

Sistemas Electrónicos



Capítulo 5: O transistor MOS

Ernesto Martins

evm@ua.pt

DETI (gab. 4.2.38)

Universidade de Aveiro



Sistemas Electrónicos – 2020/2021

Sumário

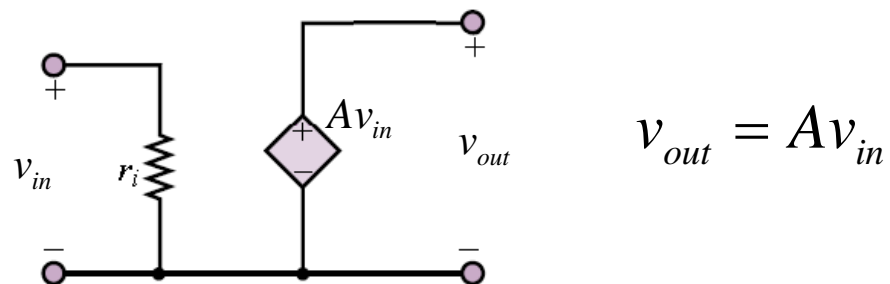
- **Introdução;**
- **Estrutura física e funcionamento do MOSFET;**
- **Característica tensão/corrente;**
- **Modelo quadrático do NMOS;**
- **PMOS de enriquecimento e modelo quadrático;**
- **Exemplo de cálculo;**
- **Capacidades do MOSFET.**

Introdução

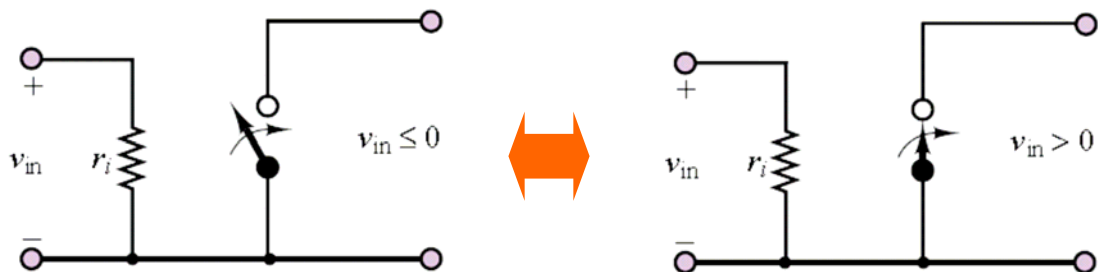
O que é um transístor?

- Dispositivo semiconductor que pode funcionar como:

Amplificador



Interruptor electrónico



E. Martins, DET Universidade de Aveiro

5-3

Introdução



- Transístores são dispositivos de **3 terminais**.
- Duas grandes famílias:
 - transístores **bipolares**, ou **BJT**;
 - transístores de **efeito de campo**, ou **FET**.
- Vamos focar a nossa atenção no uso do transístor em circuitos digitais – transístor como interruptor;
- O **transístor MOS**, ou **MOSFET** (*Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor*), é o dispositivo base de mais de **99%** dos circuitos integrados digitais.

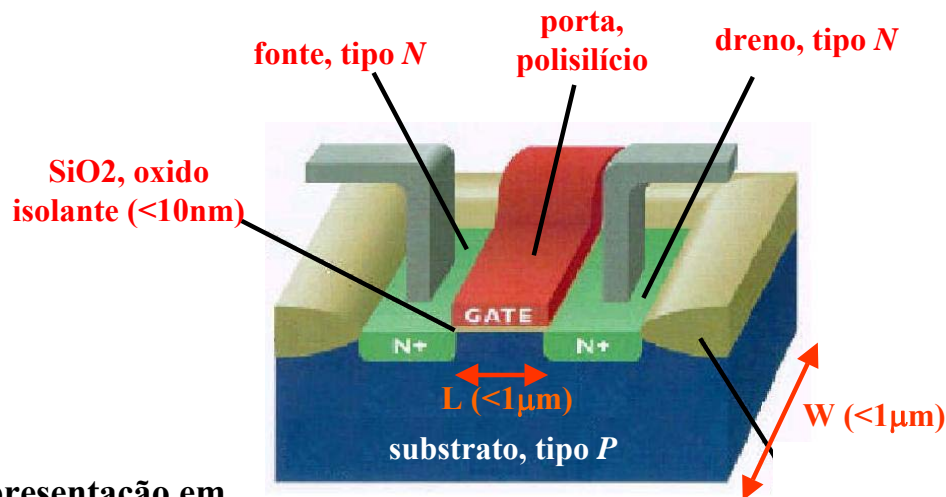
Estrutura física e funcionamento do MOSFET

