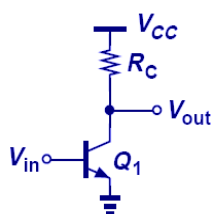


EE 530 Eletrônica Básica I

Física dos Transistores de Efeito de Campo (FET)

Prof. Pedro Xavier

CE Stage



A_v : elevado
 A_i : elevado
 R_{in} : média
 R_{out} : alta

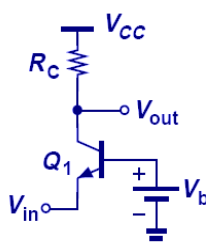
$$A_v = -g_m R_C$$

$$A_i = -\beta$$

$$R_{in} = r_\pi$$

$$R_{out} = R_C$$

CB Stage



A_v : elevado
 $A_i < 1$
 R_{in} : baixa
 R_{out} : alta

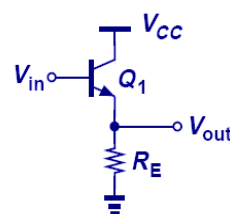
$$A_v = g_m R_C$$

$$A_i = \alpha$$

$$R_{in} \cong \frac{1}{g_m}$$

$$R_{out} = R_C$$

Follower



$A_v \leq 1$
 A_i : elevado
 R_{in} : muito alta
 R_{out} : muito baixa

$$A_v \approx \frac{R_E}{R_E + \frac{1}{g_m}}$$

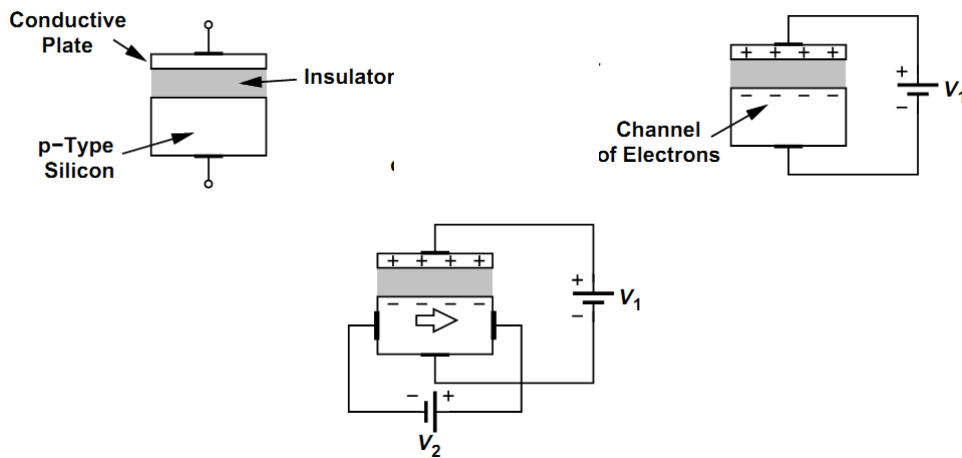
$$A_i = 1 + \beta$$

$$R_{in} = r_\pi + R_E(1 + \beta)$$

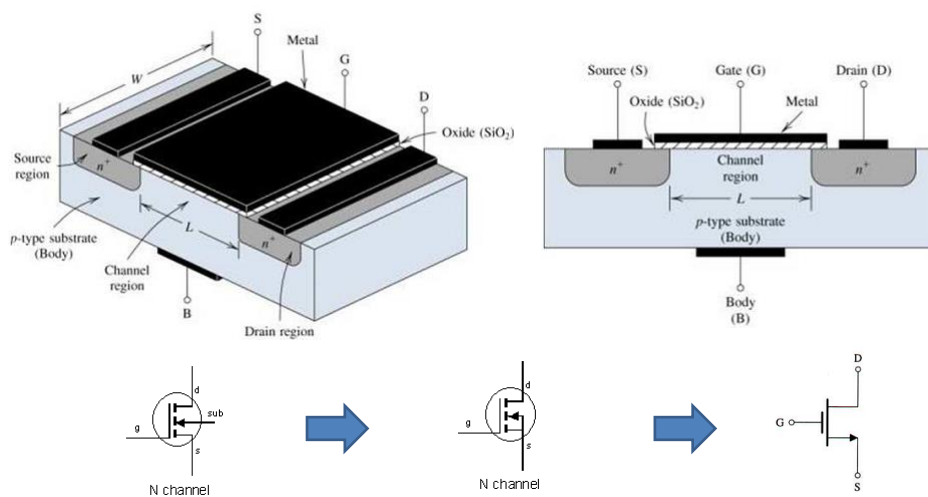
$$R_{out} \cong R_E \parallel \frac{1}{g_m}$$

