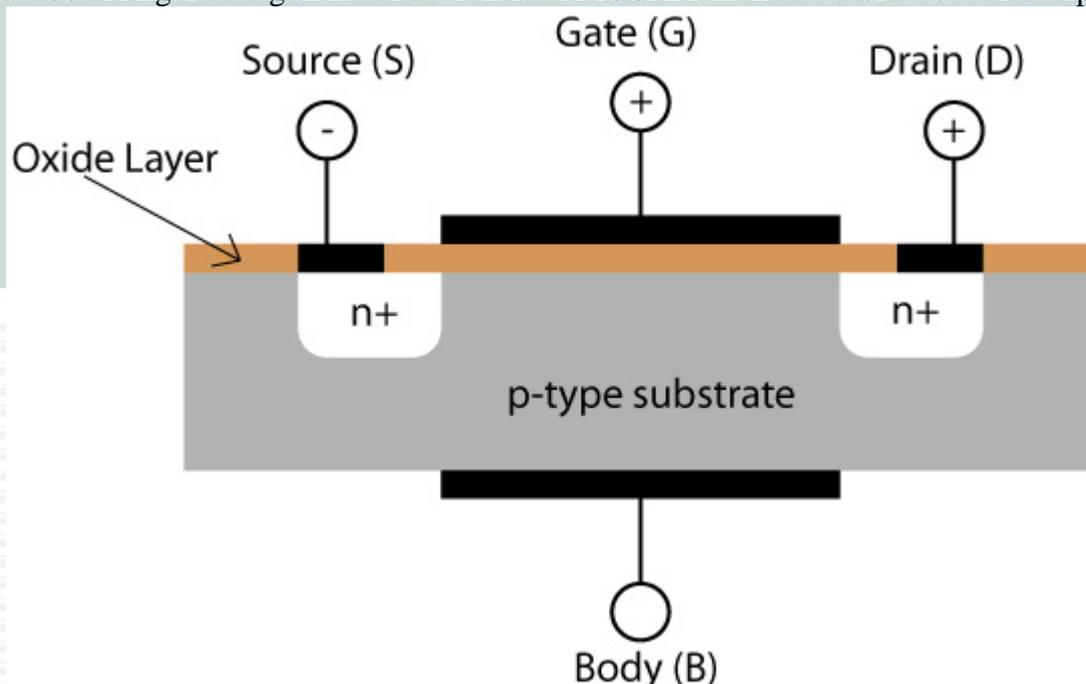


MÓDULO 7: MOSFET – TECNOLOGIA, POLARIZAÇÕES E APLICAÇÕES.

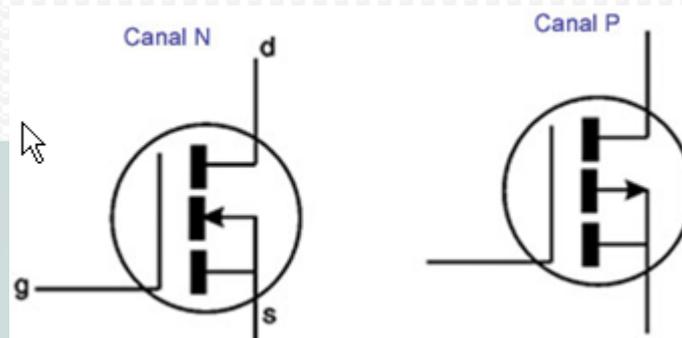
Introdução: O dispositivo de efeito de campo construído com a tecnologia MOS (metal oxide surface) no início dos anos 60 veio para substituir ou preencher as lacunas deixadas pela tecnologia bipolar. Sua grande facilidade na construção e as facilidades na polarização e construção dos circuitos fizeram com que essa tecnologia rapidamente ocupasse o lugar dos bipolares. Foi responsável direto na mudança na escala de integração dos circuitos integrados de média escala com os bipolares para alta escala e assim por diante. A densidade de transistores cresceu significativamente nos circuitos integrados permitindo a realização de circuitos mais complexos até os microprocessadores. A sua tecnologia é apresentada a seguir e os MOSFETs podem ser do tipo depleção ou intensificação. No modo depleção o MOSFET é semelhante ao JFET, com a diferença na característica dinâmica do dispositivo, sendo que o JFET apresenta máxima corrente quando V_{GS} igual a zero e no modo depleção a tensão V_{GS} é bipolar e a curva $I_D \times V_{GS}$ com V_{GS} positivo, a corrente cresce conforme é apresentada a seguir na sua curva característica. Na fabricação dos transistores MOSFETs, assim como os bipolares podem ser dos tipos canal N ou canal P (semelhante ao PNP e NPN nos bipolares).

TECNOLOGIA MOSFET CANAL N – MODO DEPLEÇÃO TRANSISTOR POR EFEITO DE CAMPO – MOS

Introdução: A tecnologia do transistor por efeito de campo conhecido como MOSFET, onde MOS quer dizer “metal oxide surface”, a superfície coberta por uma fina camada de óxido de silício é mostrada a seguir. São dois tipos de transistores MOSFET, chamado de depleção e intensificação. A construção do transistor MOSFET canal N é feita partindo-se de uma pastilha de silício de material tipo P que será o substrato. A seguir são feitas fortes dopagens com material tipo N+ em duas regiões. A seguir são feitas aberturas na camada de óxido nos pontos das regiões N+ para inserção dos terminais D e S respectivamente dreno e fonte. Um terceiro terminal é inserido sobre a camada de óxido para o terminal G porta. Um quarto terminal é inserido no substrato P chamado de SS. A figura a seguir mostra o transistor MOSFET montado sobre o substrato tipo P.



Para a construção do transistor MOSFET canal P e partindo-se do material N que será o substrato e da mesma forma que o MOSFET canal N são feitas fortes dopagens com material tipo P+. É feita a cobertura fina com óxido de silício e aberto dois canais para inserção dos terminais D e S. O terceiro terminal na porta G acima da camada de óxido é o quarto terminal no substrato N. Os transistores MOSFETs dos tipos canal N e canal P são representados por seus símbolos a seguir e o substrato SS de cada um é ligado ao terminal de fonte S. Em virtude da similaridade entre dreno e fonte os terminais D e S são escolhidos.



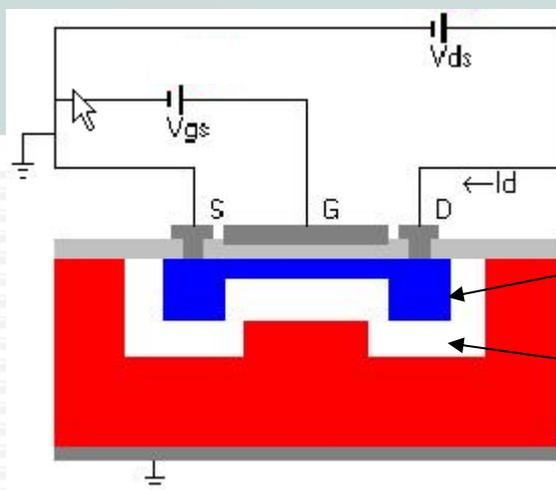
OPERAÇÃO DO TRANSISTOR MOSFET CANAL N

Operação do MOSFET: O substrato deve ter uma polarização reversa, a fim de que nenhuma corrente circule entre a fonte e o substrato, o qual deve ter o potencial mais baixo. Com a tensão $V_{SS} = 0$ então todas as tensões serão relacionadas à fonte. Quando $V_{GS} > V_{TH}$ há a criação de um canal de corrente se $V_{DS} > 0$.