E. Martins, DET Universidade de Aveiro

5-5

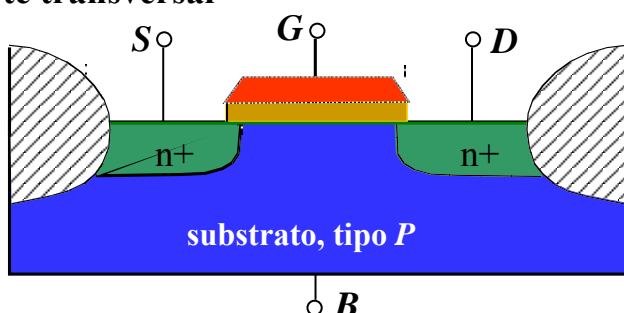
Sistemas Electrónicos – 2020/2021

Estrutura do MOSFET de canal N (NMOS)

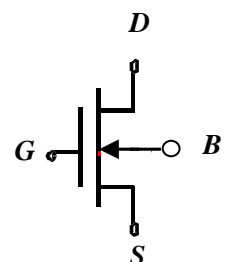


- Dispositivo simétrico: dreno é, por convenção, o terminal de maior tensão ($I_{DS} > 0$);
- Substrato é ligado à tensão mais baixa do circuito (em geral, GND).

Representação em corte transversal



simbolo:
Transistor NMOS de enriquecimento



E. Martins, DET Universidade de Aveiro

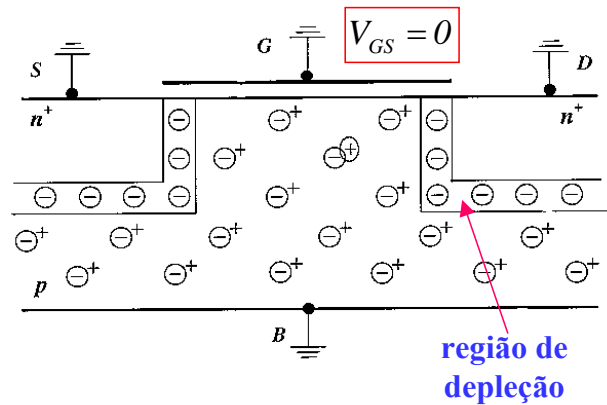
5-6

Funcionamento

$$V_{GS} = V_{DS} = 0$$

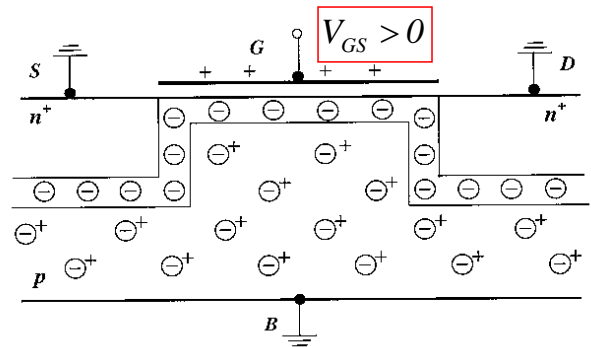
- Como $N_D \gg N_A$ temos a região de depleção toda do lado do substrato.

- Entre o dreno e a fonte temos **duas junções p-n** em oposição: não existe condução dreno-fonte.



$$V_{GS} > 0 \text{ (mas pequeno!)} \text{ e } V_{DS} = 0$$

- Tensão na porta repele lacunas para baixo, criando zona de carga negativa correspondente aos iões receptores que ficam a 'descoberto';
- Região negativa por debaixo da porta é uma extensão da região de depleção.