Princípio de Funcionamento

- Metal-Oxide-Semiconductor (MOS) Capacitor

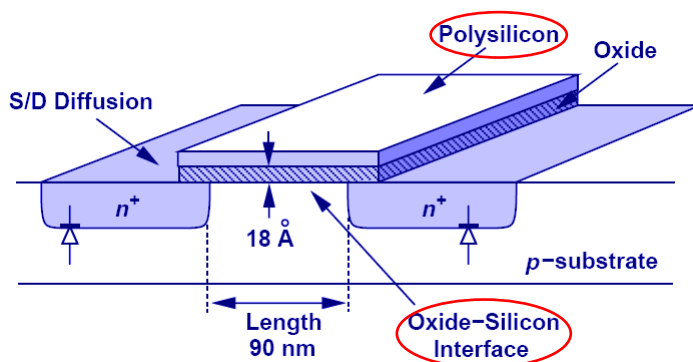


Estrutura e Símbolo (NMOS)



Prof. Pedro Xavier

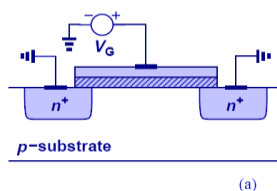
Estado da Arte



Prof. Pedro Xavier

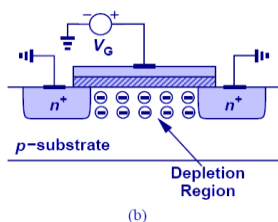
Análise Qualitativa

- A medida que V_G aumenta, a carga positiva da porta repele as lacunas, formando uma região de depleção.
- Se V_G aumentar mais, a carga positiva da porta atrai os elétrons, formando um canal condutor (MOSFET ligado).

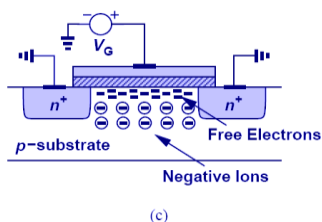


(a)

$I_G = 0$



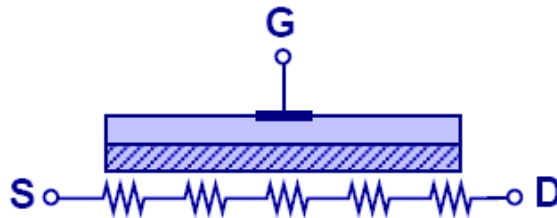
(b)



(c)

Análise Qualitativa

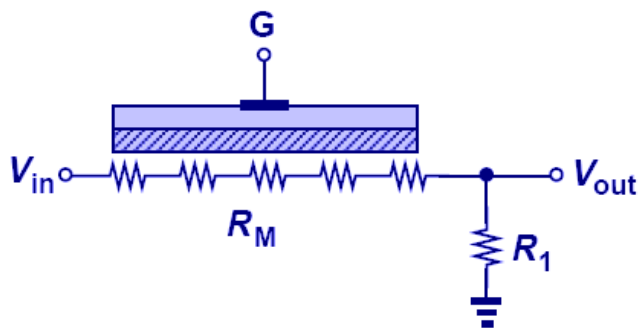
- O canal formado entre a fonte e o dreno funciona como uma resistência controlada por tensão (V_G), para V_{DS} pequeno. Quanto maior V_G , mais elétrons livres no canal e menor a resistência.