Um transistor MOSFET pode operar como vimos em três regiões de trabalho, dependendo das tensões aplicadas sobre seus terminais. Para o MOSFET canal N os modos são:

1. Região de Corte: Quando $V_{gs} < V_{th}$

onde V_{GS} é a tensão entre a porta (gate) e a fonte (source) e V_{TH} é a tensão de (threshold) limiar de condução do dispositivo. O transistor neste estado não há condução de corrente entre o dreno e a fonte.



$V_{GS} > V_{THN} \rightarrow$ Formação do canal N

Região Depleção
 $I_D > 0$ se $V_{DS} > 0$

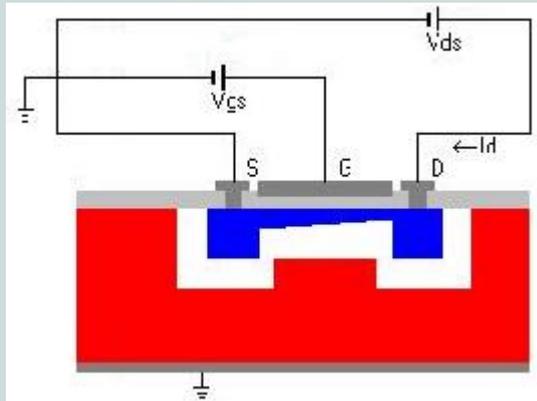
2. Região de triodo (ou região linear): quando $V_{GS} > V_{TH}$ e $V_{DS} < (V_{GS} - V_{TH})$ onde V_{DS} é a tensão entre dreno e fonte.

O transistor é polarizado positivamente $V_{DS} > 0$ e no estado de condução o canal entre dreno e fonte permite um fluxo de corrente entre o dreno e a fonte. O MOSFET opera como um resistor variável, controlado pela tensão na porta. A corrente I_D do dreno para a fonte é:

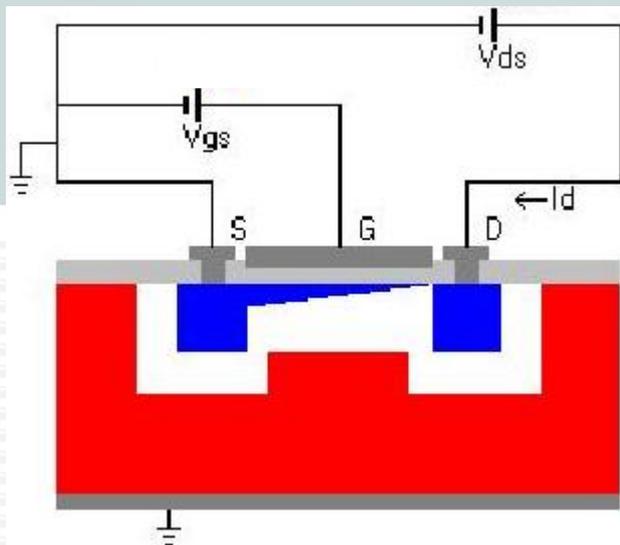
$$I_D = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2L} (2(V_{GS} - V_{th})V_{DS} - V_{DS}^2)$$

onde μ_n é mobilidade efetiva dos portadores de carga, W é a largura da porta, L é o comprimento da porta, C_{OX} é a capacitância do óxido da porta por unidade de área

Quando $V_{DS} < (V_{GS} - V_{TH})$ então o transistor opera na região ôhmica. A tensão de dreno responsável pela inversão ($V_{GS} - V_{TH}$) é assim menor do que próxima à fonte. O canal age como um resistor linear.



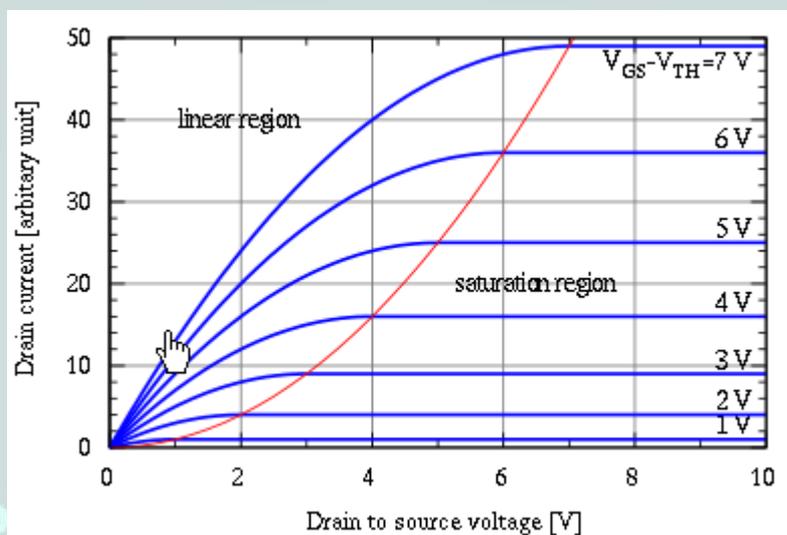
Quando $(V_{GS} - V_{TH})$ é igual a tensão de “estrangulamento” (pinch-off), não existe potencial no dreno para induzir a camada de inversão.



3. Região de Saturação: quando $V_{gs} > V_{th}$ e $V_{ds} > V_{gs} - V_{th}$. O transistor fica ligado, e um canal que é criado permite o fluxo de corrente entre o dreno e a fonte. Como a tensão de dreno é maior do que a tensão na porta, uma parte do canal é desligado. A criação dessa região é chamada de estrangulamento (pinch-off). A corrente de dreno é agora relativamente independente da tensão de dreno (numa primeira aproximação) e é controlada somente pela tensão da porta de tal forma que:

$$I_D = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2 L} (V_{GS} - V_{th})^2$$

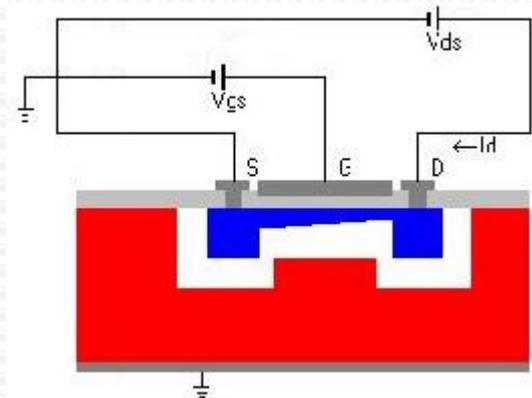
Em [circuitos digitais](#), os MOSFETs são usados somente em modos de corte e de saturação. O modo de triodo é usado em aplicações de [circuitos analógicos](#).



Quando $V_{GS} > V_{th}$ and $V_{DS} \geq (V_{GS} - V_{th})$ O dispositivo está ligado, e um canal foi criado, o que permite o fluxo de corrente entre o dreno e fonte. Uma vez que a tensão de dreno é maior do que a tensão da porta, os elétrons se espalham para fora, não através de um canal estreito. O aparecimento desta região é também conhecida como “pinch-off” para indicar a ausência da região perto do canal de escoamento. A corrente de dreno é agora fracamente dependente da tensão de dreno e controlada principalmente pela tensão porta-fonte, e modelada aproximadamente como:

$$I_D = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2 L} (V_{GS} - V_{th})^2 (1 + \lambda(V_{DS} - V_{DSsat})) .$$

Verifica-se que quando se aumenta V_{DS} o estrangulamento se move em direção à fonte. A figura a seguir mostra o estrangulamento do dreno e os elétrons vindos da fonte, quando alcançam o estrangulamento eles são injetados na zona de depletada e são empurrados para estrangular no dreno.