Funcionamento

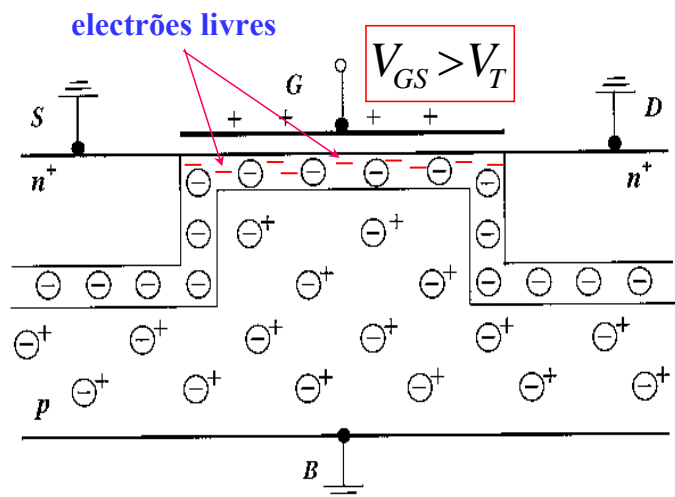
$$V_{GS} \geq V_T \text{ e } V_{DS} = 0$$

- Quando V_{GS} ultrapassa determinado limite, o campo eléctrico torna-se suficiente para atrair electrões livres das regiões da fonte e do dreno para a região de depleção debaixo da porta;

- Este fenómeno designa-se por **inversão forte**;

- Essa região de cargas móveis (electrões) forma um canal condutor e designa-se por **canal de inversão**;

- O valor limite de V_{GS} designa-se por tensão de **limiar**, V_T ;

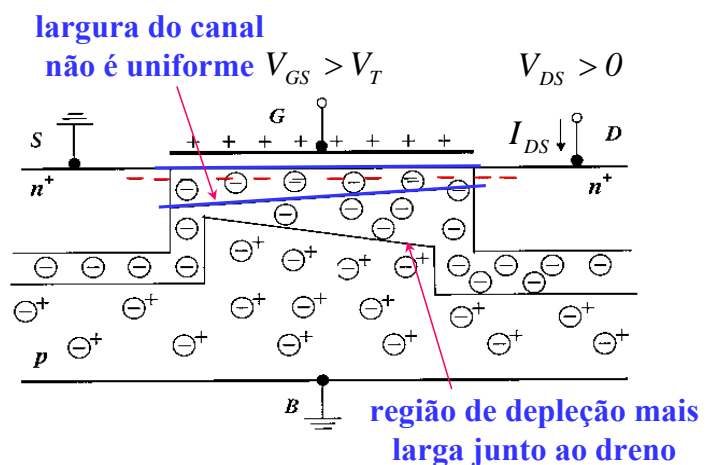


Funcionamento

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

● Para $V_{DS} > 0$ a região de depleção junto do dreno torna-se mais larga do que junto da fonte (porque a junção p-n dreno-substrato fica inversamente polarizada);

● Como $V_{GD} (= V_{GS} - V_{DS}) < V_{GS}$, a tensão porta-canál junto do dreno é menor do que junto da fonte. O canal fica, portanto, mais estreito junto do dreno;



Funcionamento

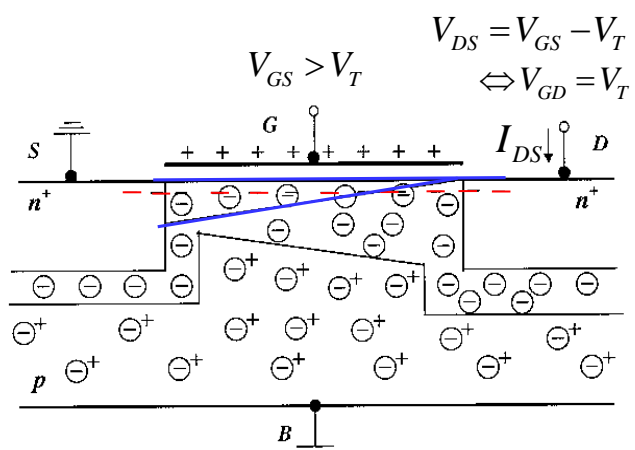
$$V_{GS} > V_T \text{ e } V_{DS} = V_{GS} - V_T$$

● Se V_{DS} aumentar mais, $V_{GD} (= V_{GS} - V_{DS})$ diminui e o canal pode colapsar junto do dreno;

● Para $V_{DS} = V_{GS} - V_T$ ($V_{GD} = V_T$) o canal fica **completamente estrangulado (pinched-off)** junto do dreno;

● $V_{GS} - V_T$ é designada por **tensão de pinch-off**;

● Com $V_{GD} = V_T$ a resistência dreno-fonte torna-se muito elevada. A corrente de dreno passa a depender pouco de V_{DS} .