Prof. Pedro Xavier

Análise Qualitativa

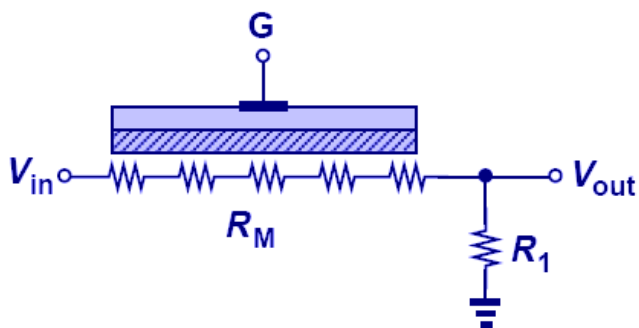
- EXEMPLO: Atenuador controlado por tensão



Prof. Pedro Xavier

Análise Qualitativa

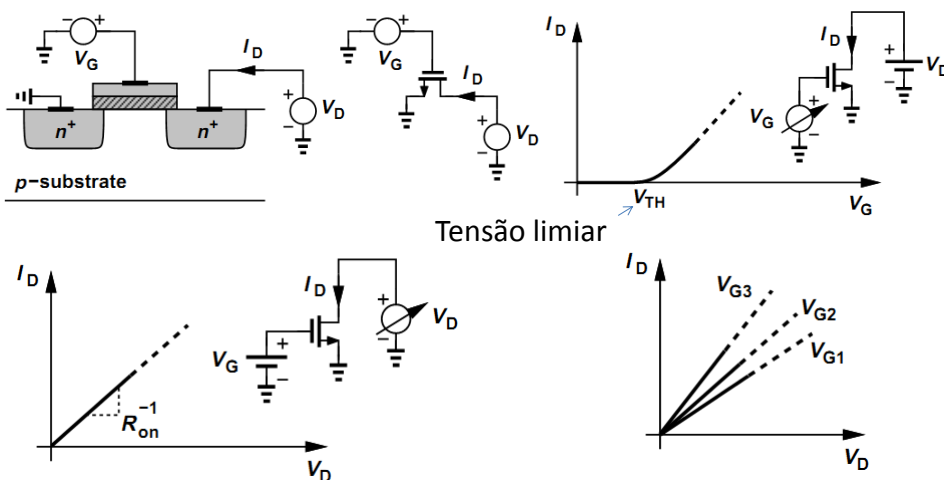
- EXEMPLO: Atenuador controlado por tensão



Prof. Pedro Xavier

Análise Qualitativa

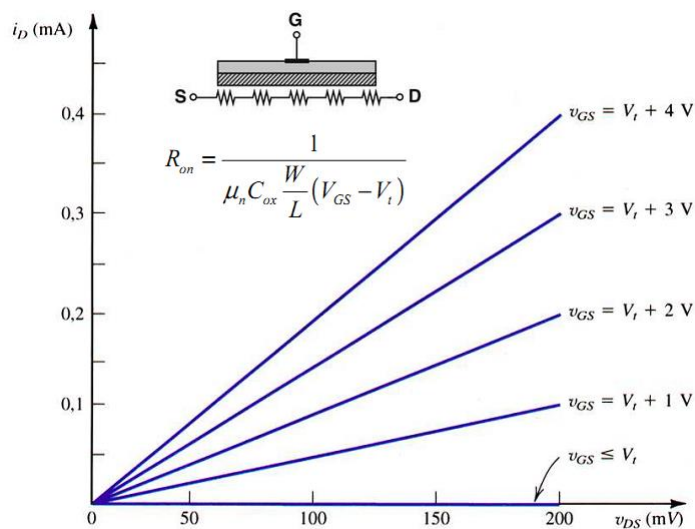
- Características $I_D \times V_D$:



Prof. Pedro Xavier * V_D dentro de um certo limite

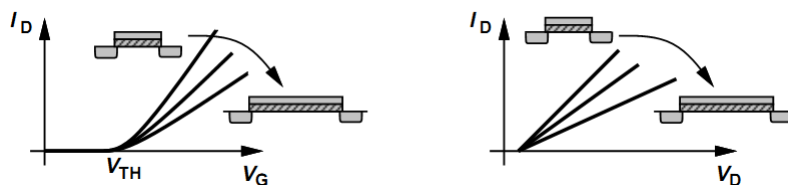
Análise Qualitativa

- Características IxV:

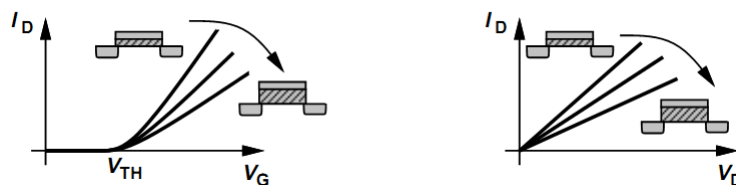


Análise Qualitativa

- Efeito comprimento do canal (L)



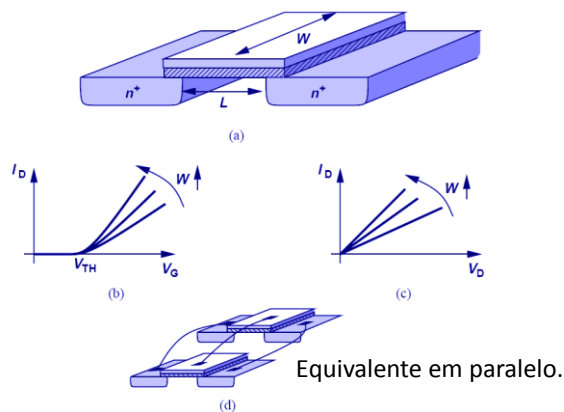
- Efeito da espessura do isolante (t_{ox})



Prof. Pedro Xavier

Análise Qualitativa

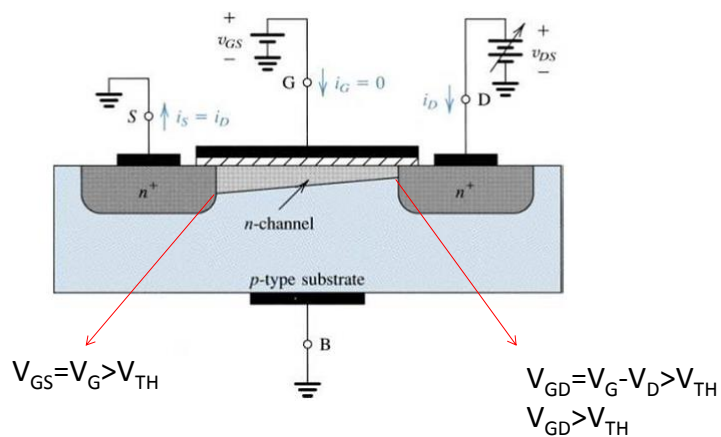
- Efeito da largura do transistor (W)
 - Quanto maior W , maior I_D , e maior a capacitância da porta (limitante da velocidade).