O fator adicional envolvendo λ , o parâmetro de modulação do canal de comprimento, os modelos de dependência atual na tensão de dreno, devido ao efeito precoce, ou modulação de comprimento de canal. De acordo com esta equação, um parâmetro chave de concepção, a transcondutância MOSFET é:

$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} = \frac{2I_D}{V_{GS} - V_{th}} = \frac{2I_D}{V_{ov}}$$

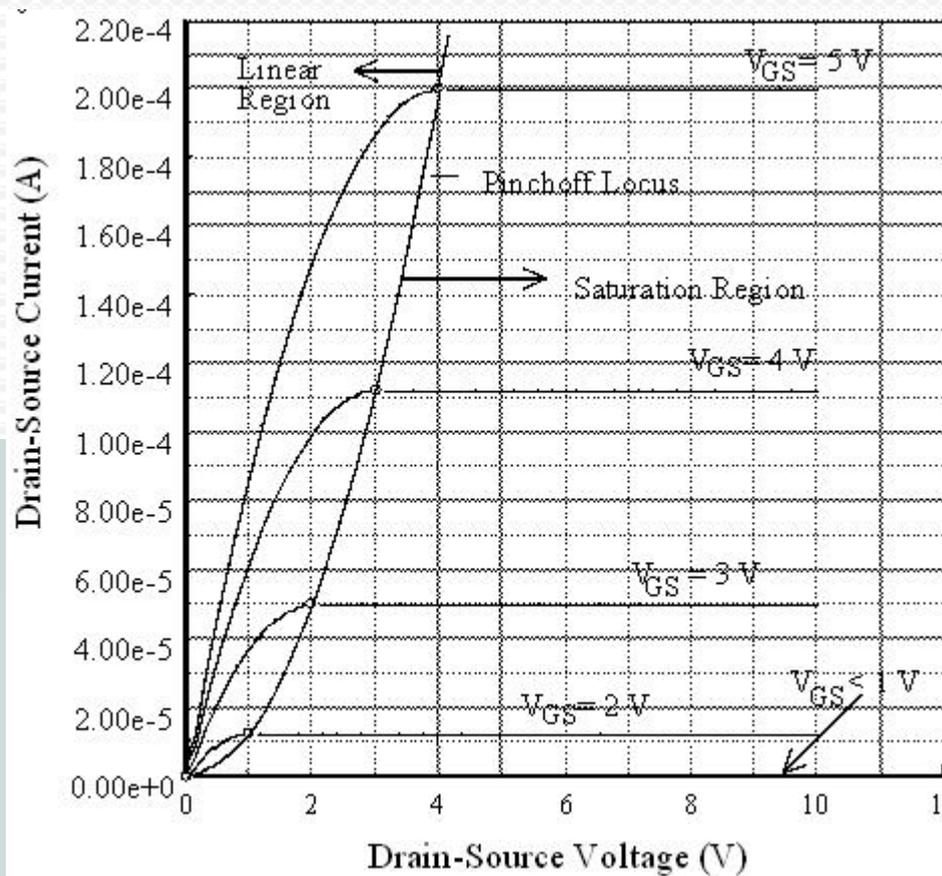
em que a combinação $V_{DS} = V_{GS} - V_{TH}$ é chamado a tensão de constrição, e onde $V_{DSSAT} = V_{GS} - V_{TH}$ é responsável por uma pequena descontinuidade na qual, de outro modo aparece na zona de transição entre as regiões de triodo e saturação.

Outro parâmetro fundamental do projeto é a saída MOSFET derrota resistência de saída r_{out} :

$$r_{out} = \frac{1}{\lambda I_D} \quad g_{DS} = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{DS}}$$

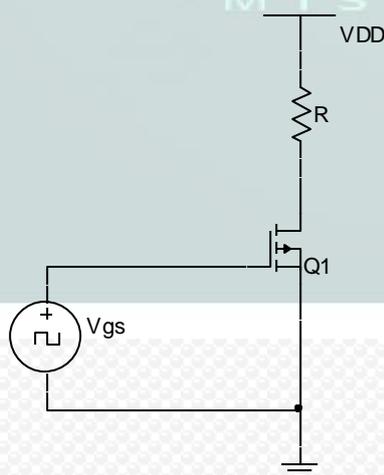
onde r_{out} é o inverso de g_{DS} e onde I_D é a expressão da região de saturação.

Curva característica do MOSFET canal N nas regiões linear, estrangulamento e de saturação com $V_{TH} = 1V$



Cálculo da polarização do MOSFET operando como um transistor como chave.

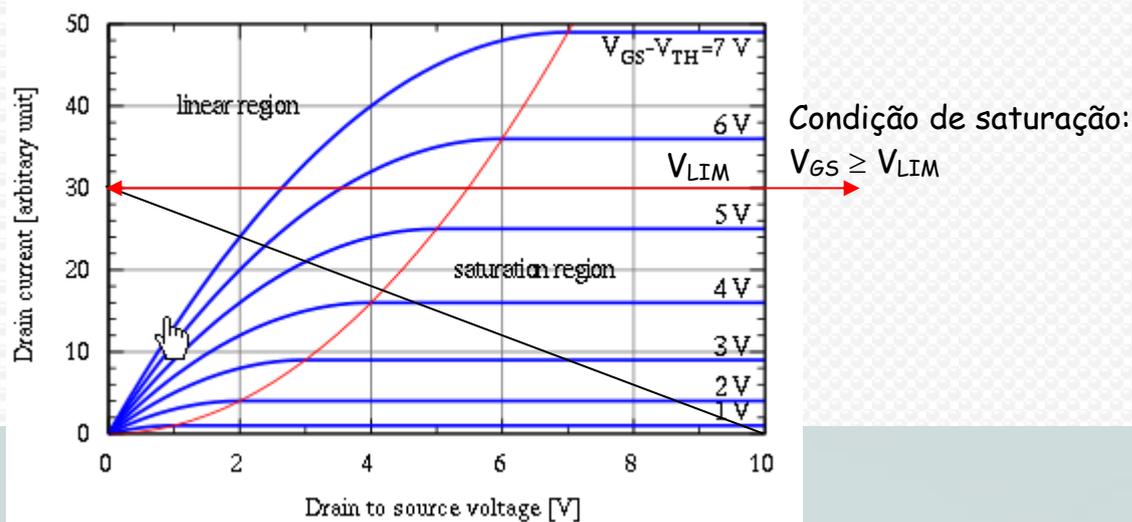
a. Reta de carga. Para traçar a reta de carga de um MOSFET como chave, vamos ao circuito.