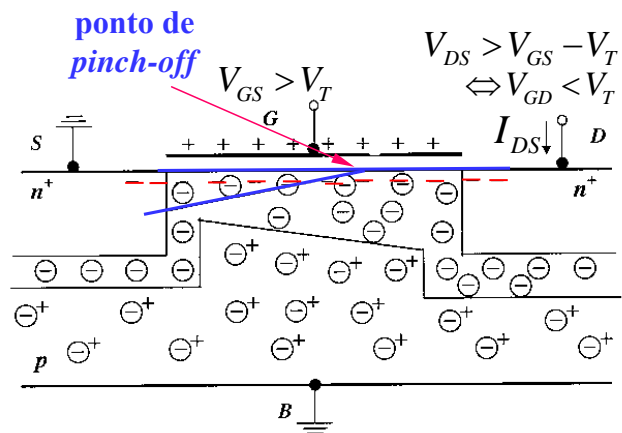


Funcionamento

$$V_{GS} > V_T \text{ e } V_{DS} > V_{GS} - V_T$$

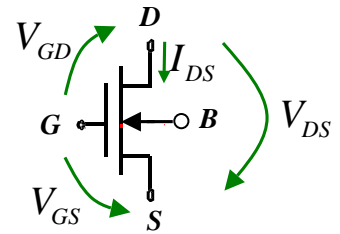
● Com $V_{DS} > V_{GS} - V_T$ ($V_{GD} < V_T$) a região de depleção alarga mais junto do dreno e o **ponto de pinch-off desloca-se em direcção à fonte**, ficando o canal mais curto;

● A redução do comprimento efectivo do canal resulta num ligeiro aumento de I_{DS} com V_{DS} .



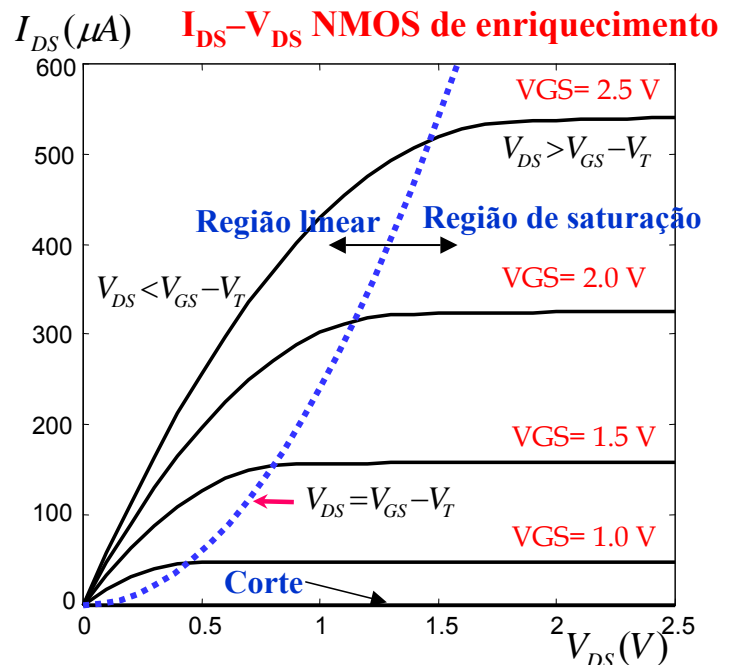
MOSFET: Modelo matemático, PMOS e capacidades intrínsecas

Característica $I_{DS}-V_{DS}$ do MOSFET



- **Região de operação** depende das tensões V_G , V_D e V_S ;

- **Corte:** Não existe canal de inversão;
- **Linear ou triodo** - Canal de inversão mais ou menos uniforme; condutância entre dreno e fonte é controlada por V_{GS} ;
- **Saturação:** Canal estrangulado no dreno; transistor funciona como fonte de corrente controlada por V_{GS} .