Prof. Pedro Xavier

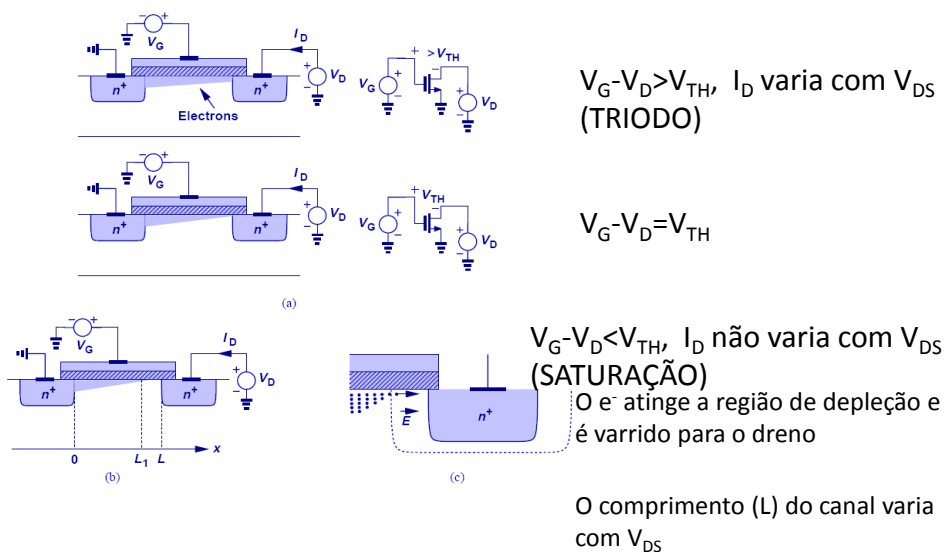
Análise Qualitativa

Perfil do canal com tensão V_{DS} crescente



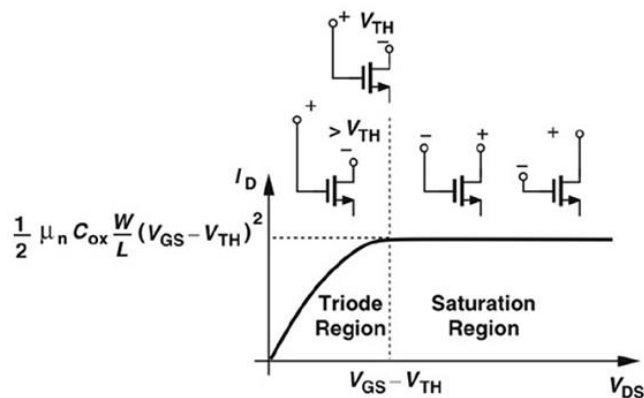
Prof. Pedro Xavier

Análise Qualitativa Estrangulamento do canal



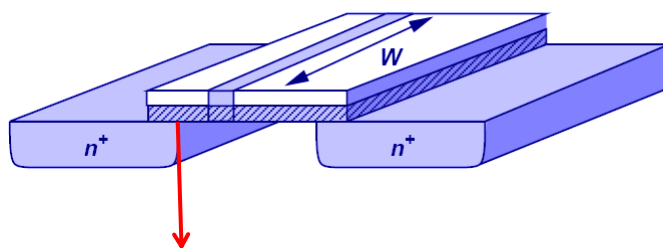
Análise Qualitativa

Regiões de operação



Características IxV

- Densidade de Carga



$$Q = WC_{ox}(V_{GS} - V_{TH})$$

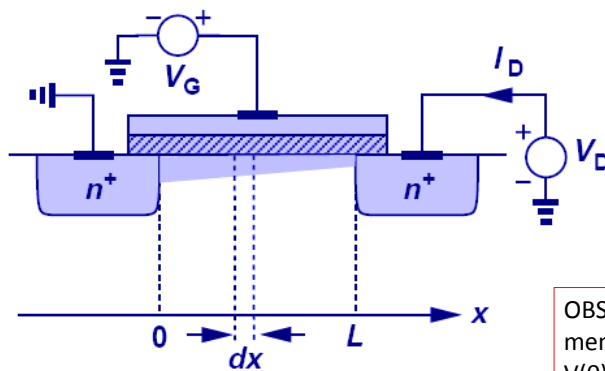
C_{ox} : capacitância por unidade de área

Q : densidade de carga (C/unidade de comprimento)

Prof. Pedro Xavier

Características IxV

- Perfil de densidade de carga



$$Q(x) = WC_{ox}[V_{GS} - V(x) - V_{TH}]$$

Prof. Pedro Xavier

OBS: Quanto maior $V(x)$,
menor o perfil de Q .
 $V(0)=0$;
 $V(L)=V_D$, se o canal não
estiver estrangulado.