A corrente I_{DSAT} , pode ser calculada como:

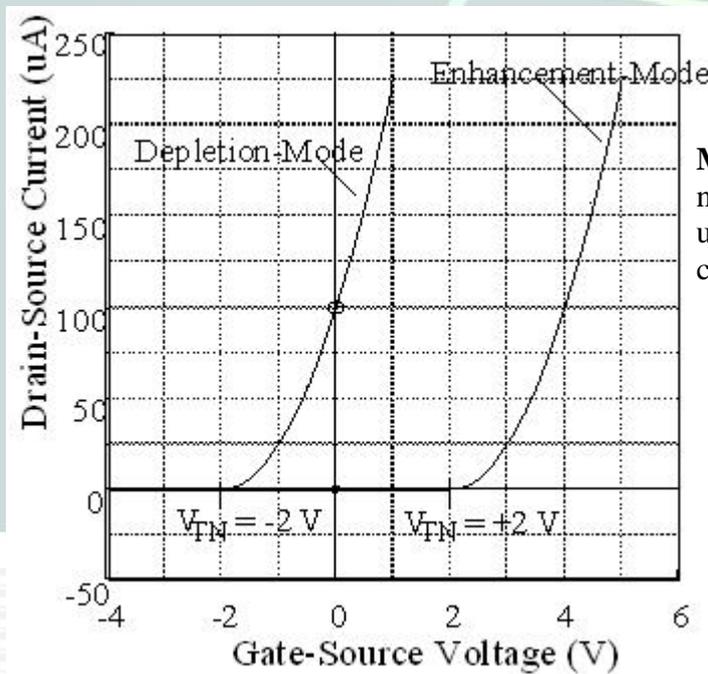
$$I_D = (V_{DD} - V_{DSSAT})/R \text{ e } V_{GS} = V_{GSSAT}.$$

A curva característica do transistor MOSFET: $I_D \times V_{DS} (V_{GS})$.



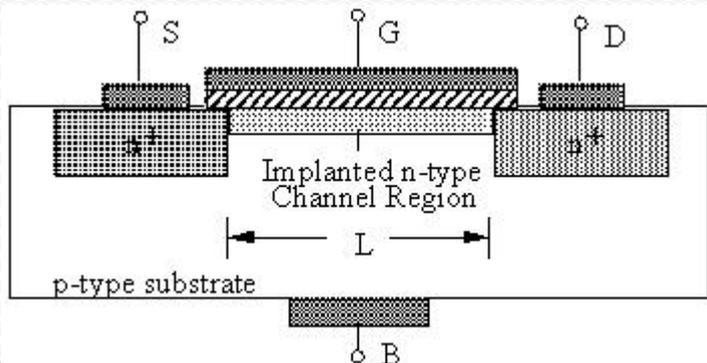
CURVA DE TRANSFERÊNCIA MODOS DEPLEÇÃO E INTENSIFICAÇÃO

A curva característica de um MOSFET $I_D \times V_{GS}$ com a tensão positiva entre dreno e fonte $V_{DS} > 0$, mostra que um MOSFET modo depleção canal N pode operar conforme a seguir. A figura a seguir mostra a curva de transferência do MOSFET.

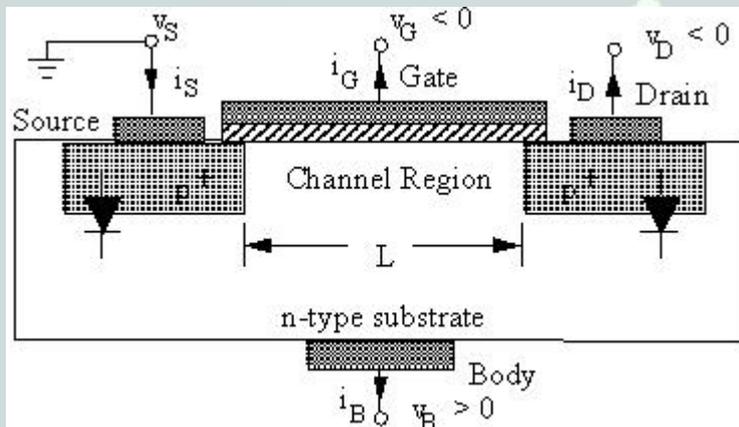


Modo Depleção – Os Ions+ são implantados no canal formado entre dreno e fonte e para uma tensão de $V_{GS} = 0$ há uma corrente de condução do transistor entre dreno e fonte.

A seguir apresentamos a estrutura do MOSFET canal N modo depleção.



Para o canal P a estrutura do MOSFET.



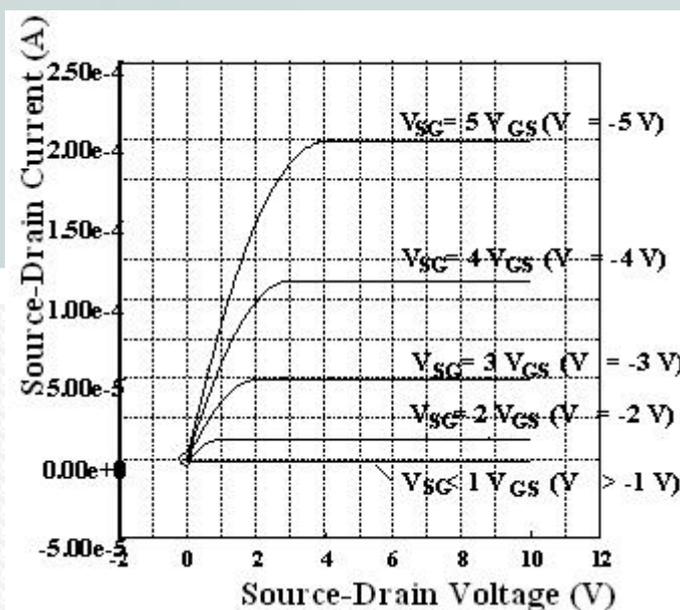
Modo Depleção:

NMOS $\rightarrow V_{TH} < 0$ PMOS $\rightarrow V_{TH} > 0$.

Modo Intensificação:

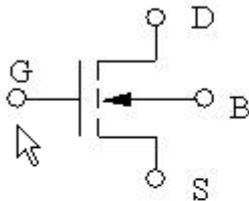
NMOS $\rightarrow V_{TH} > 0$ PMOS $\rightarrow V_{TH} < 0$.

A curva característica do transistor MOSFET canal P é mostrada a seguir.

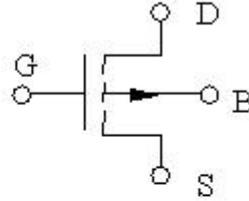


SÍMBOLOS PADRÕES PARA O MOSFET MODOS DEPLEÇÃO E INTENSIFICAÇÃO.

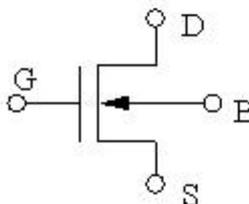
Para o reconhecimento do modo de operação de um MOSFET, um padrão de símbolo foi criado IEEE. Para o modo depleção e intensificação a diferença está entre no traço entre dreno e fonte contínua no modo depleção e pontilhado no modo intensificação. O quarto terminal referente ao substrato SS pode estar disponível para qualquer um dos módulos do transistor, daí será um MOSFET de quatro terminais. Os MOSFET de três terminais o substrato SS é interligado internamente no terminal fonte e daí será im MOSFET de três terminais. A seguir apresentamos os símbolos IEEE standard para os MOSFETs depleção e intensificação de três e quatro terminais,