E. Martins, DET Universidade de Aveiro

5-13

Modelo quadrático ou de Shockley

$$I_{DS} = \begin{cases} 0 & \text{para } V_{GS} \leq V_T \quad \text{Corte} \\ k[2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2] & \text{para } V_{GS} > V_T \text{ e } V_{GD} > V_T \quad \text{Linear} \\ k(V_{GS} - V_T)^2 & \text{para } V_{GS} > V_T \text{ e } V_{GD} \leq V_T \quad \text{Saturação} \end{cases}$$

k tem dimensões de A/V^2 :

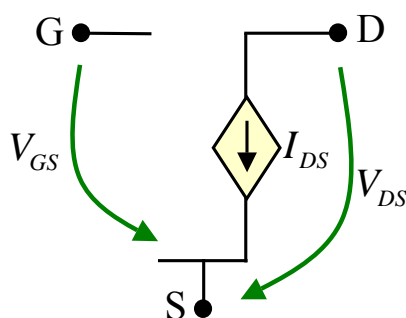
$$k = \frac{1}{2} k' \frac{W}{L}, \quad k' = \mu_n \cdot C_{OX}$$

W/L é a razão geométrica;

k' é a transcondutância do processo;

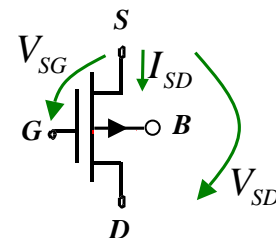
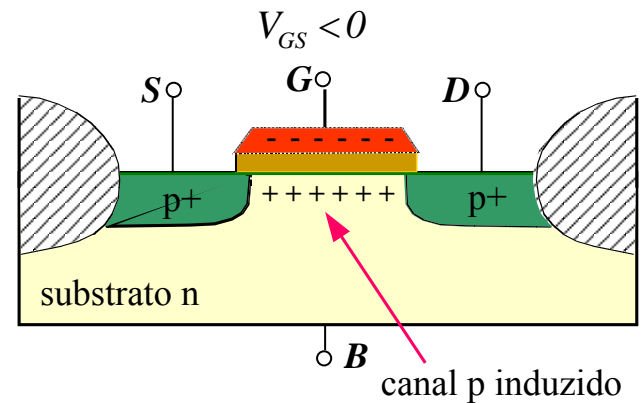
C_{OX} é a capacidade por unidade de área;

μ_n é a mobilidade de superfície (electrões).



PMOS de enriquecimento

- Substrato n ; fonte e dreno p ;
- Para induzir um canal é necessário $V_{GS} < 0$, logo $V_T < 0$;
- Portadores de corrente são lacunas;
- As expressões do Modelo Quadrático são aplicáveis desde que se considerem todas as tensões e correntes negativas;
- ... mas como é mais cómodo trabalhar com valores positivos, é preferível trocar os índices das tensões e correntes.
- Terminal de substrato ligado à tensão mais positiva;



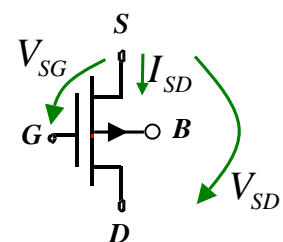
Modelo quadrático aplicado ao PMOS

$$I_{SD} = \begin{cases} 0 & \text{para } V_{SG} \leq |V_T| \quad \text{Corte} \\ k[2(V_{SG} - |V_T|)V_{SD} - V_{SD}^2] & \text{para } V_{SG} > |V_T| \text{ e } V_{DG} > |V_T| \quad \text{Linear} \\ k(V_{SG} - |V_T|)^2 & \text{para } V_{SG} > |V_T| \text{ e } V_{DG} \leq |V_T| \quad \text{Saturação} \end{cases}$$