Características IxV

- Corrente de dreno $v = -\mu_n E$

$$I = Q \cdot v$$

$$Q(x) = WC_{ox} [V_{GS} - V(x) - V_{TH}]$$

$$v = +\mu_n \frac{dV}{dx}$$

$$I_D = WC_{ox} [V_{GS} - V(x) - V_{TH}] \mu_n \frac{dV(x)}{dx}$$

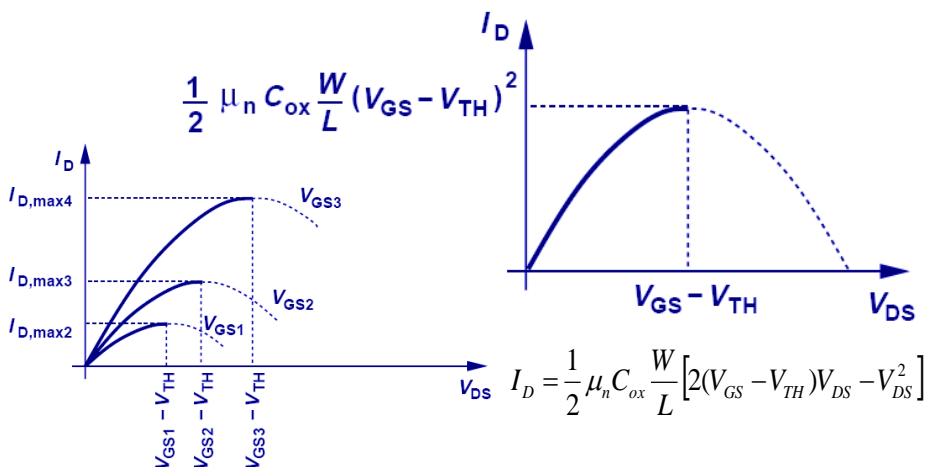
μ : mobilidade dos portadores
[cm²/(V·s)]

Entregar para nota.

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} [2(V_{GS} - V_{TH})V_{DS} - V_{DS}^2]$$

Características IxV

- Corrente de dreno
 - A partir de $V_{DS} = V_{GS} - V_{TH}$, a relação parabólica não vale, pois o transistor entra na saturação



Características IxV

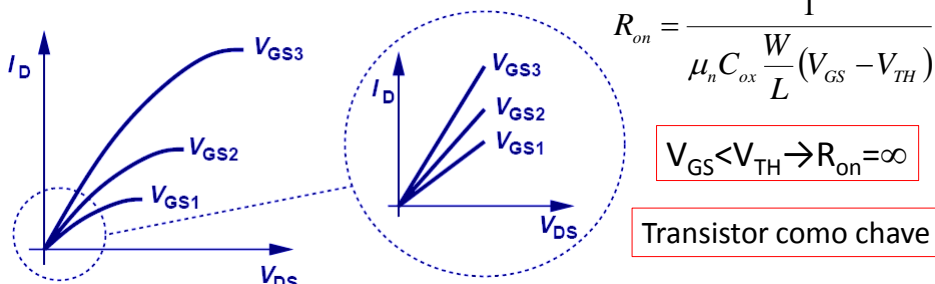
- Resistência Linear

- Para baixos valores de V_{DS} ($\ll 2(V_{GS} - V_{TH})$):

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} [2(V_{GS} - V_{TH})V_{DS} - V_{DS}^2]$$

