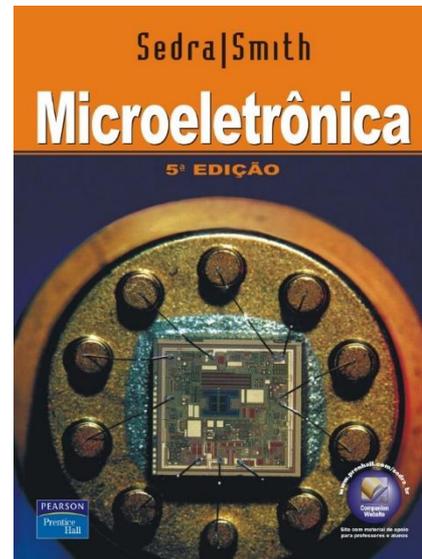


AULA 3



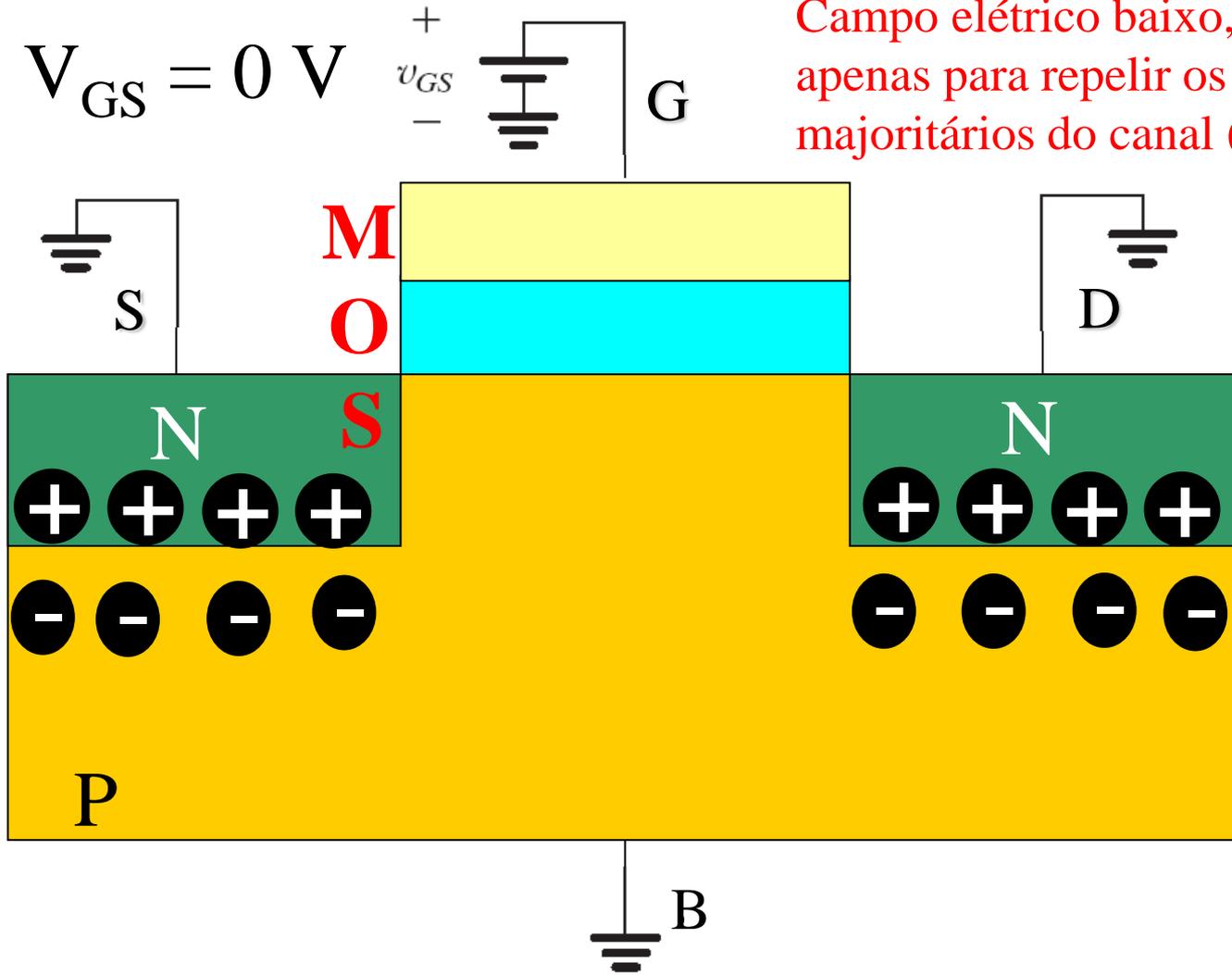
Dedução da equação de corrente do MOSFET canal n, resistência de saída na saturação, Exemplo 4.1.

Sedra, Cap. 4
p. 146-155

Transistor NMOS

$$V_{GS} = 0 \text{ e } V_{DS} = 0$$

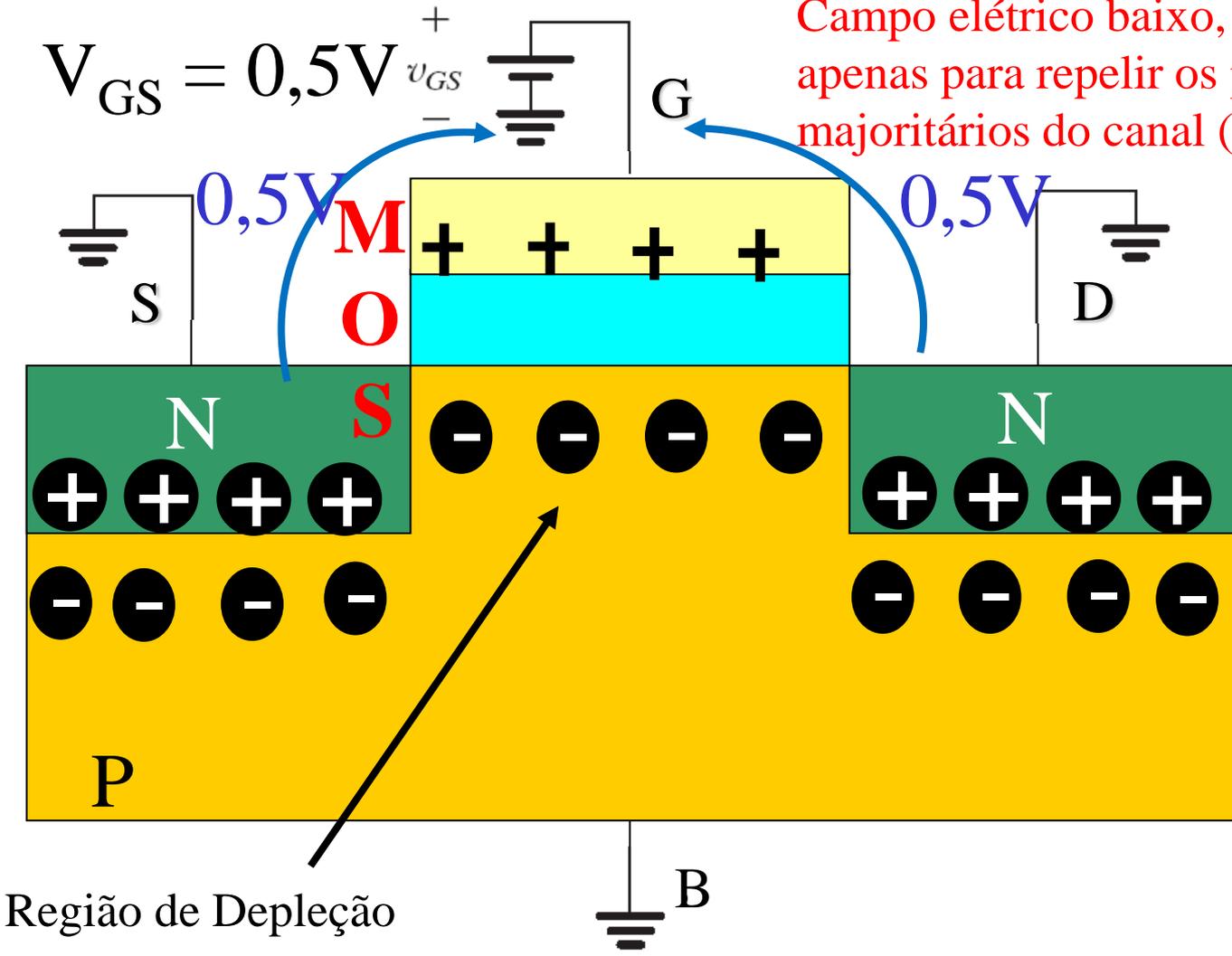
Campo elétrico baixo, suficiente apenas para repelir os portadores majoritários do canal (lacunas)



Transistor NMOS

$$V_{GS} > 0 \text{ e } V_{DS} = 0$$

Campo elétrico baixo, suficiente apenas para repelir os portadores majoritários do canal (lacunas)

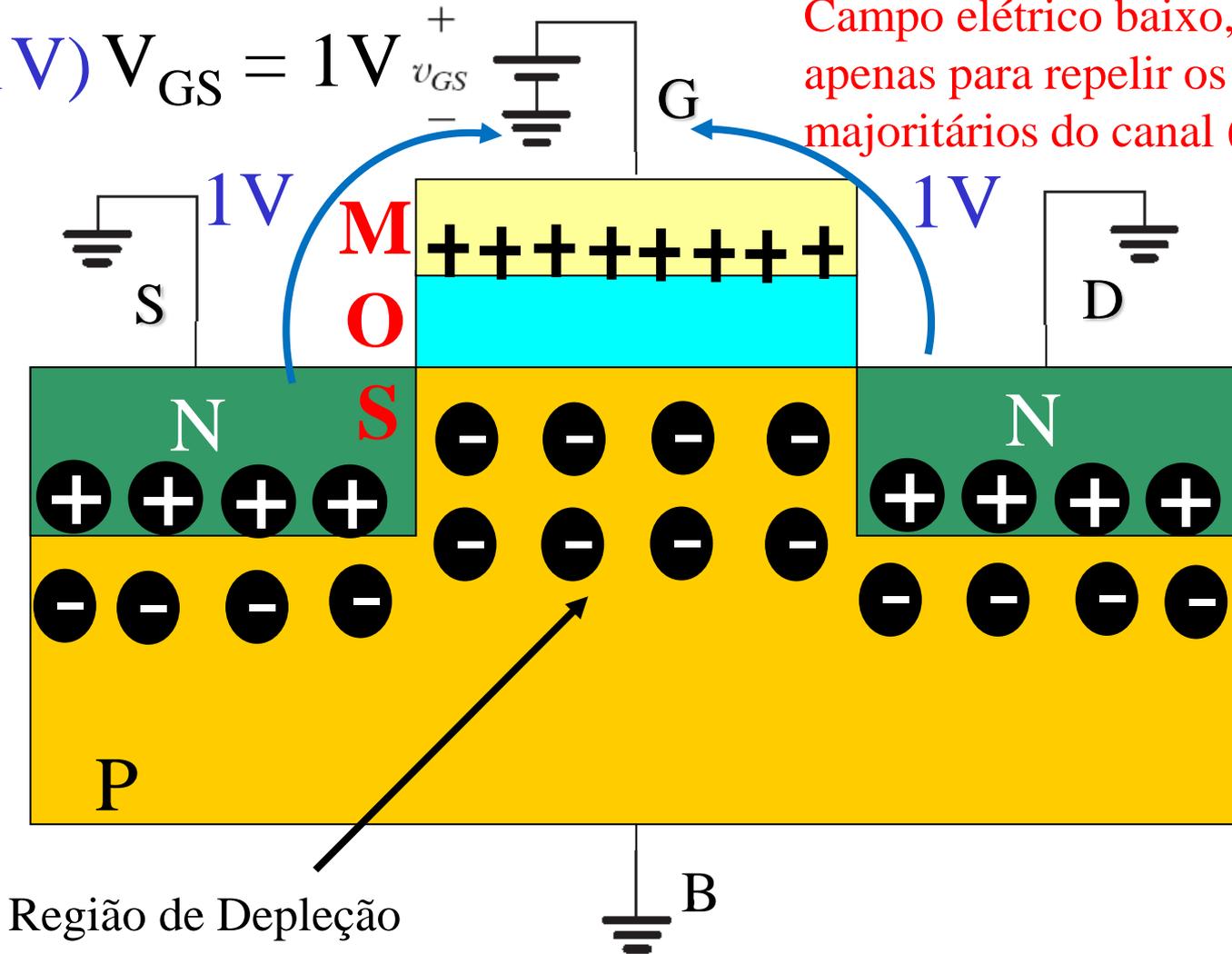


Transistor NMOS

$$V_{GS} > 0 \text{ e } V_{DS} = 0$$

$$(V_t \cong 1V) V_{GS} = 1V$$

Campo elétrico baixo, suficiente apenas para repelir os portadores majoritários do canal (lacunas)