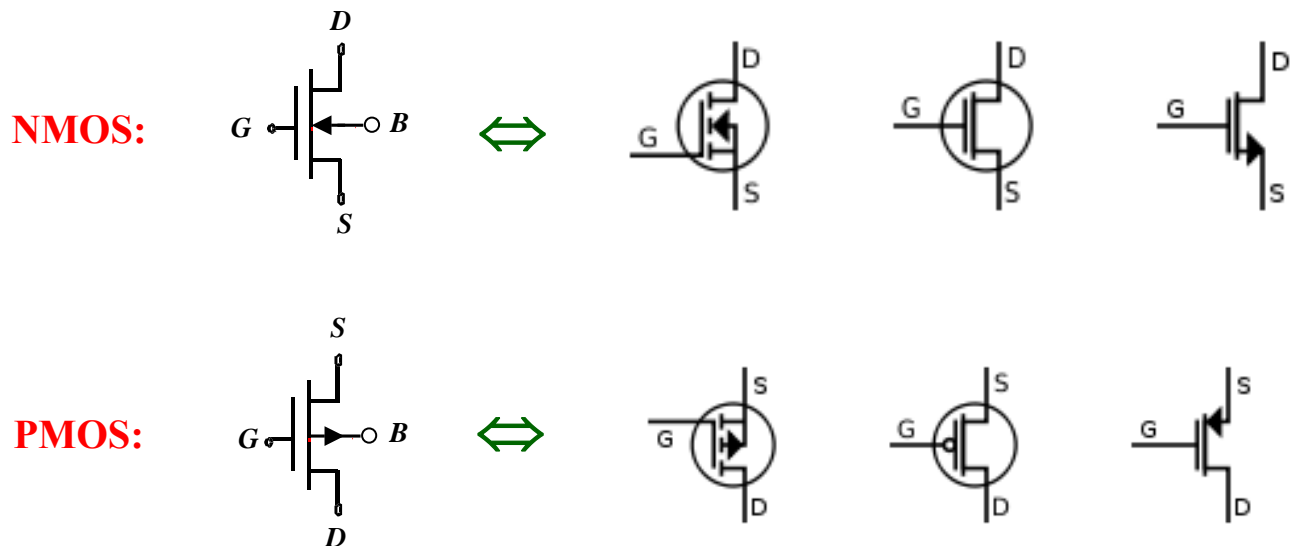
- Notar os **índices trocados** nas tensões e corrente e a tensão de limiar que aparece **em módulo**.

$$k = \frac{1}{2} k' \frac{W}{L}, \quad k' = \mu_p \cdot C_{ox}$$

- Em geral μ_n é 2 a 4x maior que μ_p



Símbolos equivalentes NMOS e PMOS



- Quando o terminal de substrato não é representado, ele é assumido ligado à **tensão mais baixa (NMOS)** ou à **tensão mais alta (PMOS)** do circuito.

Exemplo

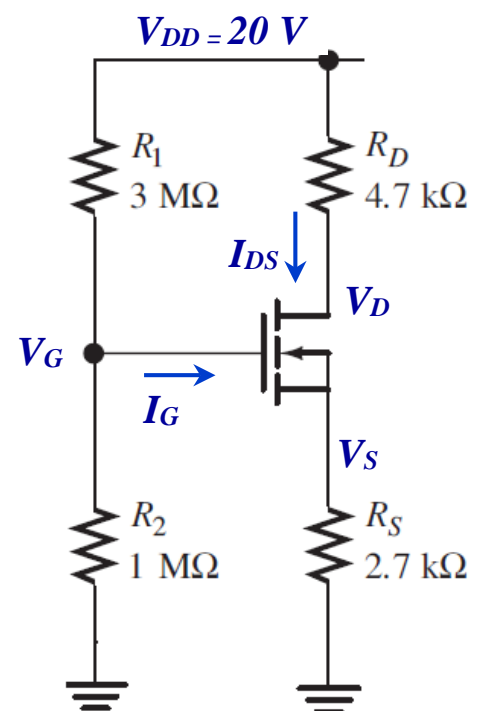
Sabendo que $V_T = 2V$, $k' = 50\mu A/V^2$, $W = 20\mu m$ e $L = 0.5\mu m$, calcular I_{DS} e V_D .

Primeiro calculamos a **transcondutância** do transistor:

$$k = \frac{1}{2} k' \frac{W}{L} = \frac{1}{2} (50\mu) \frac{20}{0.5} = 1mA/V^2$$

Como $I_G = 0A$, a tensão V_G pode calcular-se usando a expressão do divisor de tensão:

$$V_G = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD} = \frac{1}{3+1} 20 = 5V$$



Como não sabemos se o transistor está **linear** ou **saturado**, vamos admitir arbitrariamente que está numa das regiões.