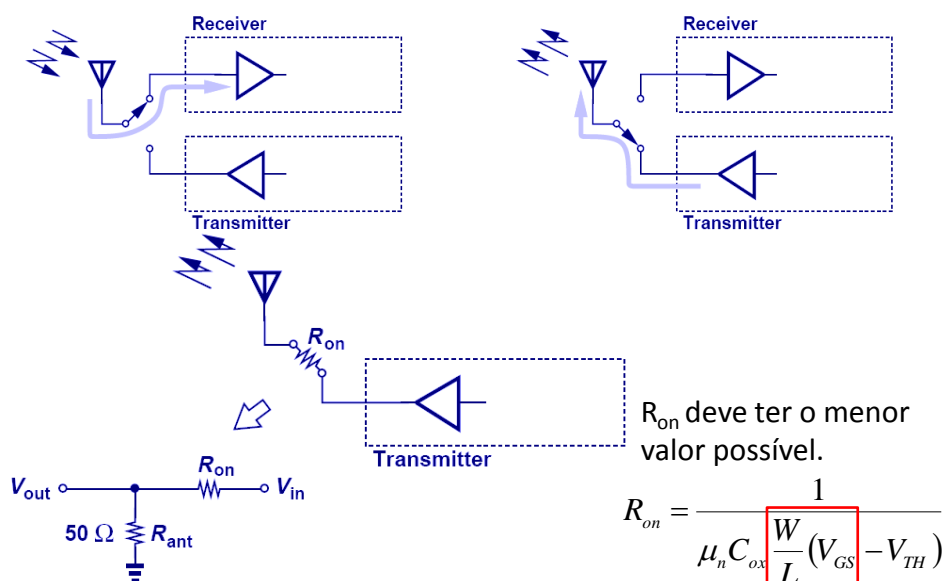
$$I_D \approx \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})V_{DS}, \text{ Linearização em torno de zero}$$

- Para pequenos valores de V_{DS} , o FET pode ser visto como um resistor controlado por tensão (V_{GS})