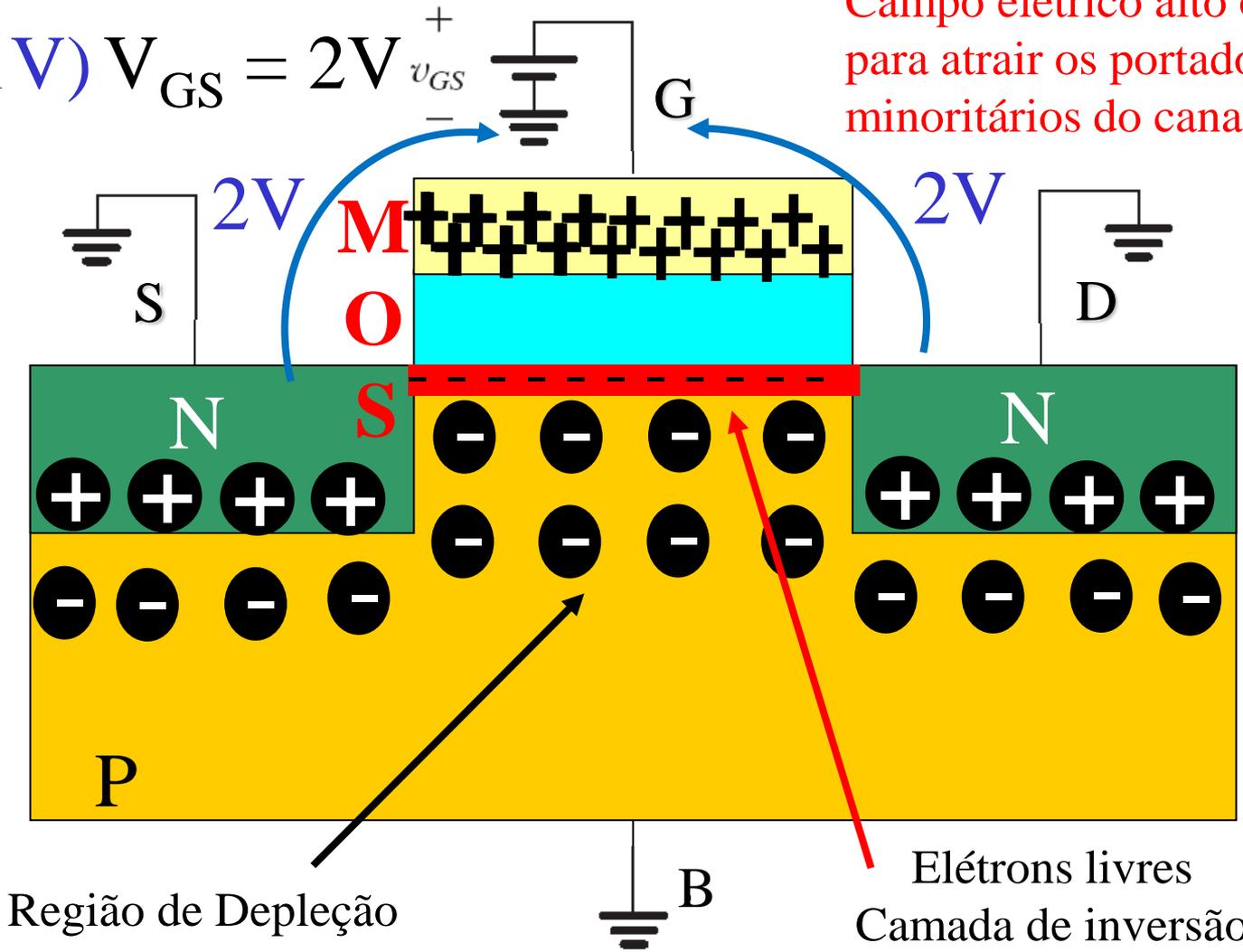
Transistor NMOS

$V_{GS} > V_t$ (tensão de limiar) e $V_{DS} = 0$

$(V_t \cong 1V)$

$V_{GS} = 2V$

Campo elétrico alto o suficiente para atrair os portadores minoritários do canal (elétrons)

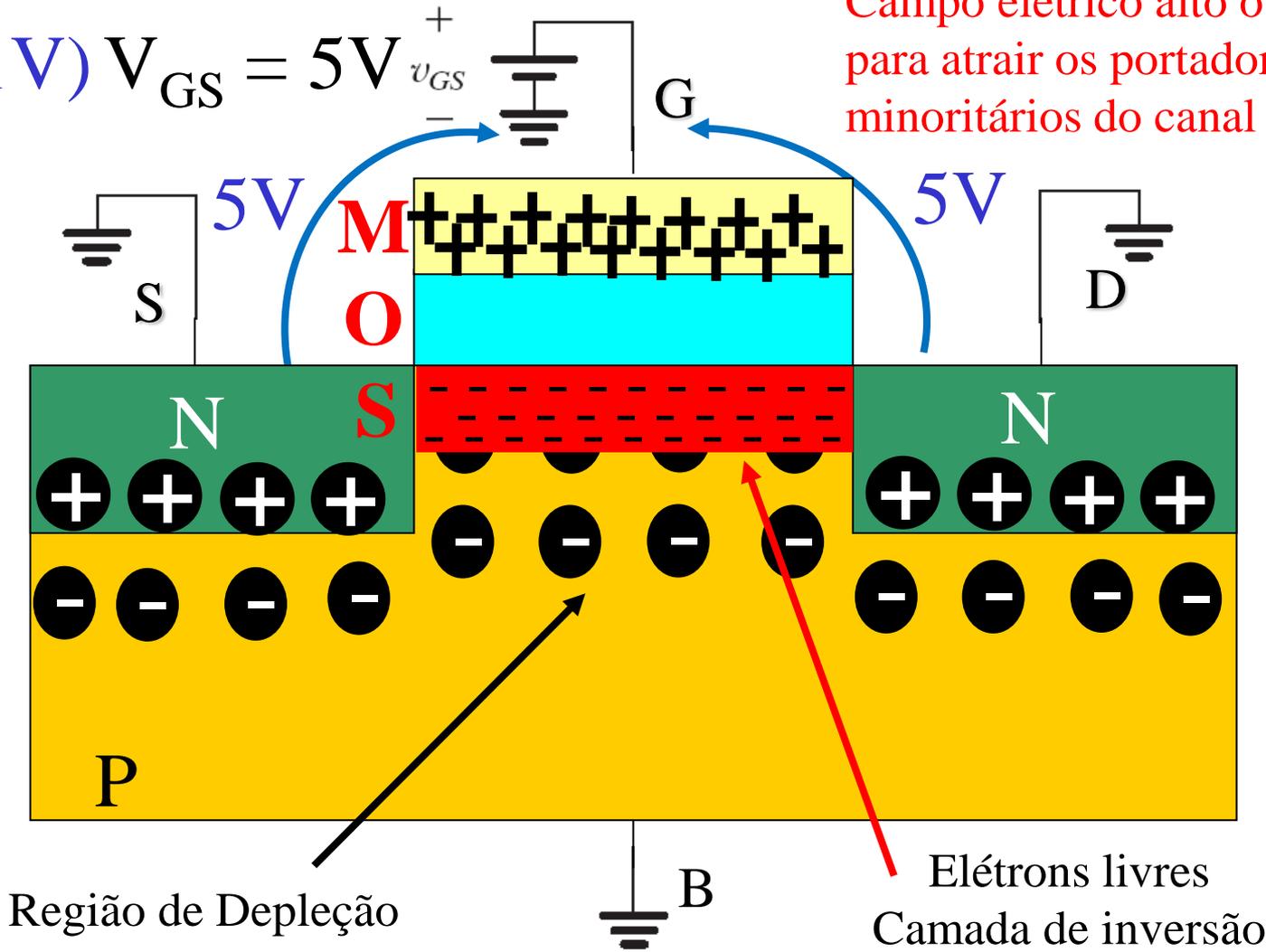


Transistor NMOS

$V_{GS} \gg V_t$ (tensão de limiar) e $V_{DS} = 0$

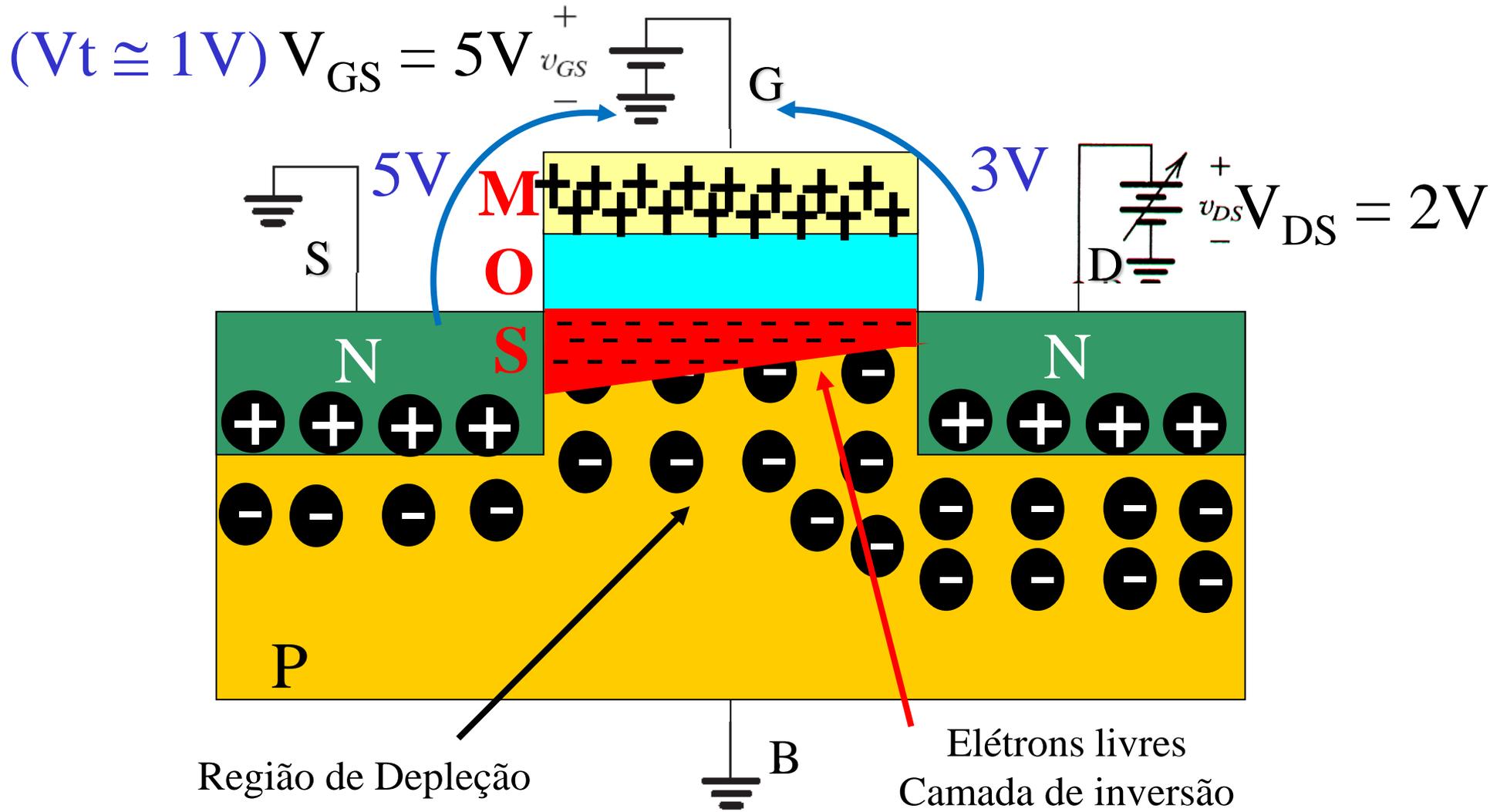
$(V_t \cong 1V) V_{GS} = 5V$

Campo elétrico alto o suficiente para atrair os portadores minoritários do canal (elétrons)