Supúnhamos que o consideramos saturado:

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

A tensão V_G também se pode escrever como:

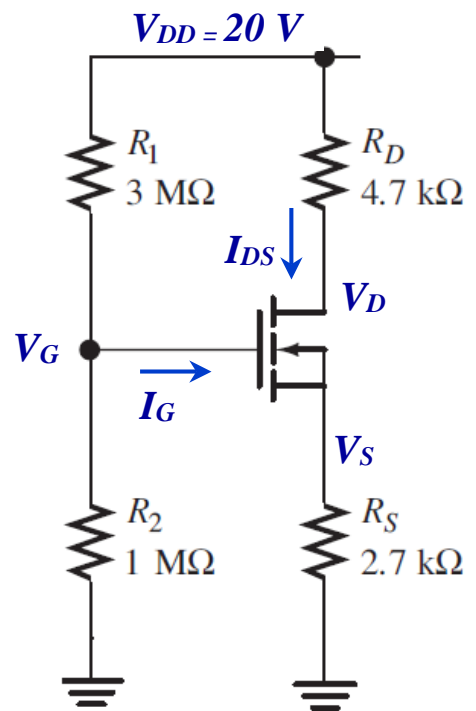
$$V_G = V_{GS} + R_S I_{DS}$$

Substituindo nesta expressão a anterior...

$$V_{GS}^2 + \left(\frac{1}{kR_S} - 2V_T \right) V_{GS} + V_T^2 - \frac{V_G}{kR_S} = 0$$

Substituindo valores, obtemos:

$$V_{GS}^2 - 3.63V_{GS} + 2.148 = 0$$



$$V_{GS}^2 - 3.63V_{GS} + 2.148 = 0$$

Cujas soluções são:

$$V_{GS} = 2.886V \quad \vee \quad V_{GS} = 0.744V$$

A segunda solução é $< V_T = 2V$, logo é descartada

Usando a primeira solução

$$I_{DS} = k(V_{GS} - V_T)^2 = 1(2.89 - 2)^2 = 0.79mA$$

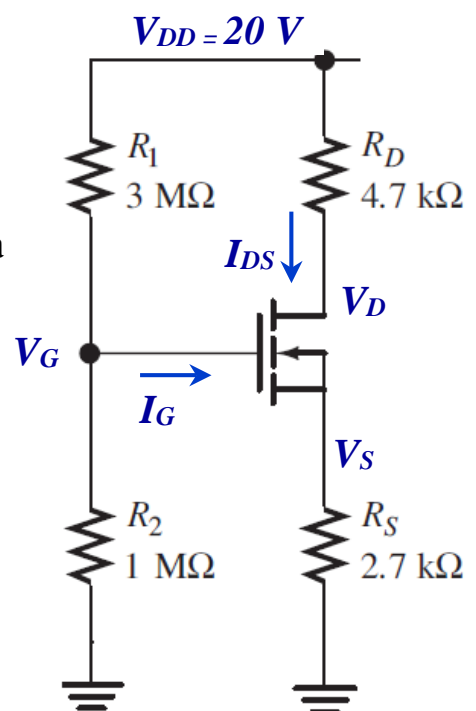
V_D é dado por

$$V_D = V_{DD} - R_D I_{DS} = 20 - 4.7(0.79) = 16.3V$$

Com esta tensão temos

$$V_{GD} = V_G - V_D = 5 - 16.3 = -11.3V < V_T$$

O que confirma que o transistor está **efectivamente saturado**.



Capacidades intrínsecas do MOSFET

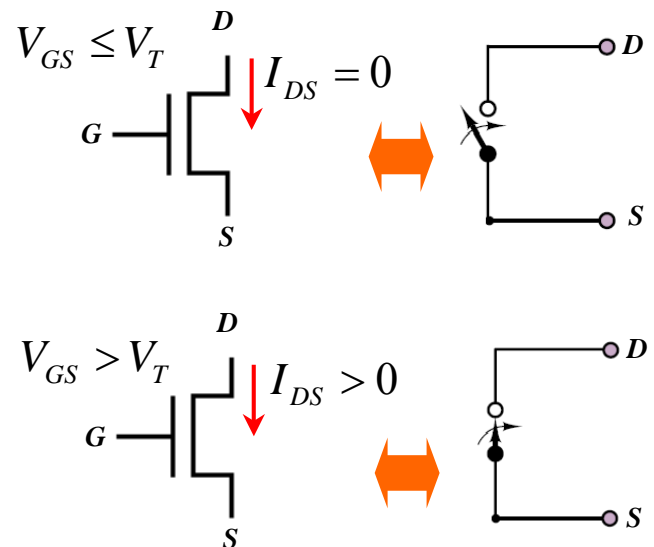
● Nos circuitos digitais o MOSFET funciona como um interruptor controlado por tensão;

● A **velocidade** com que o “interruptor” liga/desliga depende do tempo necessário para carregar e descarregar as **capacidades...**

- **de carga;**
- **intrínsecas** ao dispositivo.