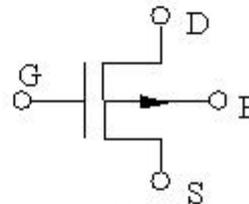
(a) NMOS enhancement-mode device



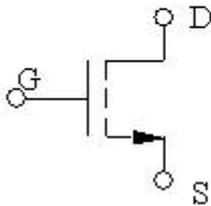
(b) PMOS enhancement-mode device



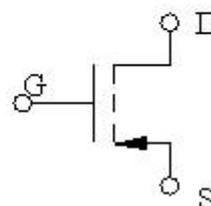
(c) NMOS depletion-mode device



(d) PMOS depletion-mode device



(e) Three-terminal NMOS transistor



(f) Three-terminal PMOS transistor

Equações MOSFET	
Canal N	Canal P
Corte	
$V_{GS} < V_{THN}$ $I_D = 0$	$V_{SG} < V_{THP}$ $I_D = 0$
Região Ativa	
$V_{GS} > V_{THN}$ $V_{DS} \leq (V_{GS} - V_{THN})$ $I_{D \rightarrow S} = K_N (V_{GS} - V_{THN} - V_{DS}/2) V_{DS}$	$V_{GS} < V_{THP}$ $V_{DS} \geq (V_{GS} - V_{THP})$ $I_{S \rightarrow D} = K_P (V_{GS} - V_{THP} - V_{DS}/2) V_{DS}$
Região Saturação	
$V_{GS} > V_{THN}$ $V_{DS} \geq (V_{GS} - V_{THN})$ $I_{D \rightarrow S} = K_N/2 (V_{GS} - V_{THN})^2 (1 - \lambda V_{DS})$	$V_{GS} < V_{THP}$ $V_{DS} \leq (V_{GS} - V_{THP})$ $I_{S \rightarrow D} = K_P/2 (V_{GS} - V_{THP})^2 (1 - \lambda V_{DS})$

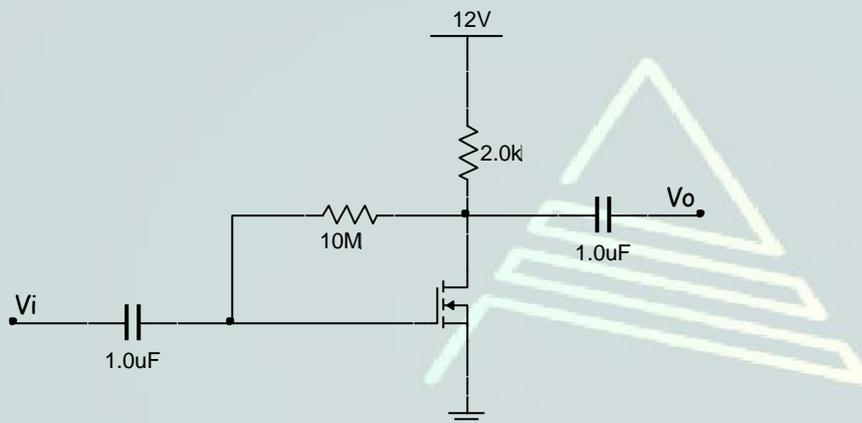
Na saturação no modo intensificação a tensão pode ser escrita como:

$V_{DS} = V_{GS} - V_T$, onde V_T é a tensão de limiar de condução. Da curva a seguir a parábola indica os lugares geométricos de V_{DS} início da saturação. Como V_{GS} aumenta então $V_{GS} > V_T$ e observando a curva, temos a seguinte relação.

$I_D = K(V_{GS} - V_T)^2$, onde K é uma constante e uma característica do dispositivo e pode ser determinado pela expressão a seguir.

$$K = I_{D\text{ligado}} / (V_{GS} - V_T)^2 \text{ e } I_{D\text{ligado}}$$

Método gráfico para determinação do ponto quiescente do circuito a seguir.



1. Traçar a curva do transistor $I_D \times V_{GS}$ utilizar a equação $I_D = K(V_{GS} - V_{TH})^2$;
2. Traçar a reta de carga: $V_{GS} = V_{DD} - R_D I_D$;
3. O ponto de cruzamento entre as duas curvas é o ponto Q de trabalho e retirar I_D e V_{GS} .

Método algébrico

$$I_D = K(V_{GS} - V_{TH})^2 \Rightarrow I_D/K = V_{GS}^2 - 2V_{GS}V_{TH} + V_{TH}^2$$

$$V_{GS} = V_{DD} - R_D I_D \Rightarrow I_D/K = (V_{DD} - R_D I_D)^2 - 2(V_{DD} - R_D I_D)V_{TH} + V_{TH}^2$$

$$R_D^2 I_D^2 - 2R_D (V_{DD} - V_{TH} + 1/(2R_D K)) I_D + (V_{DD} - V_{TH})^2 = 0$$

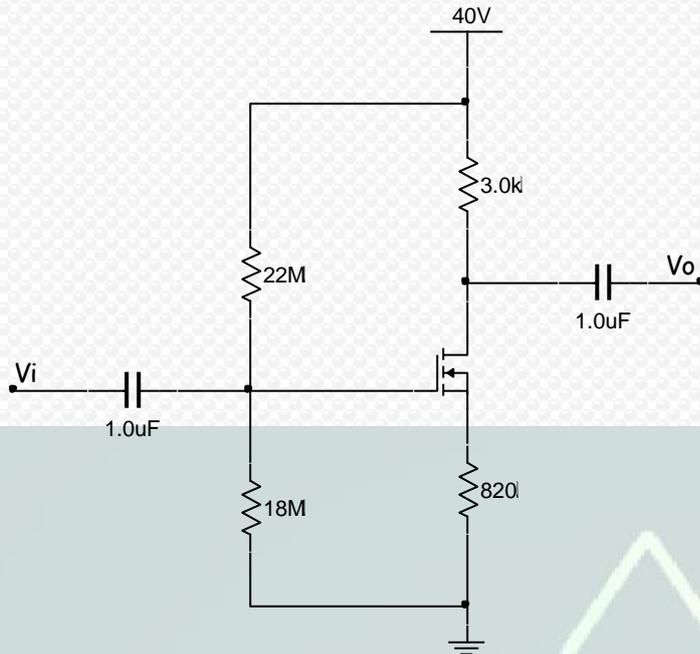
$$A = R_D^2 \quad B = -2R_D (V_{DD} - V_{TH} + 1/(2R_D K)) \quad \text{e} \quad C = (V_{DD} - V_{TH})^2$$

A solução tem duas raízes em I_D e escolher a menor entre as raízes. Uma vez determinada a raiz solução determinar a tensão V_{GS} e o ponto Q estará determinado.

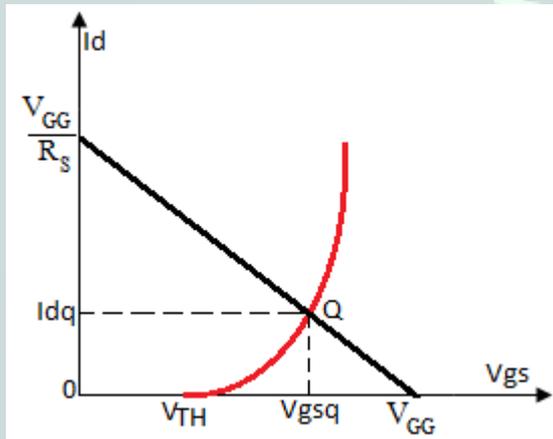
Método gráfico para determinação do ponto quiescente do circuito a seguir.

Para o divisor de tensão: $V_{GS} = V_{GG} - R_S I_D$ e $V_{GG} = V_{DD} R_{B2}/(R_{B1} + R_{B2})$.

Seguir o procedimento usado anteriormente no item 1 e no item 2 a reta de carga usar $V_{GS} = V_{GG} - R_S I_D$



A curva $I_D \times V_{GS}$ para o divisor de tensão.