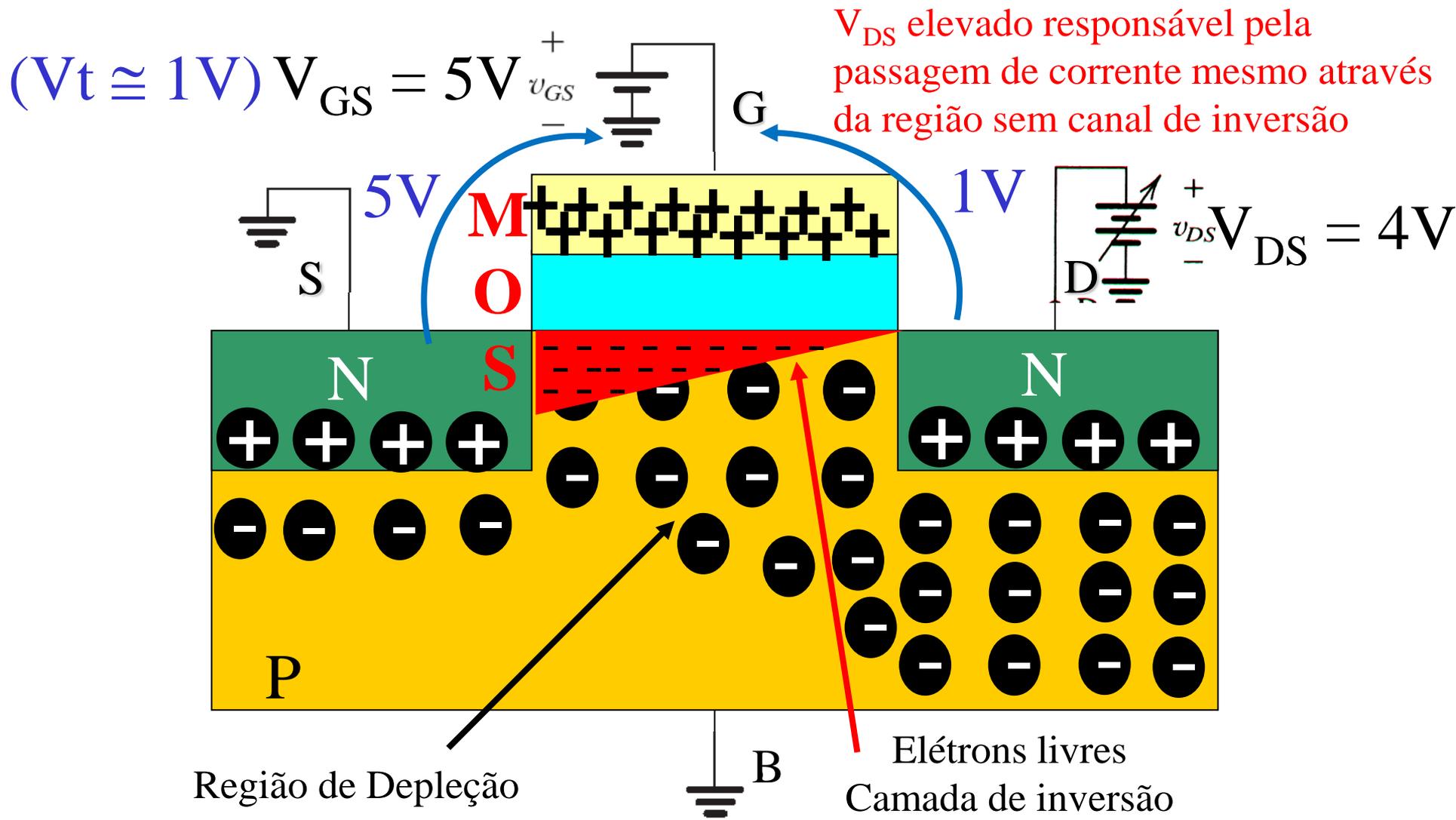
Transistor NMOS

$V_{DS} < V_{GS} - V_t$ (Região de triodo)



Transistor NMOS

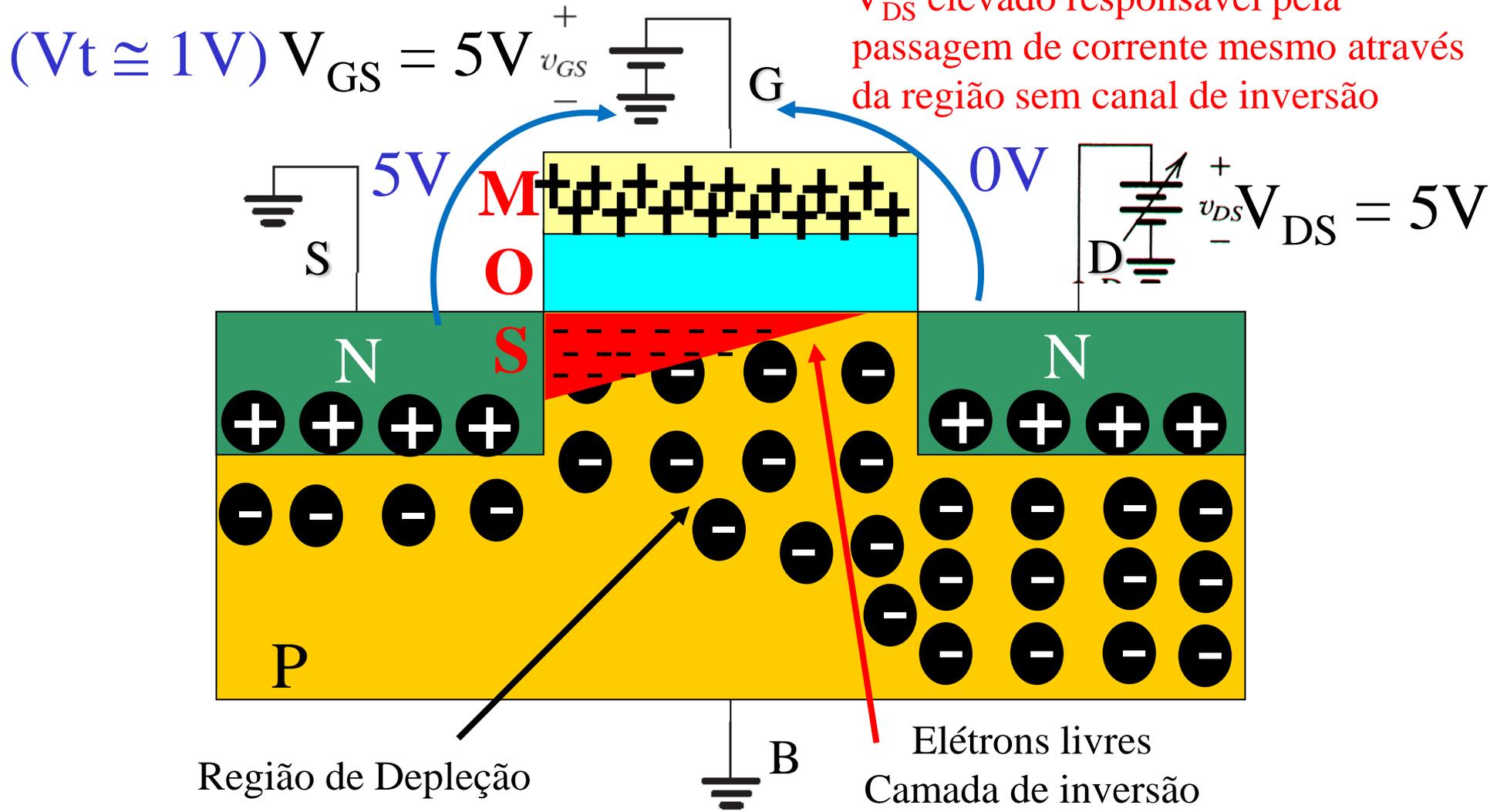
$$V_{DS} = V_{GS} - V_t \text{ (Triodo/Saturação)}$$



Transistor NMOS

$V_{DS} > V_{GS} - V_t$ (Região de Saturação)

V_{DS} elevado responsável pela passagem de corrente mesmo através da região sem canal de inversão



Transistor NMOS

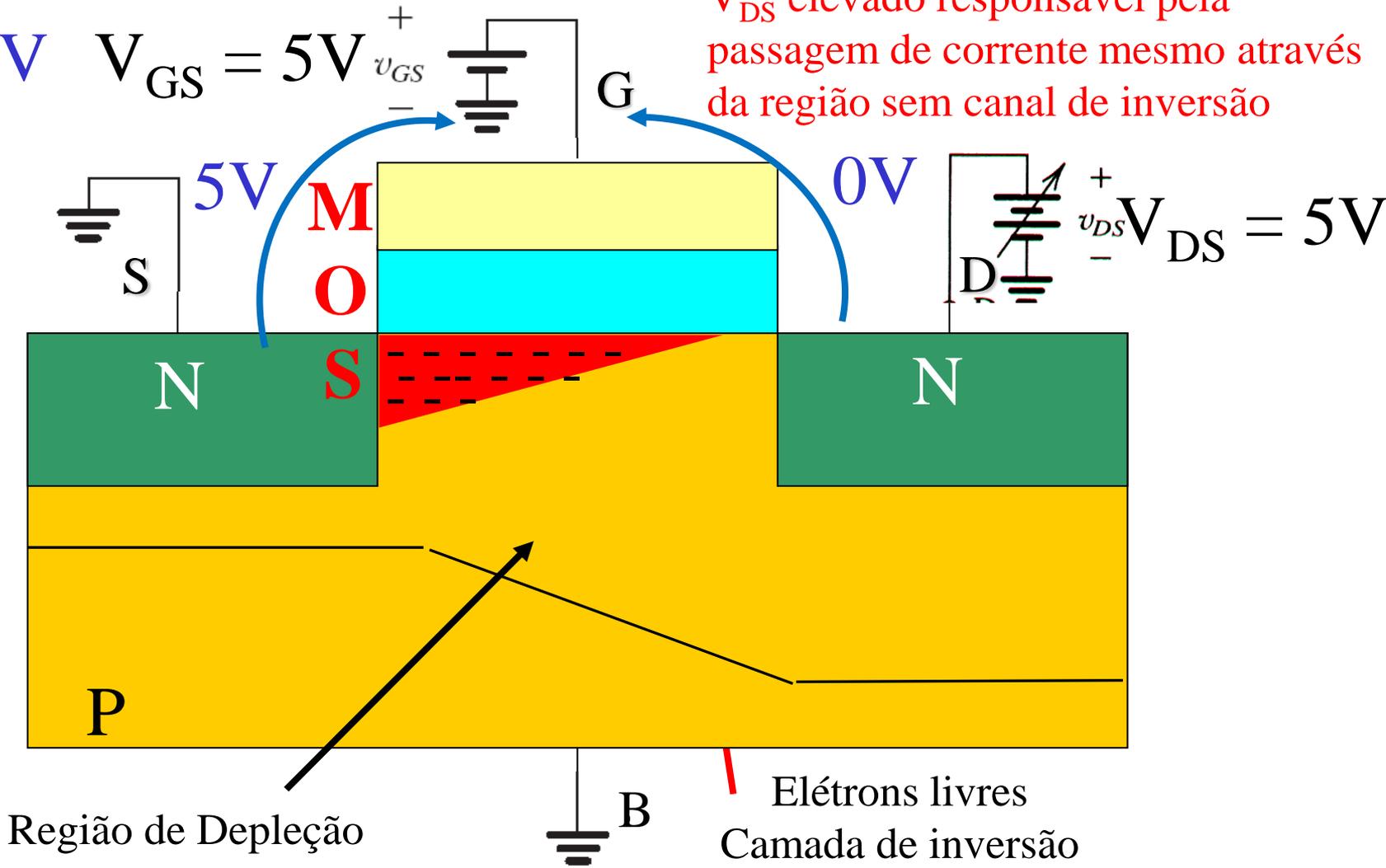
$V_{DS} > V_{GS} - V_t$ (Região de Saturação)