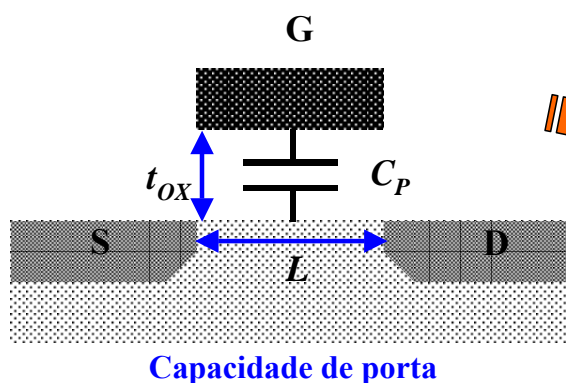
● MOSFET apresenta **2 tipos principais** de capacidades intrínsecas:

- a do canal de inversão;
- as das junções *pn* SB e DB.



Capacidade do canal

● Estrutura física do MOSFET forma um condensador que é essencial ao funcionamento do dispositivo;



$$C_P = \epsilon_{ox} \frac{WL}{t_{ox}} = C_{ox} WL$$

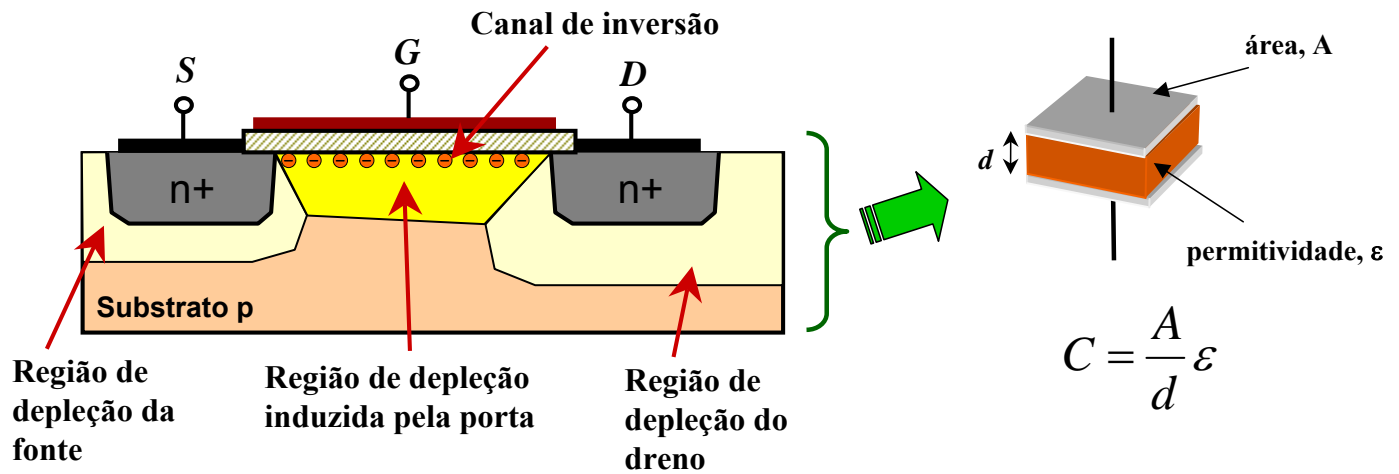
capacidade por unidade de área

● Responsável pela carga de portadores induzida no canal;

● ... no entanto **é um condensador**, e como tal precisa de ser carregado e descarregado sempre que a tensão na porta muda – e isso leva tempo!

Capacidades de depleção das junções SB e DB

- Junções *pn* fonte-substrato (SB) e dreno-substrato (DB) funcionam inversamente polarizadas;



- As regiões de depleção funcionam como o dieléctrico de um condensador altamente não-linear... que também atrasa a comutação do ‘interruptor’.