Método algébrico

$$I_D = K(V_{GS} - V_{TH})^2 \Rightarrow I_D/K = V_{GS}^2 - 2V_{GS}V_{TH} + V_{TH}^2$$

$$V_{GS} = V_{GG} - R_S I_D \Rightarrow I_D/K = (V_{GG} - R_S I_D)^2 - 2(V_{GG} - R_S I_D)V_{TH} + V_{TH}^2$$

$$R_S^2 I_D^2 - 2R_S (V_{GG} - V_{TH} + 1/(2R_S K)) I_D + (V_{GG} - V_{TH})^2 = 0$$

$$A = R_S^2 \quad B = -2R_S (V_{GG} - V_{TH} + 1/(2R_S K)) \quad \text{e} \quad C = (V_{GG} - V_{TH})^2$$

A Transcondutância g_m

$$g_m = \partial I_D / \partial V_{GS} \Rightarrow g_m = 2K(V_{GS} - V_{TH})$$

O ganho do circuito A_v

$$A_v \cong -g_m R_D$$

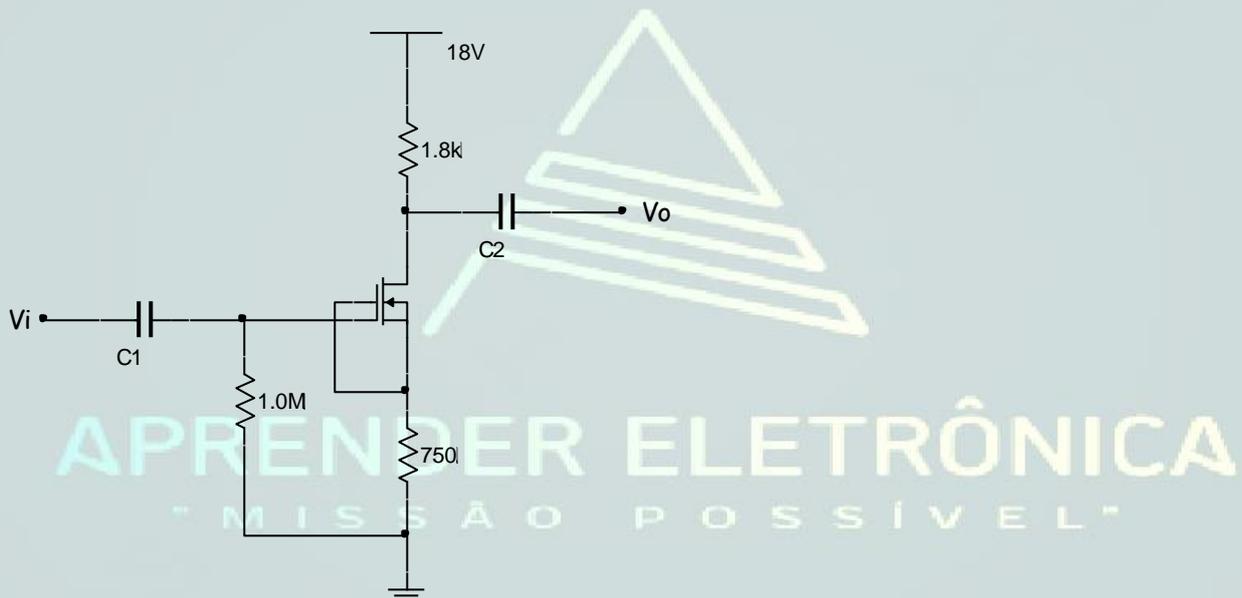
A impedância de entrada e saída.

$$Z_{IN} = 1/(1 + g_m R_D)$$

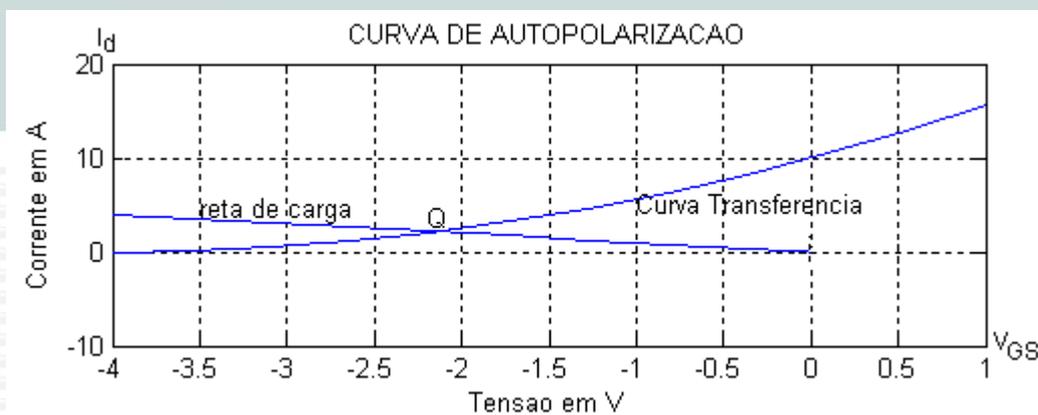
$$Z_0 = R_D$$

EXEMPLO: Determinar para o amplificador a MOSFET modo depleção?

- O ponto quiescente Q (I_d , V_{gs}).
- A tensão V_{ds} .



- A reta de carga é mostrada a seguir.



- Do gráfico retiramos o valor de Q(2,5mA, -2,3V)

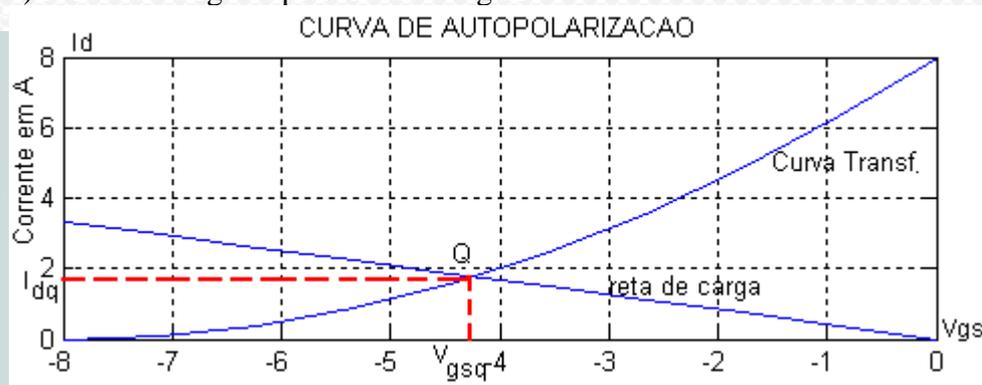
- A tensão $V_{DS} = V_{dd} - R_D I_D = 18 - 1,8K \times 2,5mA = 13,5V$

EXEMPLO: Para o circuito a transistor MOSFET canal N no modo depleção, autopolarização, são dados: $R_S = 2,4K$, $I_{DSS} = 8mA$, $V_P = -8V$ e $R_D = 6,2K$, pede-se:

- Traçar a reta de carga do circuito.
- Calcular o ponto Q de polarização.
- Calcular o valor de V_{DS} .

Resposta:

- A reta de carga é apresentada a seguir.



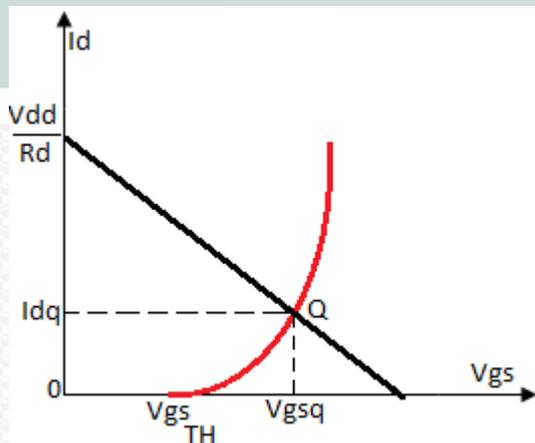
- No modo gráfico, o ponto Q(1,7mA, 4,3V).