$V_t \cong 1V$

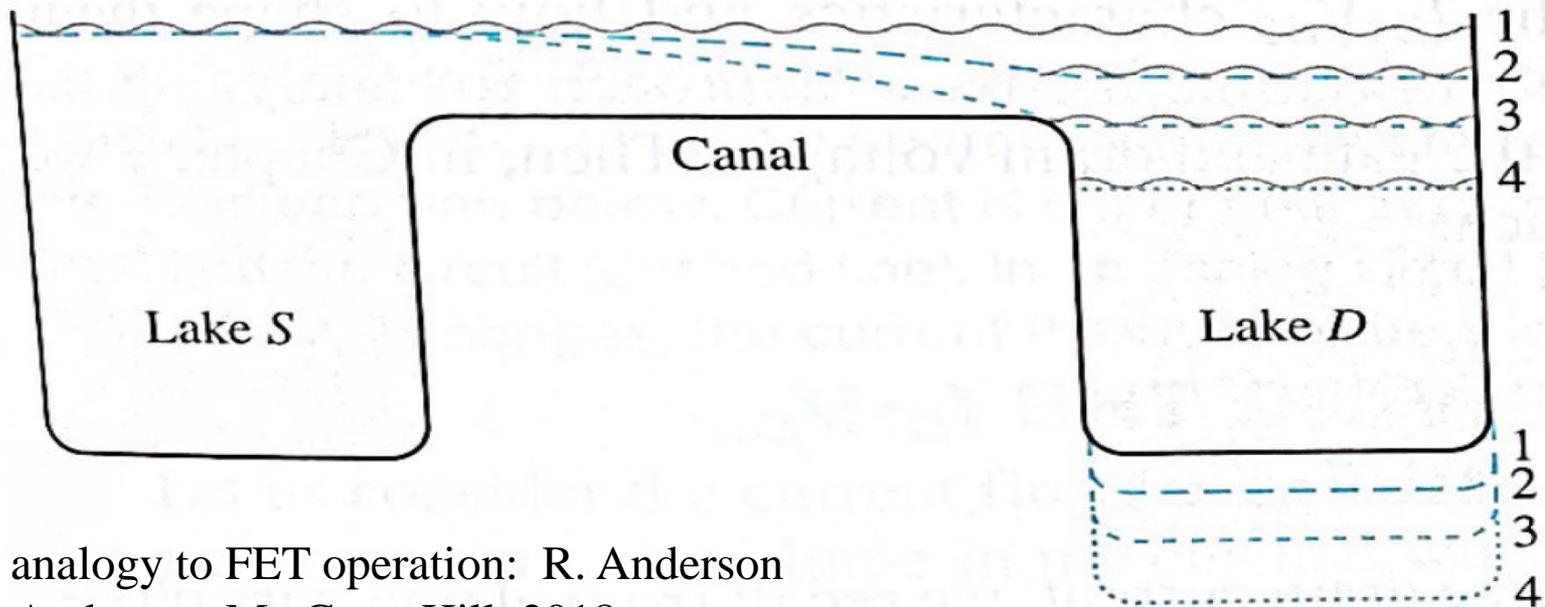
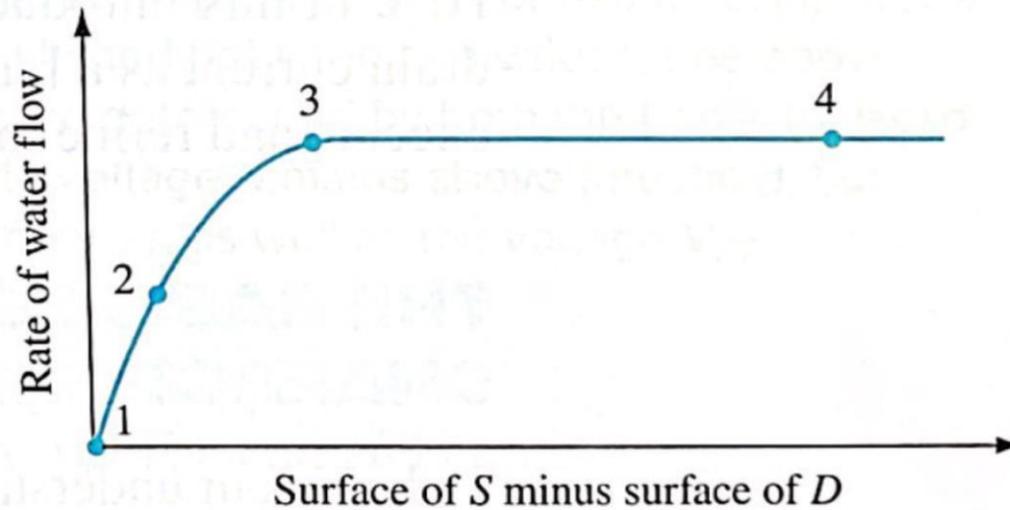
$V_{GS} = 5V$



V_{DS} elevado responsável pela passagem de corrente mesmo através da região sem canal de inversão



Transistor NMOS



*Lake analogy to FET operation: R. Anderson and B. Anderson, Mc Graw Hill, 2018

Alunos de PSI3322:

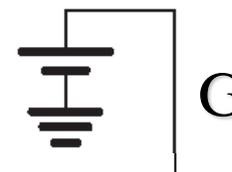
Vamos hoje deduzir a relação

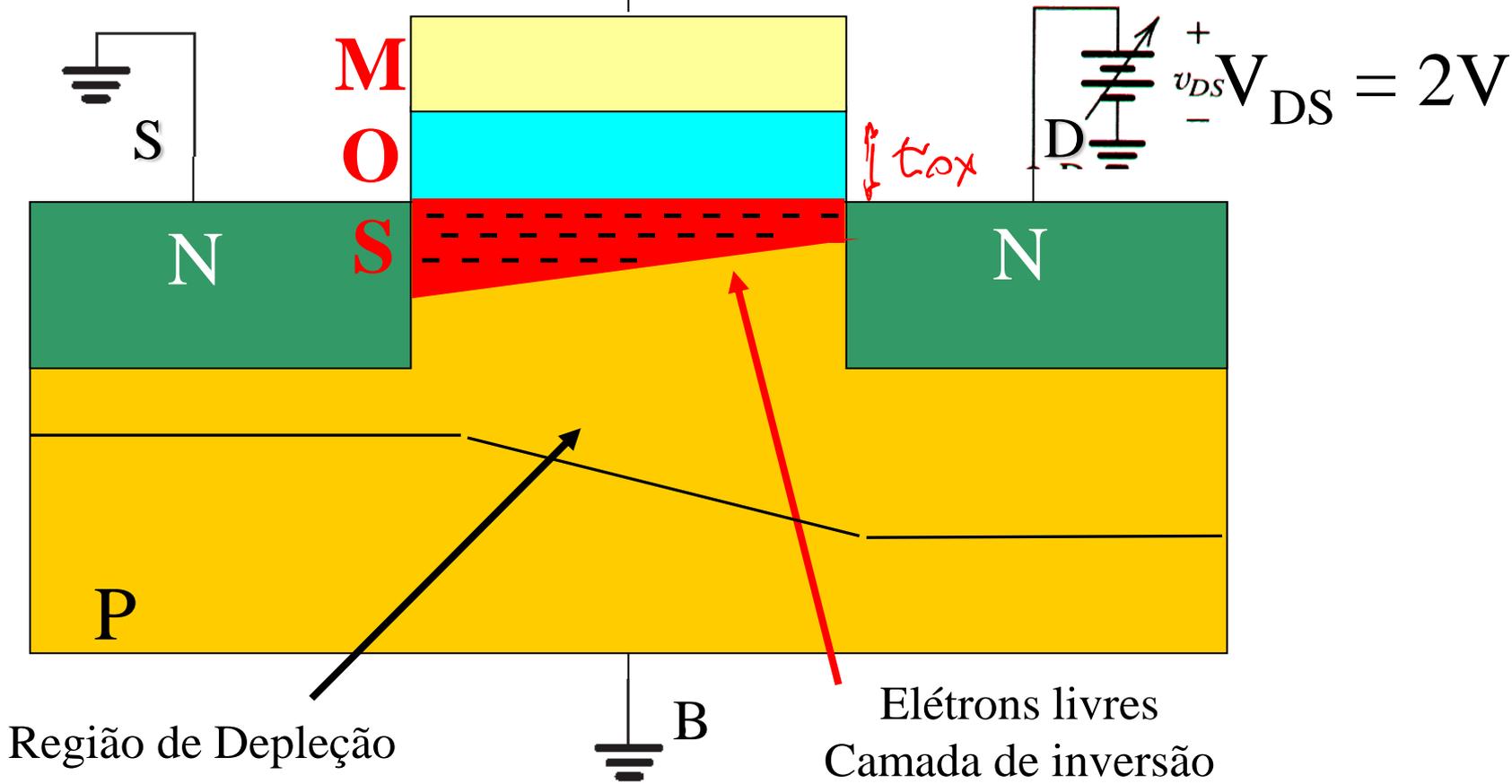
$$i_D - v_{DS} (v_{GS})$$

(modelo de primeira ordem do MOSFET)