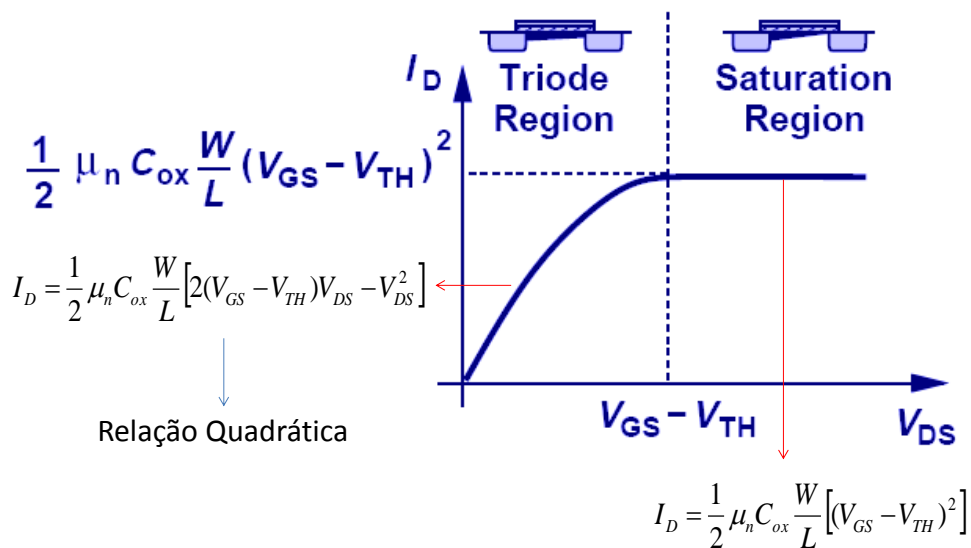


Exemplo

- Circuito chaveador para antena de celular

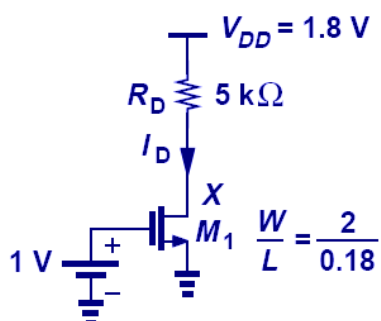


Regiões de operação



Regiões de operação

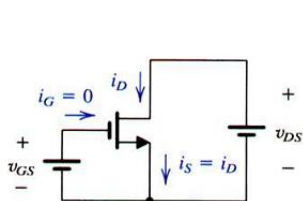
- Calcule I_D e V_D , se V_G aumentar de 10 mV, qual o novo valor de V_D ?



$$\mu_n C_{ox} = 100 \mu\text{A}/\text{V}^2 \text{ and } V_{TH} = 0.4 \text{ V.}$$

Entregar para nota

Característica $i_D - v_{DS}$ para um NMOS

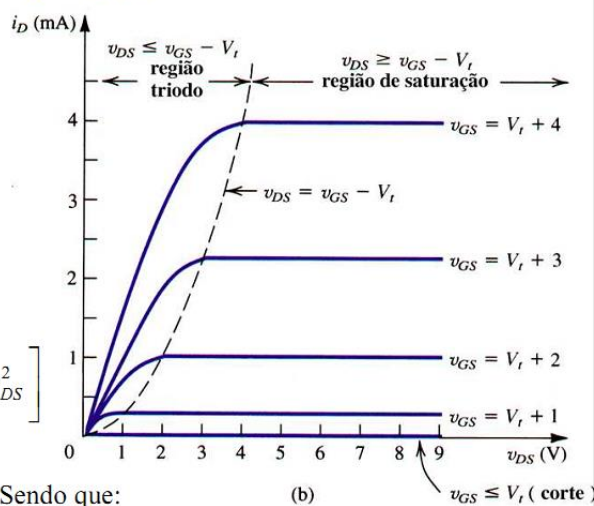


Região linear (Triodo):

$$i_D = k'_n \frac{W}{L} \left[(v_{GS} - V_t) v_{DS} - \frac{1}{2} v_{DS}^2 \right]$$

Região de saturação:

$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2$$



Sendo que:

$$k'_n = \mu_n C_{ox} \left[\frac{A}{V^2} \right]$$

Prof. Pedro Xavier

Parâmetros Tecnológicos

Mobilidade de elétrons: $\mu_n \approx 580 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

Espessura do óxido: $t_{ox} = 0,02$ a $0,1 \text{ }\mu\text{m}$

Permissividade do óxido:

$$\begin{aligned} \epsilon_{ox} &= 3,97 \epsilon_0 \\ &= 3,97 \times 8,85 \times 10^{-14} = 3,5 \times 10^{-13} \text{ F/cm} \end{aligned}$$

Capacitância do óxido:

$$\begin{aligned} C_{ox} &= \epsilon_{ox} / t_{ox} \\ &= 1,75 \text{ fF}/\mu\text{m}^2 \text{ para } t_{ox} = 0,02 \text{ }\mu\text{m} \\ &= 0,35 \text{ fF}/\mu\text{m}^2 \text{ para } t_{ox} = 0,1 \text{ }\mu\text{m} \end{aligned}$$

Parâmetro de transcondutância do processo:

$$\begin{aligned} k'_n &= \mu_n C_{ox} \\ &\approx 100 \text{ }\mu\text{A}/\text{V}^2 \text{ para } t_{ox} = 0,02 \text{ }\mu\text{m} \\ &\approx 20 \text{ }\mu\text{A}/\text{V}^2 \text{ para } t_{ox} = 0,1 \text{ }\mu\text{m} \end{aligned}$$

Fonte: Sedra Tabela 5.1