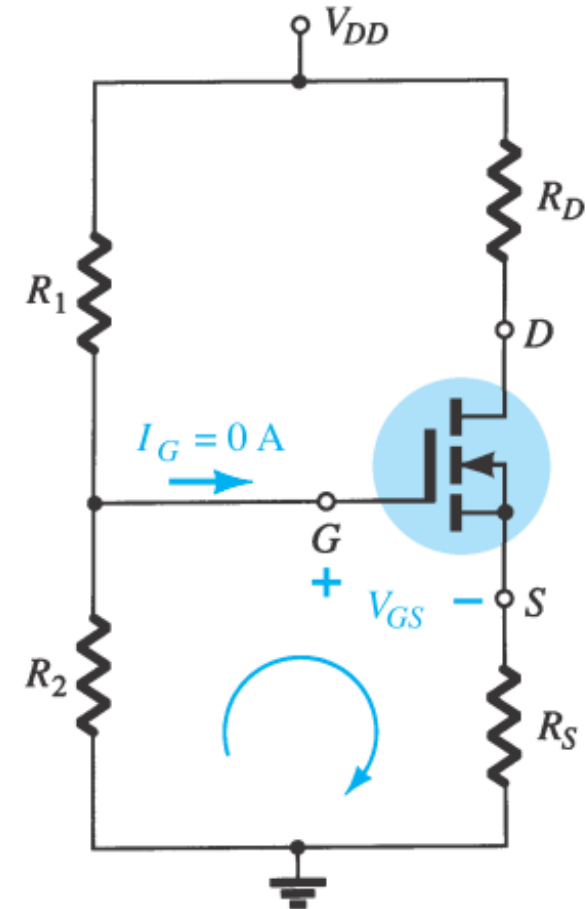


Transistor Efeito de Campo (MOSFET) (Configuração de Polarização Por Divisor De Tensão)

Visto que a curva característica de transferência representa um gráfico de I_D versus V_{GS} e a Equação:

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

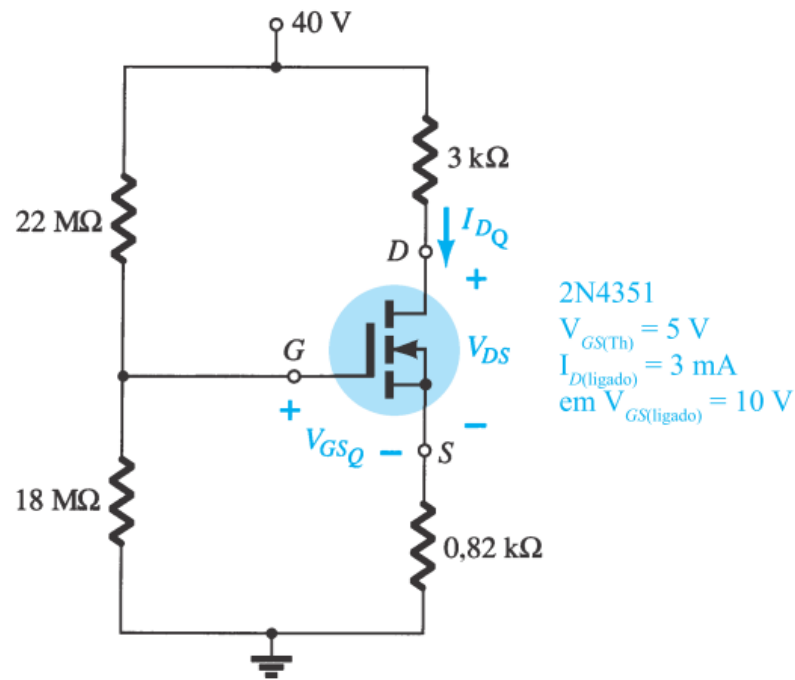
relaciona as mesmas duas variáveis, as duas curvas podem ser traçadas no mesmo gráfico e a solução pode ser determinada na interseção. Uma vez que I_{DQ} e V_{GSQ} são conhecidos, os demais parâmetros do circuito, como V_{DS} , V_D e V_S , podem ser determinados.



MOSFET

(Exemplo)

1- Determine I_{DQ} , V_{GSQ} e V_{DS} para o circuito da Figura abaixo.:



MOSFET

(Exemplo)

Solução:

Circuito.

Da equação abaixo:

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

Tem-se

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

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

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

Da equação abaixo:

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

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

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

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

Quando $V_{GS} = 0 \text{ V}$,

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

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

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

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

$$I_D = 18 \text{ V} / 0,82 \text{ k}\Omega$$

$$I_D = 21,95 \text{ mA}$$

MOSFET

(Exemplo)

Solução:

Dispositivo.

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

$$V_{GS(ligado)} = 10 \text{ V}$$

Da equação abaixo:

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

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

e

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

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

que é traçado no gráfico abaixo:

$$I_{DQ} \cong 6,7 \text{ mA}$$

$$V_{GSQ} = 12,5 \text{ V}$$

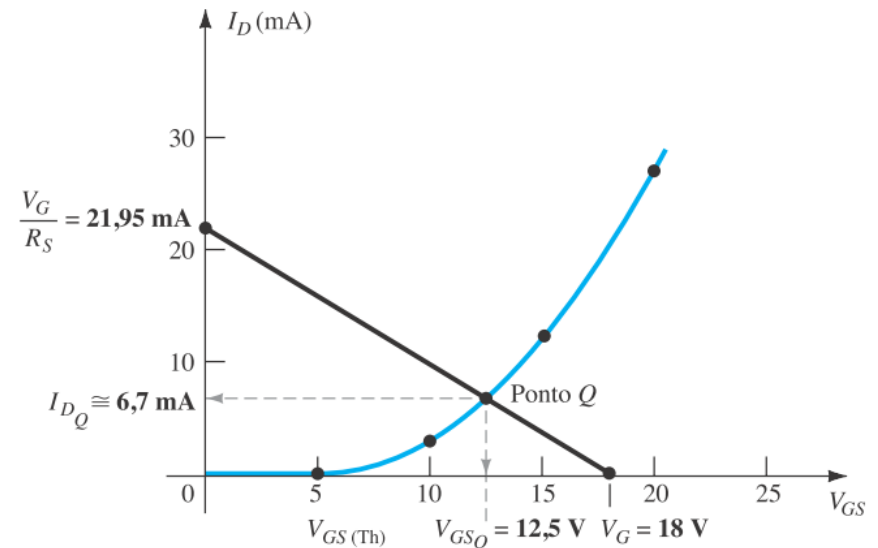
Da equação abaixo:

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

$$V_{DS} = 40 \text{ V} - (6,7 \text{ mA})(0,82 \text{ k}\Omega + 3,0 \text{ k}\Omega)$$

$$V_{DS} = 40 \text{ V} - 25,6 \text{ V}$$

$$V_{DS} = 14,4 \text{ V}$$



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.

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 .