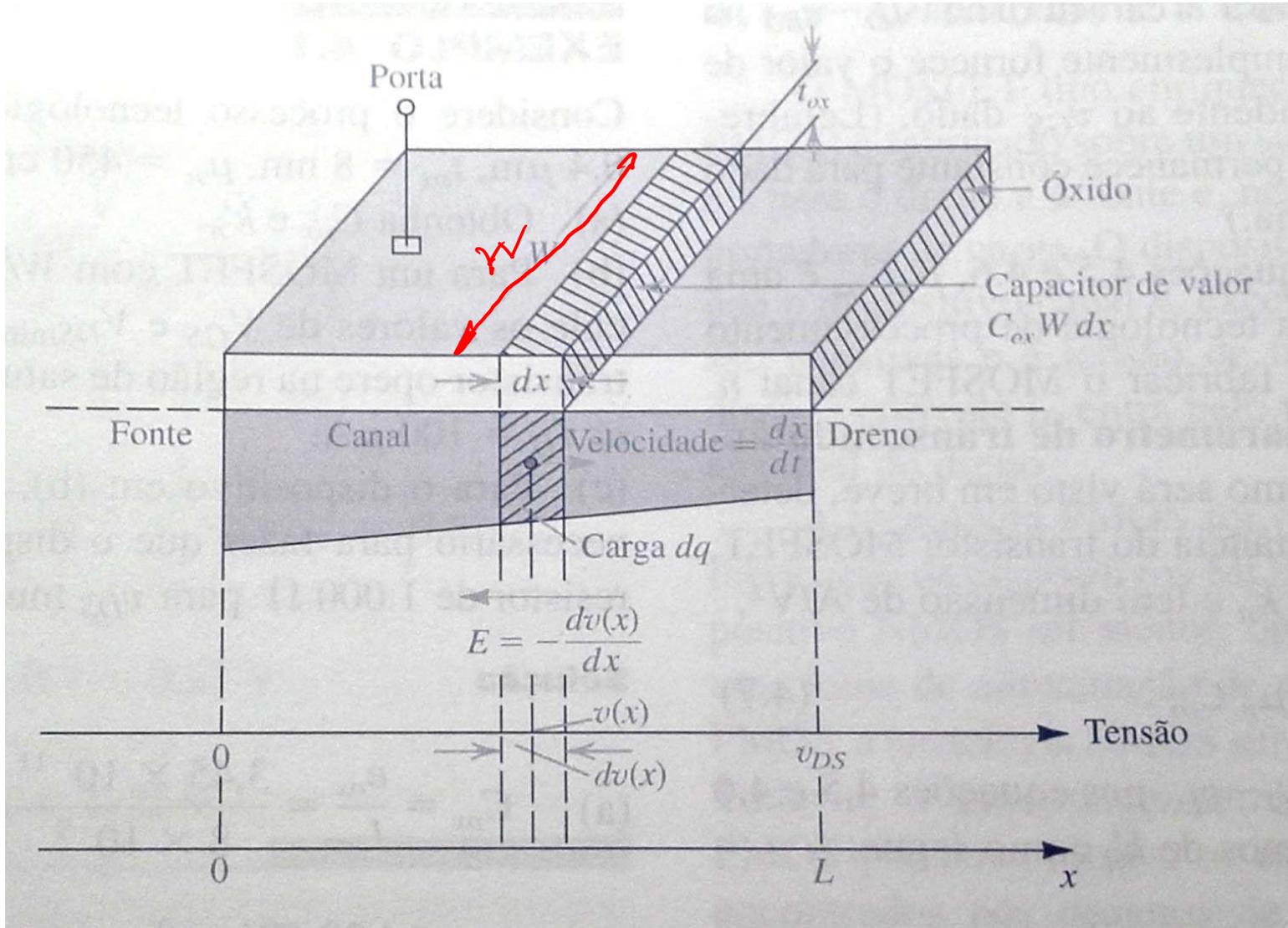
Transistor NMOS

$$V_{DS} < V_{GS} - V_t \text{ (Região de triodo)}$$

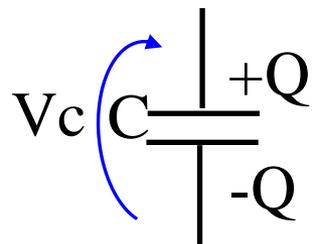
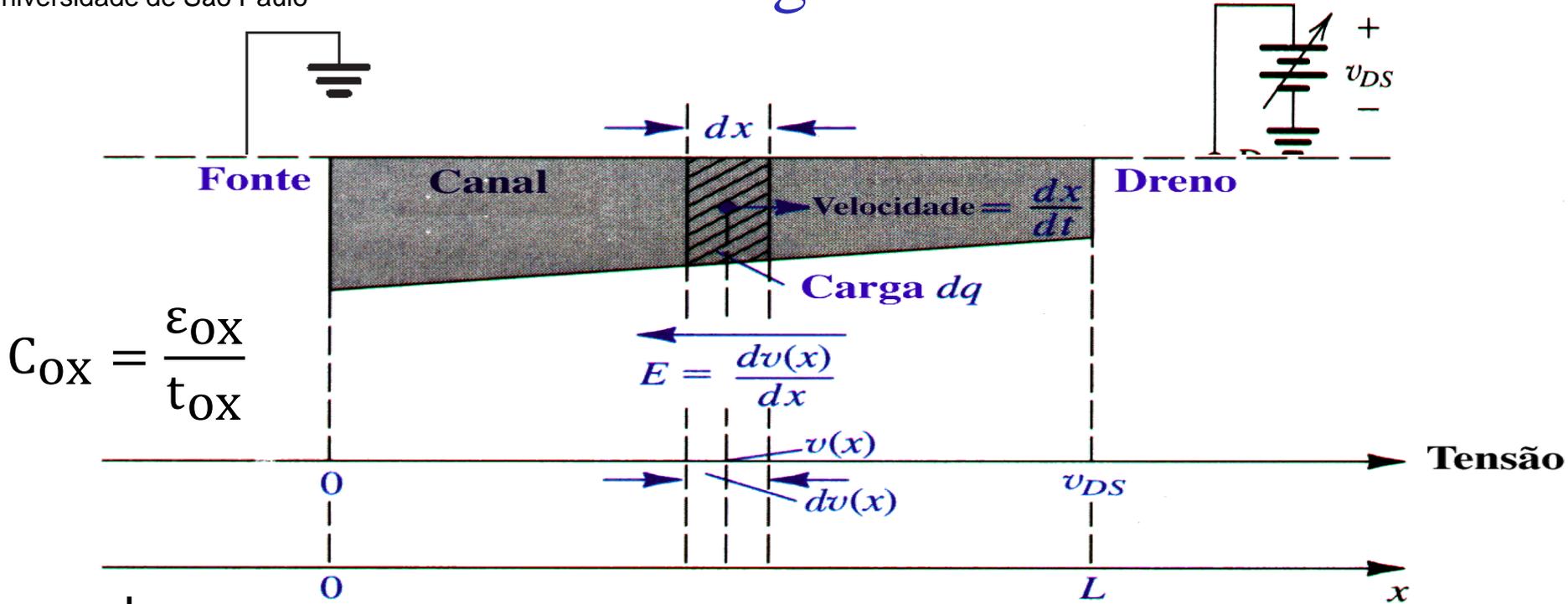
$$(V_t \cong 1V) V_{GS} = 5V$$




Determinação da relação $i_D - v_{DS}$ (v_{GS}) Região de Triodo



Determinação da relação $i_D - v_{DS}$ (v_{GS}) Região de Triodo



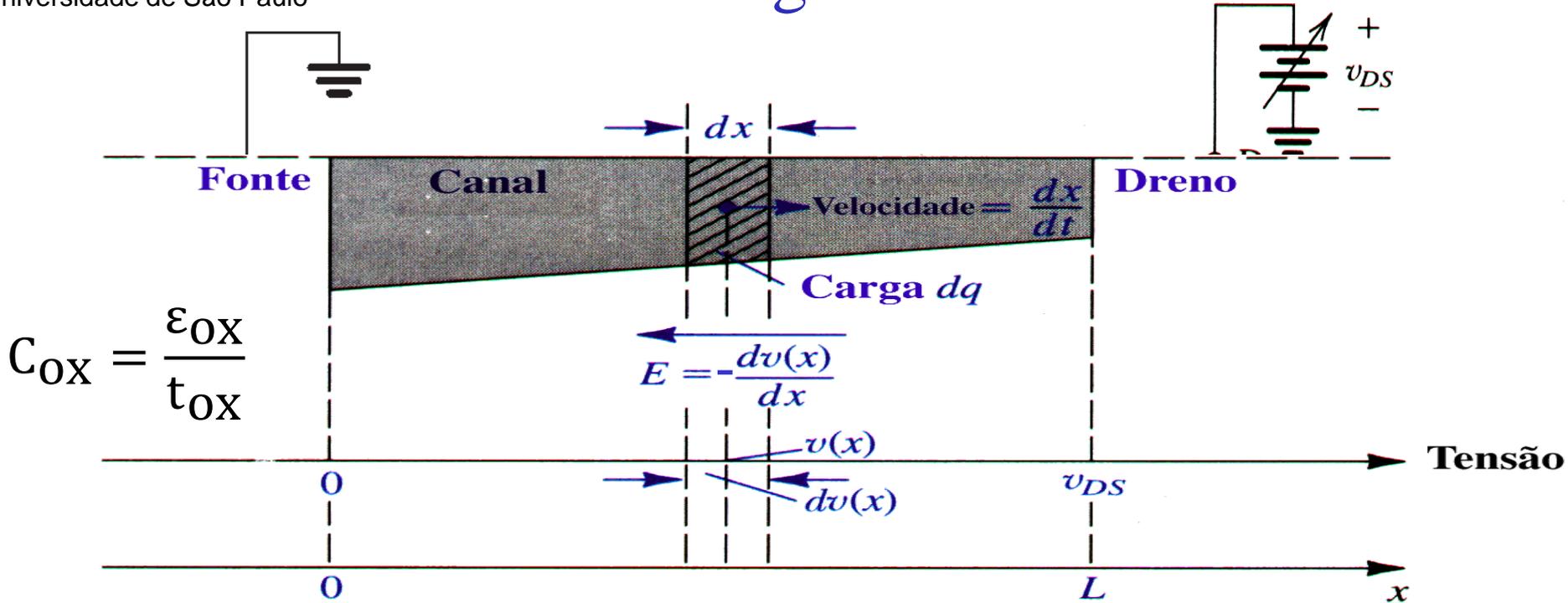
$$Q = C \cdot V$$

$$dq = dC \cdot [V_c]$$

$$dq = -C_{OX} \cdot W \cdot dx \cdot [v_{GS} - V_t - v(x)]$$

$$\frac{dq}{dx} = -C_{OX} \cdot W \cdot [v_{GS} - V_t - v(x)] \quad \text{(eq.1)}$$

Determinação da relação $i_D - v_{DS}$ (v_{GS}) Região de Triodo



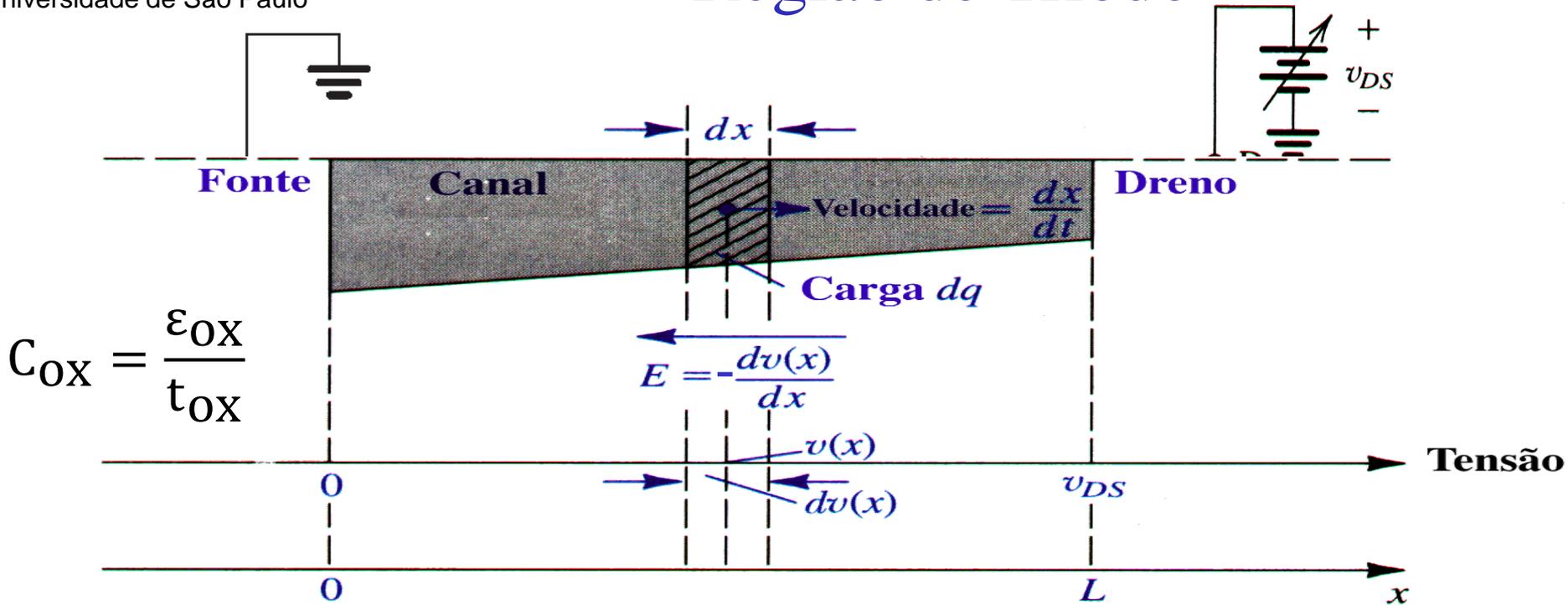
Campo elétrico do dreno para a fonte: $E(x) = -dv(x)/dx$

Velocidade de deslocamento da carga dq da fonte para o dreno:

$$\frac{dx}{dt} = -\mu_n \cdot E(x) = -\mu_n \cdot (-dv(x)/dx) = \mu_n \cdot (dv(x)/dx) \quad (\text{eq.2})$$

onde μ_n é a mobilidade de elétrons no canal

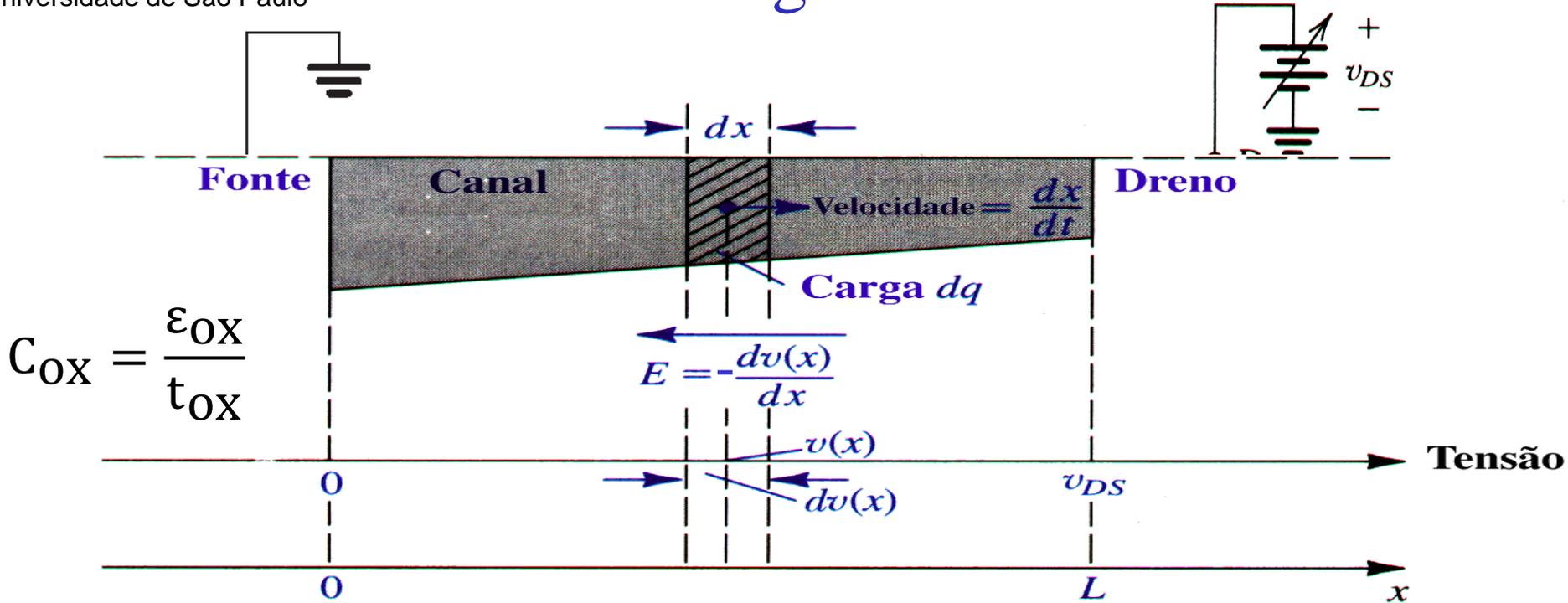
Determinação da relação $i_D - v_{DS}$ (v_{GS}) Região de Triodo