- $V_{DS} = 7,46V$.

EXEMPLO: Pela curva do transistor MOSFET canal N no modo intensificação, pede-se:

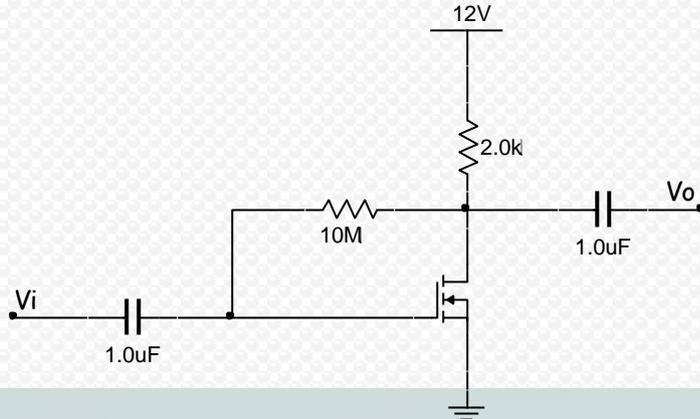
- Traçar a reta de carga do circuito.
- Calcular o ponto de polarização.
- Calcular o valor de K.

- A reta de carga é apresentada a seguir.

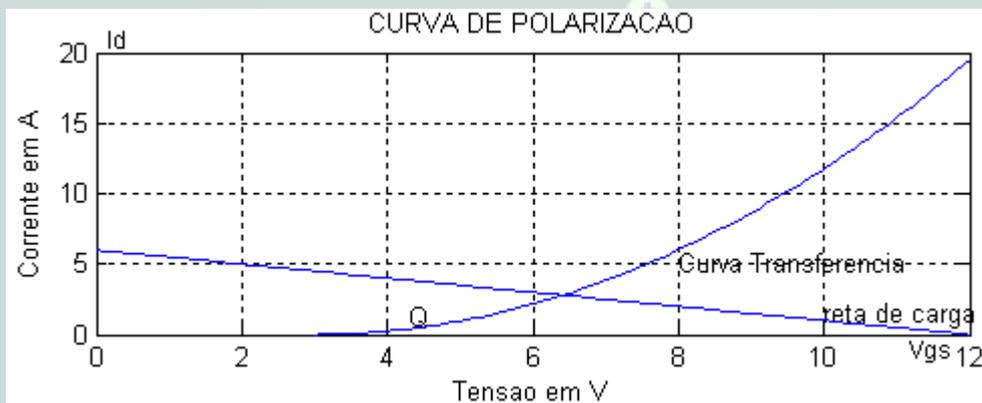


- O ponto Q quiescente retirar do gráfico.

c) $K = I_{DON}/(V_{GSON} - V_T)^2$ e $I_D = k(V_{GSON} - V_T)^2$.



a) Para o circuito a reta de carga a seguir.



b) O ponto Q(2,75mA,6,4V).

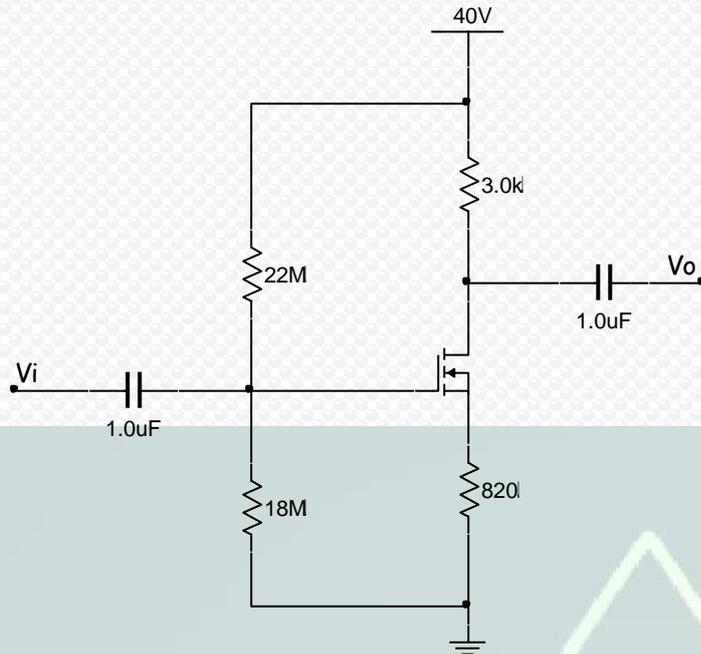
$V_{GSq} = V_{DSq} = 6,4V$.

EXEMPLO: Determinar graficamente para o circuito a MOSFET intensificação, o divisor de tensão, o ponto de trabalho do circuito. Pede-se:

a) O ponto Q (I_D, V_{GS});

b) A tensão V_{DS} .

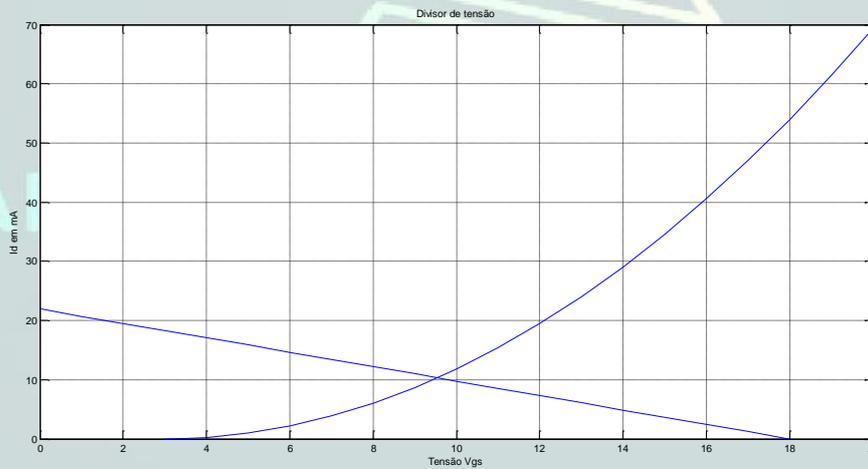
Dados: $V_{GSTH} = 5V$, $I_{DON} = 3mA$ em $V_{GSON} = 10V$.



1. Tensão na porta $V_G = 40 \cdot 18M / (22M + 18M) = 18V$.

$V_{GS} = V_{GG} - R_S I_D = 18 - 0.82K \cdot I_D$.

a) A reta de carga é apresentada a seguir.