$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{dq}{dx} \frac{dx}{dt} = (eq.1).(eq.2)$$

$$i = -C_{ox} \cdot W \cdot [v_{GS} - V_t - v(x)] \cdot \mu_n \cdot (dv(x)/dx)$$

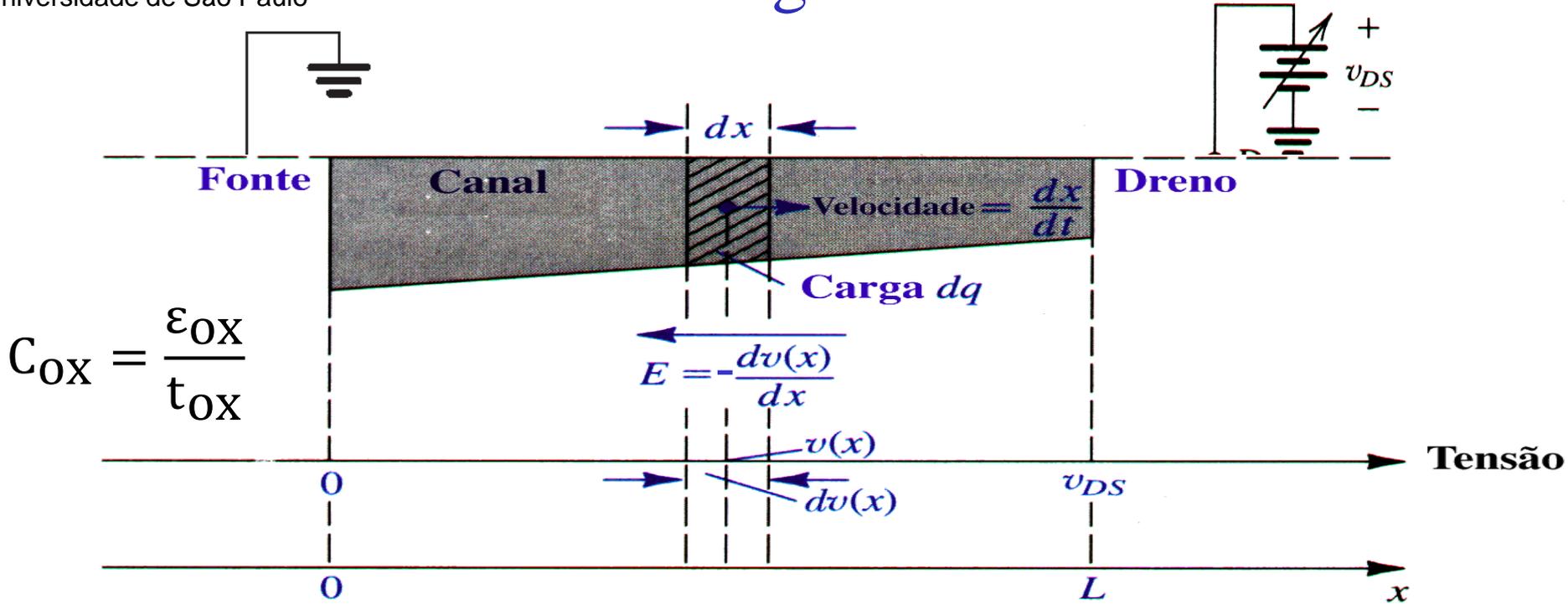
Determinação da relação $i_D - v_{DS}$ (v_{GS}) Região de Triodo



$$i_D = -i = C_{ox} \cdot W \cdot [v_{GS} - V_t - v(x)] \cdot \mu_n \cdot (dv(x)/dx)$$

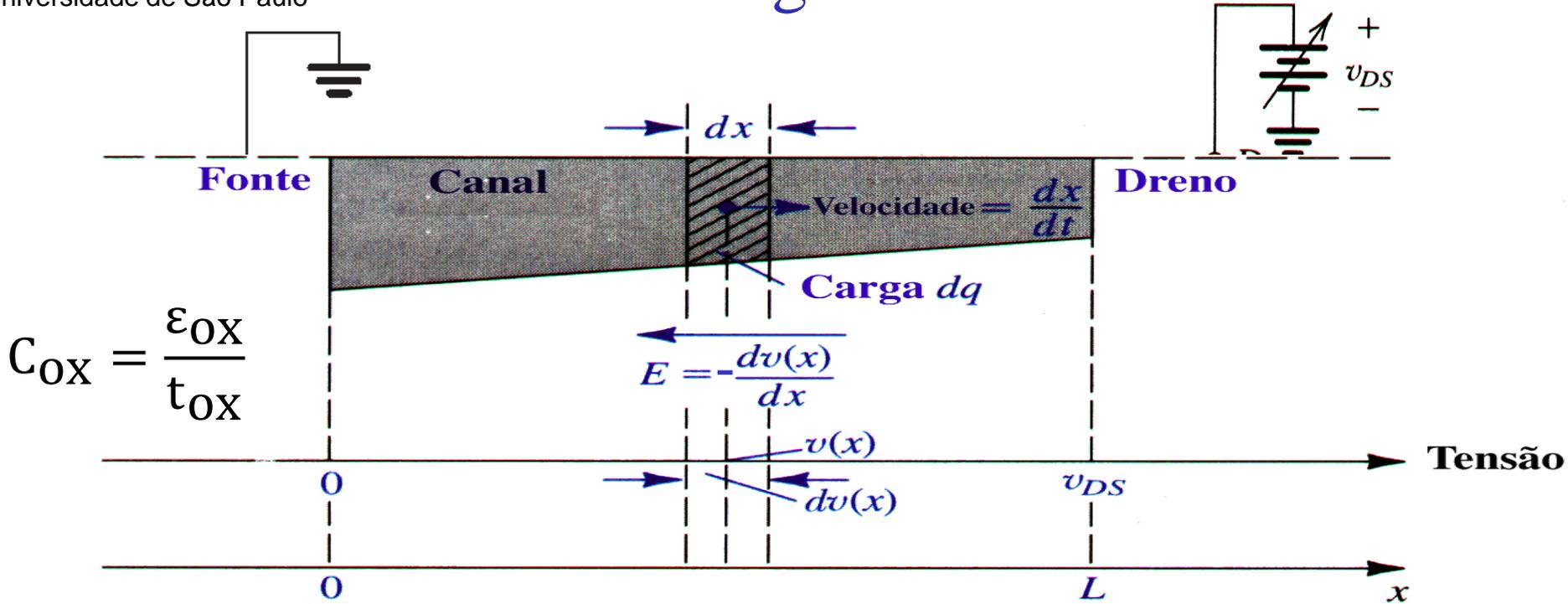
$$i_D \cdot dx = \mu_n \cdot C_{ox} \cdot W \cdot [v_{GS} - V_t - v(x)] \cdot dv(x)$$

Determinação da relação $i_D - v_{DS}$ (v_{GS}) Região de Triodo



$$i_D \cdot \int_0^L dx = \mu_n \cdot C_{OX} \cdot W \cdot \int_0^{v_{DS}} [v_{GS} - V_t - v(x)] \cdot dv(x)$$

Determinação da relação $i_D - v_{DS}$ (v_{GS}) Região de Triodo



$$i_D \cdot \int_0^L dx = \mu_n \cdot C_{OX} \cdot W \cdot \int_0^{v_{DS}} [v_{GS} - V_t - v(x)] \cdot dv(x)$$

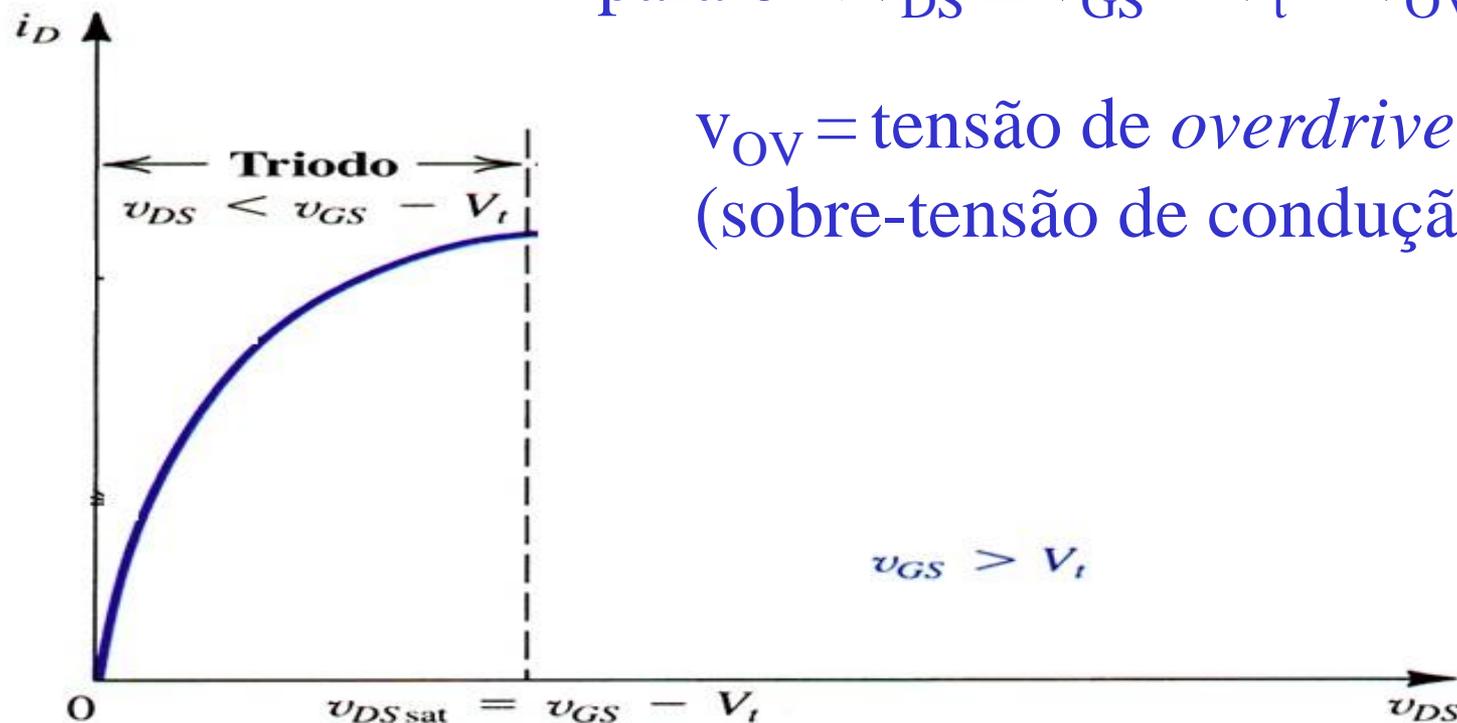
$$i_D = \mu_n \cdot C_{OX} \cdot \frac{W}{L} \left[(v_{GS} - V_t) \cdot v_{DS} - \frac{v_{DS}^2}{2} \right]$$

Determinação da relação $i_D - v_{DS}$ (v_{GS}) Região de Triodo

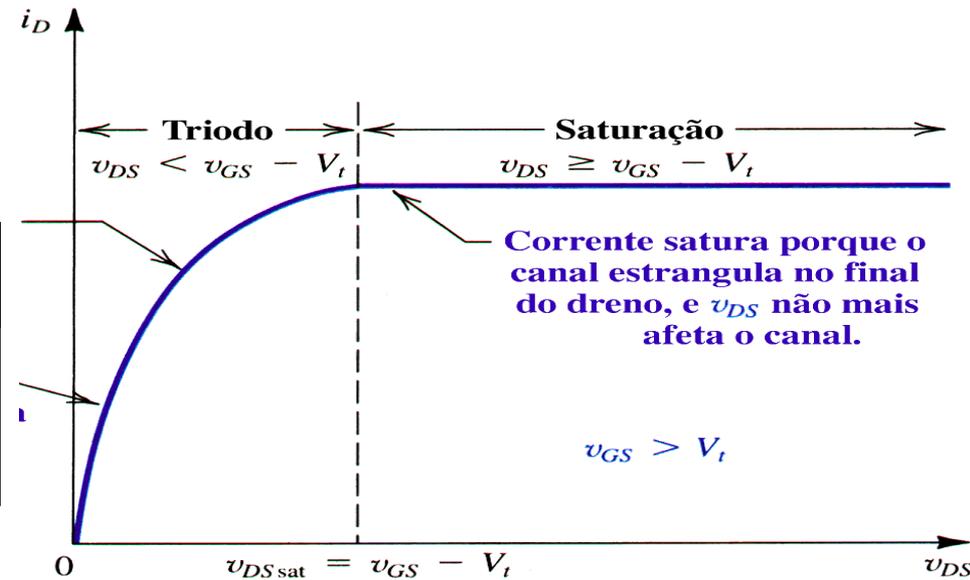
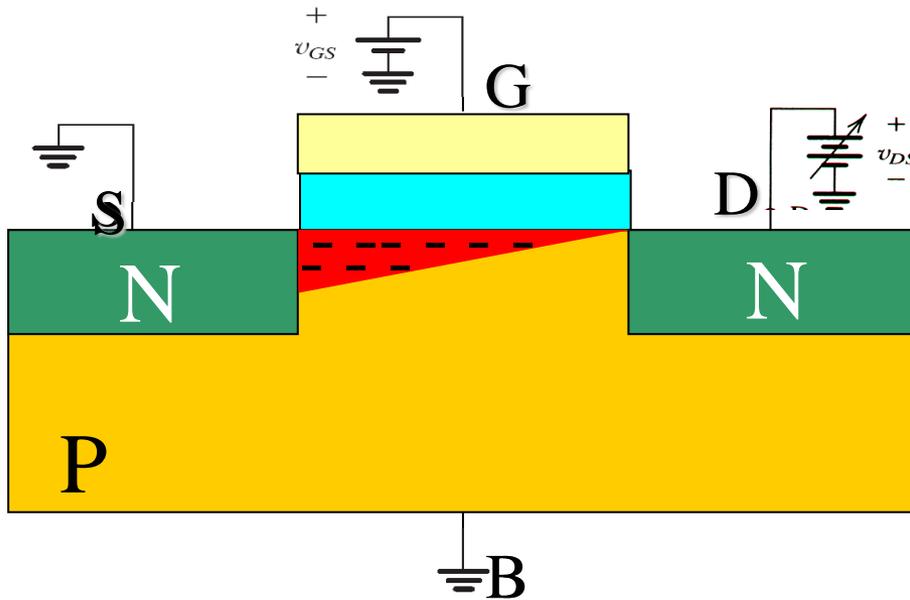
$$i_D = \mu_n \cdot C_{OX} \cdot \frac{W}{L} \left[(v_{GS} - V_t) \cdot v_{DS} - \frac{v_{DS}^2}{2} \right]$$

para $0 < v_{DS} \leq v_{GS} - V_t = v_{OV}$

v_{OV} = tensão de *overdrive*
(sobre-tensão de condução)



Determinação da relação $i_D - v_{DS}$ (v_{GS}) Região de Saturação

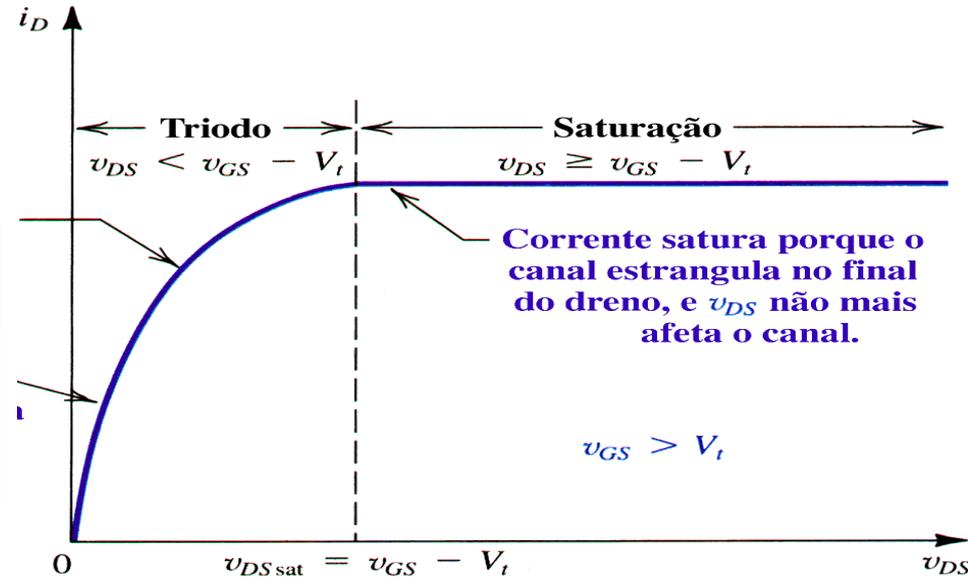
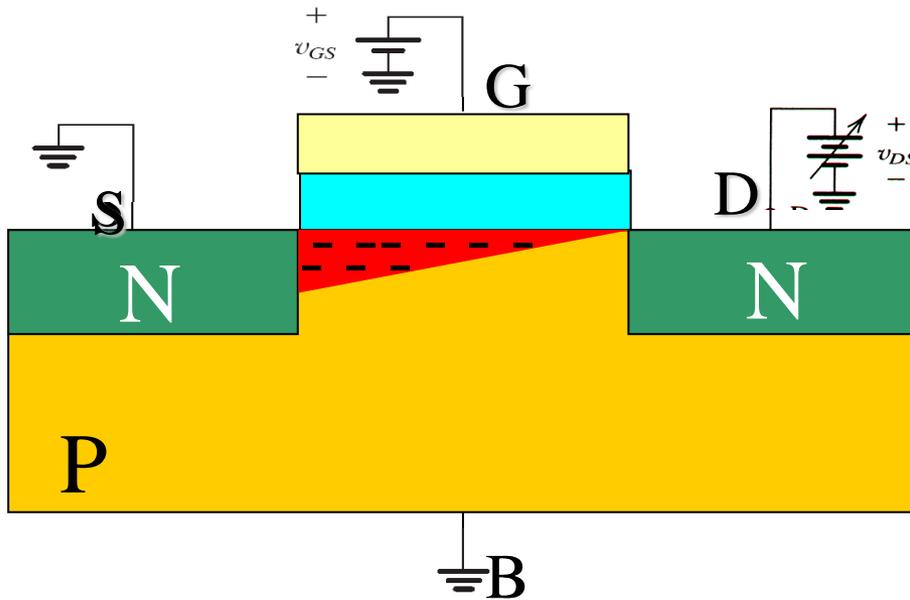


$$di_D/dv_{DS} = \mu_n \cdot C_{OX} \cdot \frac{W}{L} [(v_{GS} - V_t) - v_{DS}] = 0$$

$$[(v_{GS} - V_t) - v_{DS}] = 0$$

$$V_{DS} = v_{GS} - V_t = V_{DSsat}$$

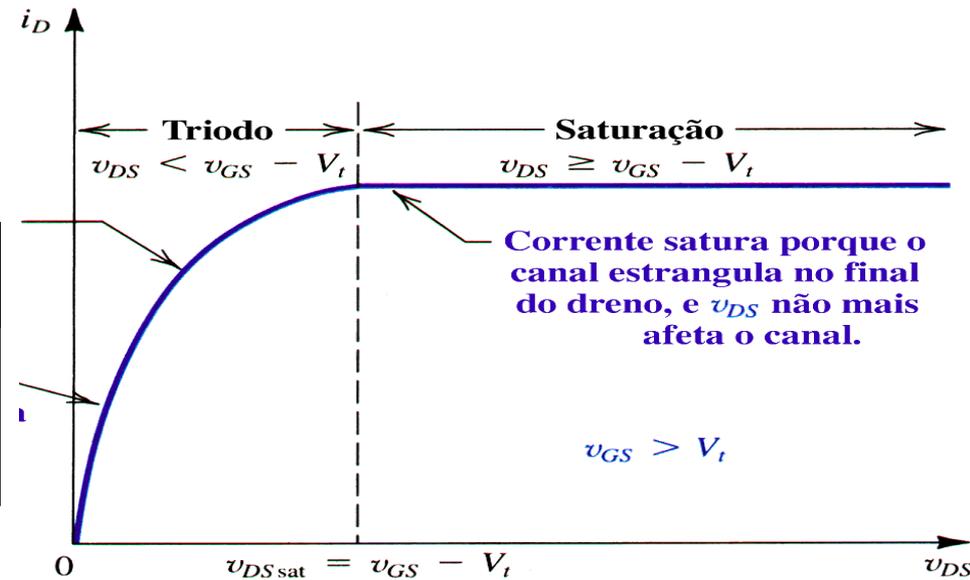
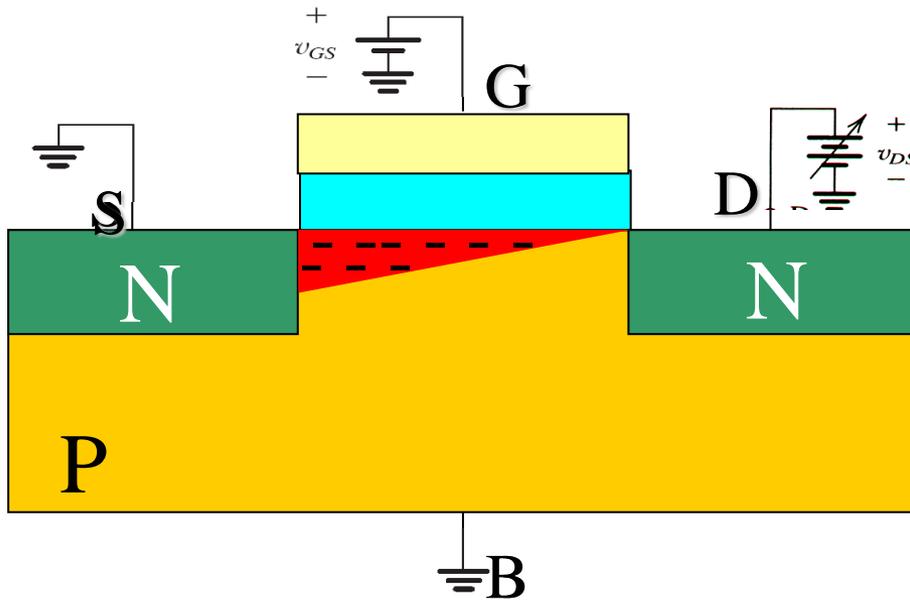
Determinação da relação $i_D - v_{DS}$ (v_{GS}) Região de Saturação



Para $v_{DS} = v_{GS} - V_t$

$$i_D = \mu_n \cdot C_{OX} \cdot \frac{W}{L} \left[(v_{GS} - V_t) \cdot (v_{GS} - V_t) - \frac{(v_{GS} - V_t)^2}{2} \right]$$

Determinação da relação $i_D - v_{DS}$ (v_{GS}) Região de Saturação



$$i_D = \mu_n \cdot C_{OX} \cdot \frac{W}{L} \left[\frac{(v_{GS} - V_t)^2}{2} \right]$$