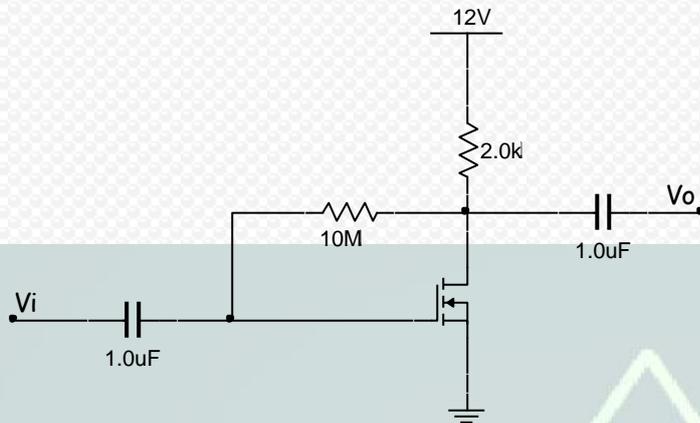


b) O ponto Q de polarização é igual Q(10,3mA, 9,55V).

c) $V_{DS} = 40 - 10,3(0.82K + 3,0) = 0,654V$.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

Responda as questões de 1 a 4 referentes aos dados e figura a seguir: Dados MOSFET $V_{DD} = 12V$, $K = 0,24 \times 10^{-3} A/V^2$, $V_{GSQ} = 6,4V$ e $V_{GSOFF} = 3V$.



1.o Exercício: Determinar o valor de g_m , sabendo-se que $V_{GSQ} = 6,4V$.

- a) $g_m = 1,63mS$
- b) $g_m = 1,47mS$
- c) $g_m = 1,87mS$
- d) $g_m = 2,15mS$
- e) $g_m = 3,08mS$

Resposta: a

2.o Exercício: Determinar o valor do ganho

- a) $A_V = - 2,55$
- b) $A_V = - 3,26$
- c) $A_V = - 2,15$
- d) $A_V = - 3,16$
- e) $A_V = - 3,36$

Resposta: b

3.o Exercício: Determinar as impedâncias de entrada e saída.

- a) $Z_{IN} = 3,03M\Omega$ e $Z_{OUT} = 2K$
- b) $Z_{IN} = 2,27M\Omega$ e $Z_{OUT} = 2K$
- c) $Z_{IN} = 2,34M\Omega$ e $Z_{OUT} = 2K$
- d) $Z_{IN} = 3,57M\Omega$ e $Z_{OUT} = 2K$
- e) $Z_{IN} = 3,16M\Omega$ e $Z_{OUT} = 2K$

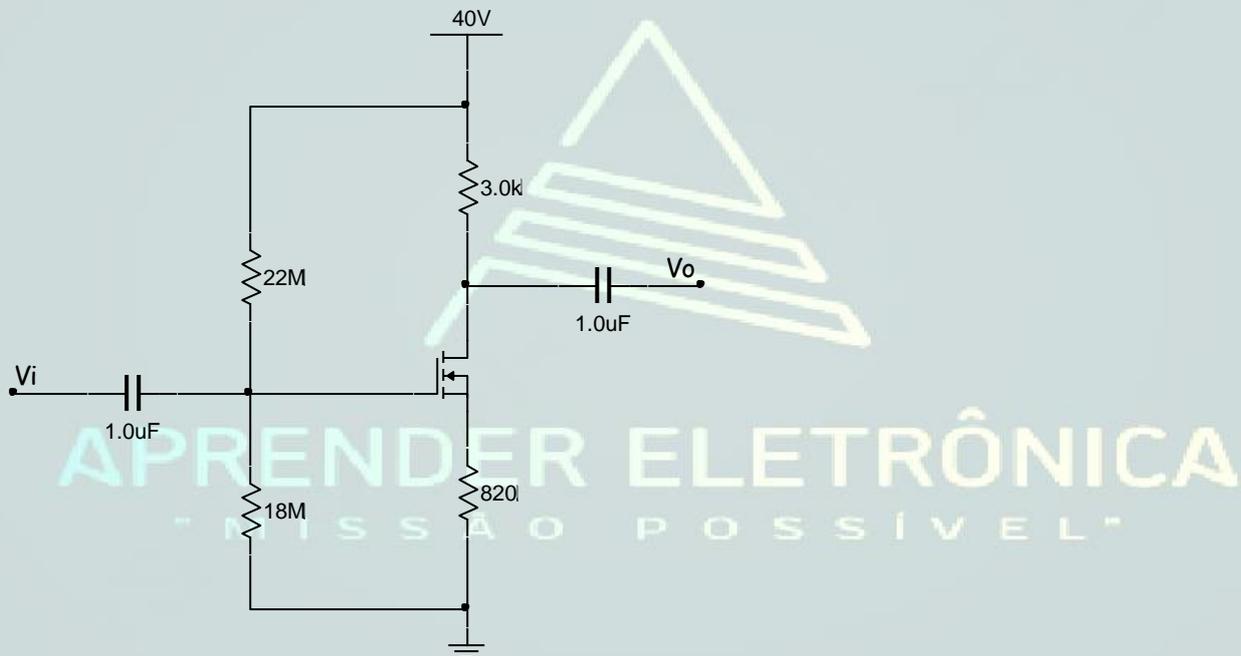
Resposta: c

4.o Exercício: Determinar a amplitude e sinal de saída do amplificador para um sinal aplicado a entrada do circuito $v(t) = 3\text{sen}(1000t)$.

- a) $V_{\text{SAÍDA}} = - 8,25\text{V}$
- b) $V_{\text{SAÍDA}} = - 6,25\text{V}$
- c) $V_{\text{SAÍDA}} = - 5,25\text{V}$
- d) $V_{\text{SAÍDA}} = - 9,78\text{V}$
- e) $V_{\text{SAÍDA}} = - 7,25\text{V}$

Resposta: d

As questões de 5 a 8 referem-se aos dados e figura a seguir. $V_{\text{TH}} = 3\text{V}$, $K = 0,082 \cdot 10^{-3} \text{ A/V}^2$
 $V_{\text{GSON}} = 12,22\text{V}$.



5.o Exercício: Determinar as impedâncias de entrada e saída.

- a) $Z_{\text{IN}} = 3,00\text{M}\Omega$ e $Z_{\text{OUT}} = 3\text{K}$
- b) $Z_{\text{IN}} = 1,00\text{M}\Omega$ e $Z_{\text{OUT}} = 3\text{K}$
- c) $Z_{\text{IN}} = 22,00\text{M}\Omega$ e $Z_{\text{OUT}} = 3\text{K}$
- d) $Z_{\text{IN}} = 18,00\text{M}\Omega$ e $Z_{\text{OUT}} = 3\text{K}$
- e) $Z_{\text{IN}} = 9,90\text{M}\Omega$ e $Z_{\text{OUT}} = 3\text{K}$

Resposta: e



Circuitos Eletrônicos

6.o Exercício: Determinar o ganho do circuito

- a) $A_V = - 7,55 \text{ V/V}$
- b) $A_V = - 4,53 \text{ V/V}$
- c) $A_V = - 6,15 \text{ V/V}$
- d) $A_V = - 3,26 \text{ V/V}$
- e) $A_V = - 9,36 \text{ V/V}$

Resposta: b

7.o Exercício: Determinar a tensão V_{DS} para uma corrente $I_{DQ} = 8,0\text{mA}$

- a) $V_{DS} = 9,44\text{V}$
- b) $V_{DS} = 9,84\text{V}$
- c) $V_{DS} = 6,24\text{V}$
- d) $V_{DS} = 8,56\text{V}$
- e) $V_{DS} = 7,15\text{V}$

Resposta: a

8.o Exercício: Determinar a tensão V_{GSQ} para $I_{DQ} = 8\text{mA}$.

- a) $V_{GSQ} = 10,56\text{V}$
- b) $V_{GSQ} = 5,15\text{V}$
- c) $V_{GSQ} = 11,44\text{V}$
- d) $V_{GSQ} = 9,36\text{V}$
- e) $V_{GSQ} = 10,36\text{V}$

Resposta: c

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.