Para $v_{DS} \geq v_{GS} - V_t$

Modelo de $i_D = f(v_{GS}, v_{DS})$ de 1ª Ordem

- **Região de Corte:** $v_{GS} \leq V_t$ ou $v_{GS} - V_t \leq 0$

$$i_D = 0$$

- **Região Triodo:** $0 < v_{DS} \leq v_{GS} - V_t$

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

- **Região de Saturação:** $0 < v_{GS} - V_t \leq v_{DS}$

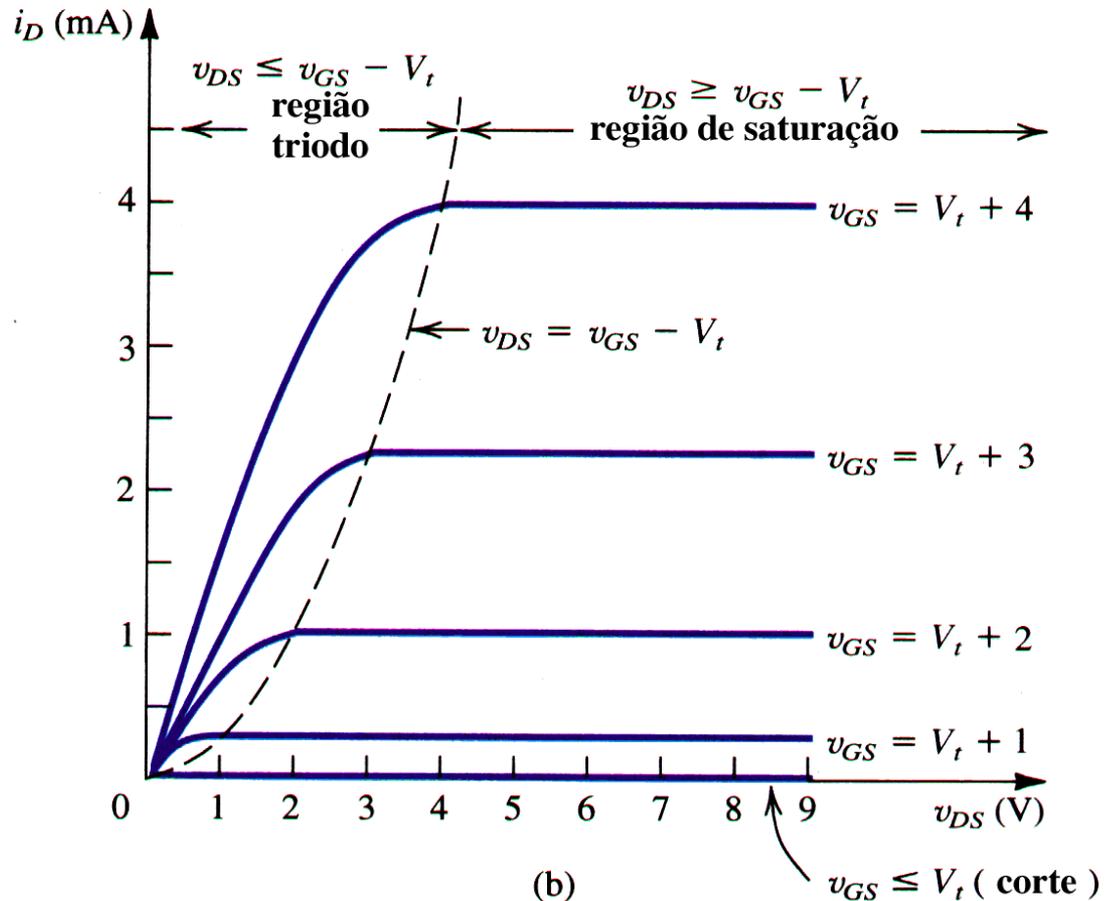
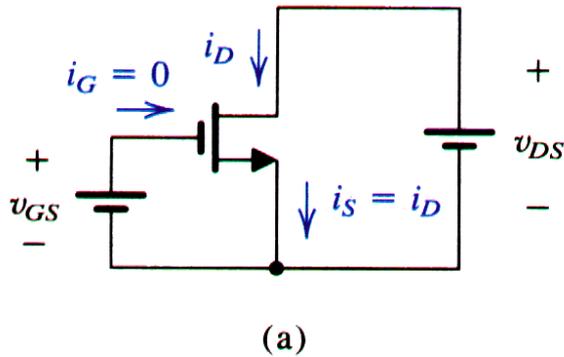
$$i_D = k'_n \frac{W}{L} \frac{(v_{GS} - V_t)^2}{2}$$

onde $k'_n = \frac{\mu_n \epsilon_{OX}}{t_{OX}} = \mu_n \cdot C_{OX}$

sendo $v_{GS} - V_t = v_{OV}$

↑
Parametro de Transcondutância do processo [A/V²]

Características de Corrente-Tensão de um NMOSFET



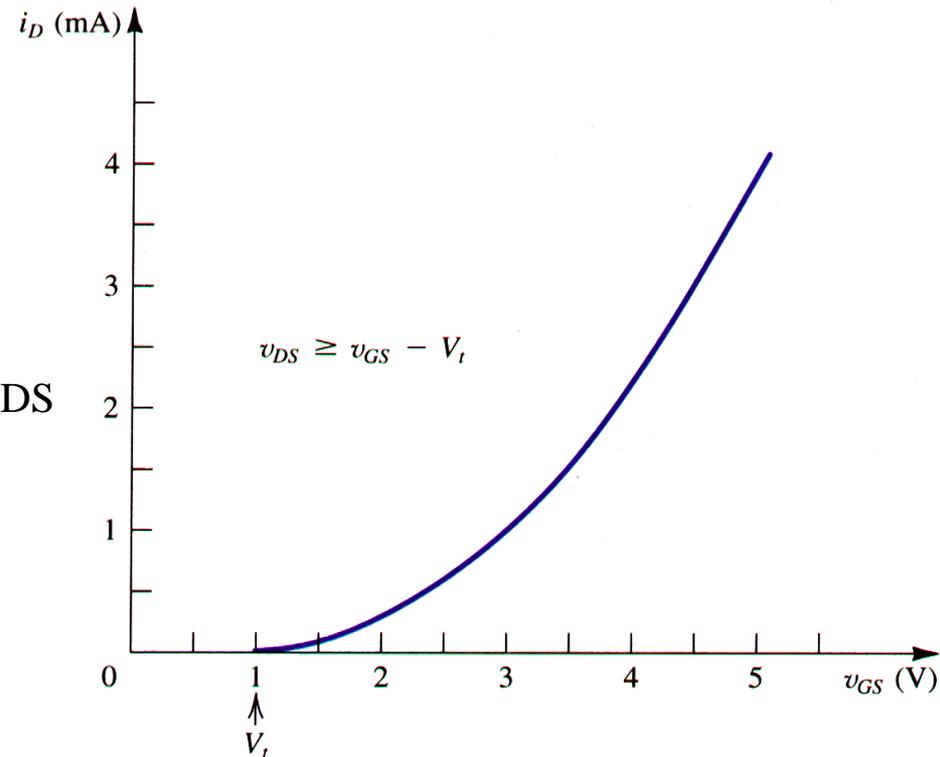
Características de Corrente-Tensão de um NMOSFET

- **Região Triodo:** $0 < v_{DS} \leq v_{GS} - V_t$

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

- **Região de Saturação:** $0 < v_{GS} - V_t \leq v_{DS}$

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



Exemplo 4.1 (pag. 148 do Livro texto)

Exemplo 4.1 - Considere um processo tecnológico onde $L_{\min}=0,4 \mu\text{m}$, $t_{\text{ox}} = 8 \text{ nm}$, $\mu_n=450 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $V_t=0,7\text{V}$.

Dados: $\epsilon_{\text{ox}} = 3,45 \cdot 10^{-13} \text{F/cm}$

(a) Determine C_{ox} e k_n

(b) Para um MOSFET com $W/L = 8 \mu\text{m}/0,8 \mu\text{m}$, calcule os valores de V_{GS} e V_{DSmin} necessários para operar o transistor na saturação com uma corrente $I_D=100 \mu\text{A}$

(c) Para o dispositivo em (b) determine o valor de V_{GS} onde o transistor opera como um resistor de 1000Ω para pequenos V_{DS}

Exercício: Desenhe as curvas características do NMOS abaixo e o perfil de carga

$$k'_n = \frac{\mu_n \epsilon_{ox}}{t_{ox}} = \mu_n \cdot C_{ox}$$

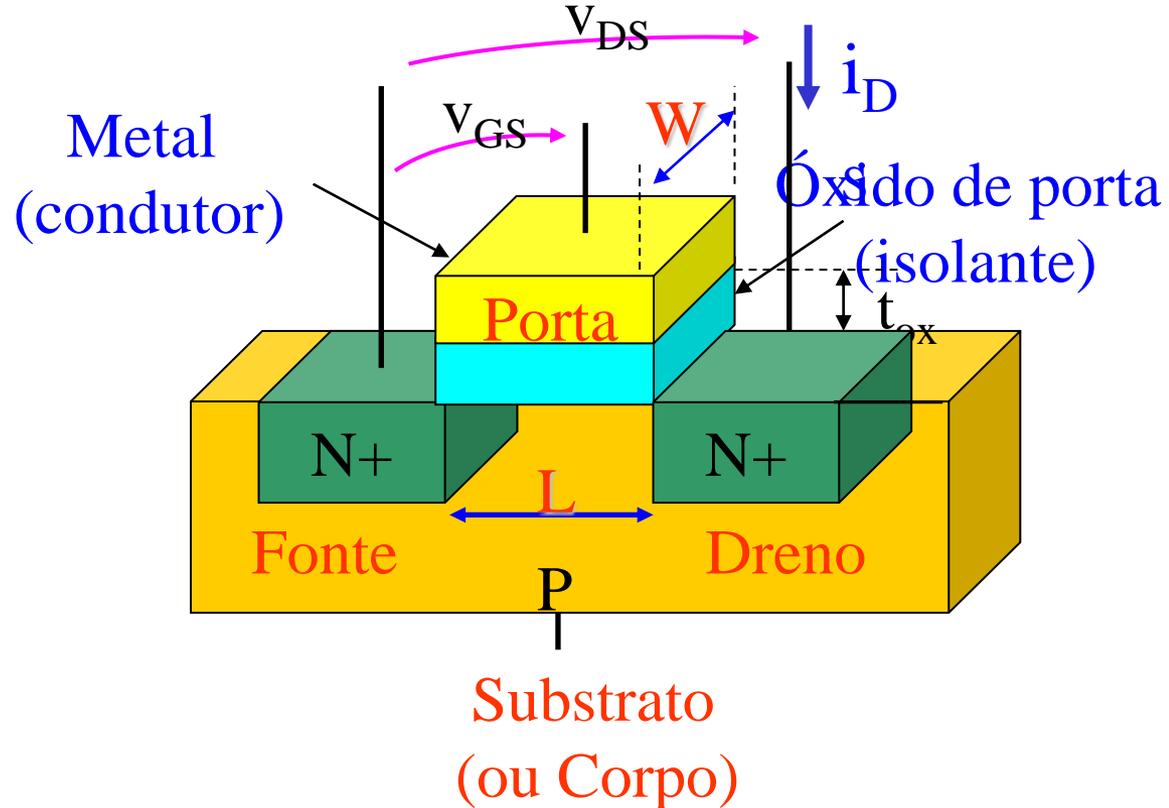
$$\mu_n = 500 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$$

$$\epsilon_{ox}/t_{ox} = 2 \text{ }\mu\text{F}/\text{cm}^2$$

$$L = 10 \text{ }\mu\text{m}$$

$$W = 100 \text{ }\mu\text{m}$$

$$V_t = 1 \text{ V}$$



- **Região Triodo:** $0 < v_{DS} \leq v_{GS} - V_t$
- **Região de Saturação:** $0 < v_{GS} - V_t \leq v_{DS}$

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

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

Exercício: Desenhe as curvas características do NMOSFET abaixo e o perfil de carga

$$k'_n = \frac{\mu_n \epsilon_{ox}}{t_{ox}} = \mu_n \cdot C_{ox}$$

$$\mu_n = 500 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$$

$$\epsilon_{ox}/t_{ox} = 2 \text{ }\mu\text{F}/\text{cm}^2$$

$$L = 10 \text{ }\mu\text{m}$$

$$W = 100 \text{ }\mu\text{m}$$

$$V_t = 1 \text{ V}$$

