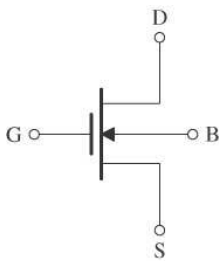


# Sinais e Sistemas Electrónicos



## Capítulo 8: O transistor MOS (parte 2)



Ernesto Martins  
[evm@ua.pt](mailto:evm@ua.pt)  
DETI (gab. 4.2.38)  
Universidade de Aveiro



Sinais e Sistemas Electrónicos – 2022/2023

### Sumário

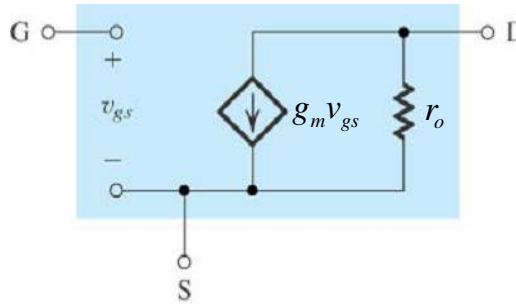
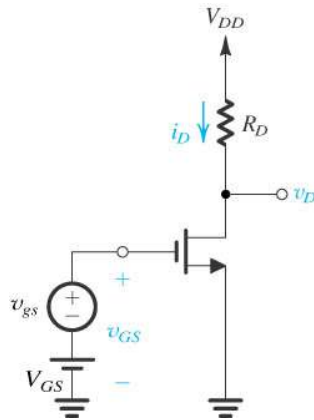
- MOSFET como amplificador;
- MOSFET como interruptor electrónico;
- Aplicações do MOSFET como interruptor:
  - Interruptor de potência;
  - Interruptor analógico;
  - Circuitos digitais;
- Capacidades intrínsecas do MOSFET.

## Modelo de pequeno sinal do MOSFET

● Usando a relação exponencial  $i_{DS} / v_{GS}$  do MOSFET na região de saturação:  $i_{DS} = k(v_{GS} - V_T)^2$

e a aproximação de pequeno sinal:  $v_{gs} \ll 2(V_{GS} - V_T)$

é possível mostrar que  $g_m = 2k(V_{GS} - V_T)$  ou  $g_m = 2\sqrt{kI_{DS}}$



$$r_o = \frac{|V_A|}{I_{DS}}$$

● Em que  $r_o$  surge pelo facto da fonte de corrente não ser, na realidade, ideal ( $V_A$  é uma constante).

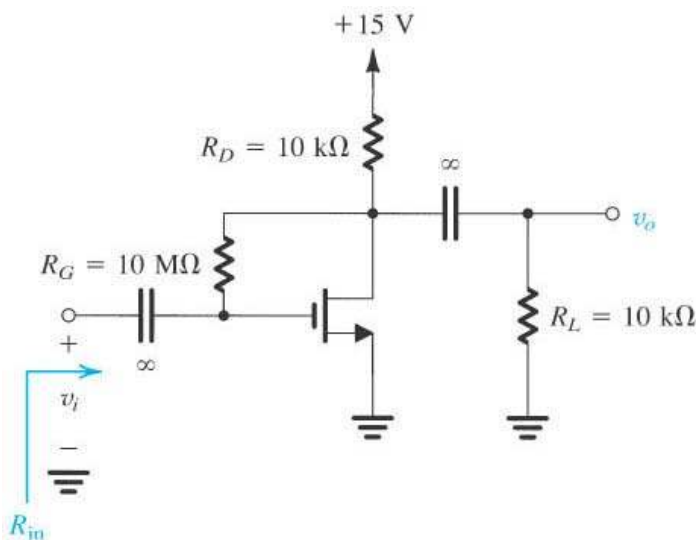
## Aplicação do modelo de pequeno sinal

Na análise de um amplificador com MOSFET **separamos os cálculos** da polarização daqueles que dizem respeito ao comportamento com sinal:

- 1) Determinar as tensões de polarização e a corrente de dreno;
- 2) Calcular os valores dos parâmetros do modelo:  $g_m$  e  $r_o$ .
- 3) Eliminar as fontes de tensão DC, substituindo-as por curto-circuitos (*Princípio da Sobreposição*);
- 4) Substituir o(s) transístor(es) pelo circuito do modelo de pequeno sinal;
- 5) Usar as técnicas adequadas de análise de circuitos para obter *ganho, resistência de entrada, etc.*

## Exemplo 2

Sabendo que os parâmetros do MOSFET são  $V_T = 1.5V$ ,  $k = 0.125mA/V^2$ , e  $V_A = 50V$  calcular o **ganho de tensão**,  $A_v \equiv v_o/v_i$ , e a **resistência de entrada**,  $R_{in}$ , do amplificador.



### Notar que:

- MOSFET é polarizado pelas resistências  $R_D$  e  $R_G$ ;
- Os condensadores de acoplamento são de capacidade suficientemente elevada para que a sua impedância possa ser considerada nula para as frequências de interesse.
- $R_L$  representa a carga onde o amplificador vai ser ligado;

E. Martins, DET Universidade de Aveiro

8.2-5

### Note-se que

como  $I_G = 0$ , então  $V_G = V_D$  ou seja,  $V_{GD} = 0 < V_T$ , pelo que o MOSFET está necessariamente na **região de saturação** como é suposto.

A corrente de dreno é dada por

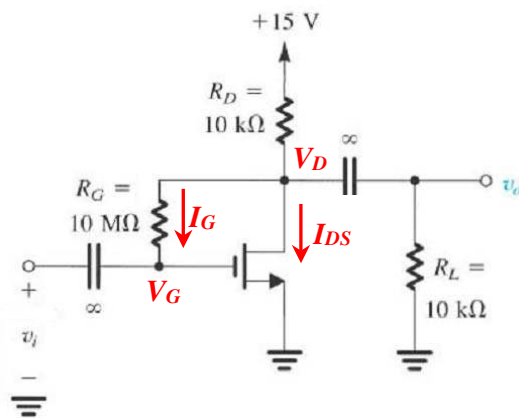
$$I_{DS} = k(V_G - V_T)^2 = 0.125(V_D - 1.5)^2$$

Por outro lado sabemos que

$$V_D = 15 - R_D I_{DS} = 15 - 10 I_{DS}$$

Substituindo  $I_{DS}$  na primeira equação obtém-se:

$$V_D = 4.4V \quad \vee \quad V_D = -2.2V$$



A solução é portanto

$$V_D = 4.4V$$

O correspondente valor de  $I_{DS}$  é:

$$I_{DS} = 1.06mA$$

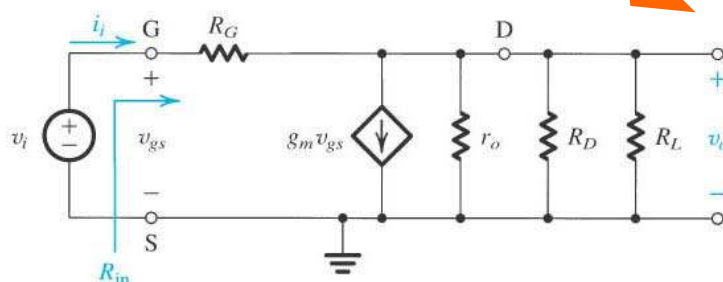
Com os valores obtidos calculamos os parâmetros do **modelo de pequeno sinal**

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

$$= 2(0.125)(4.4 - 1.5) = 0.725 \text{ mA/V}$$

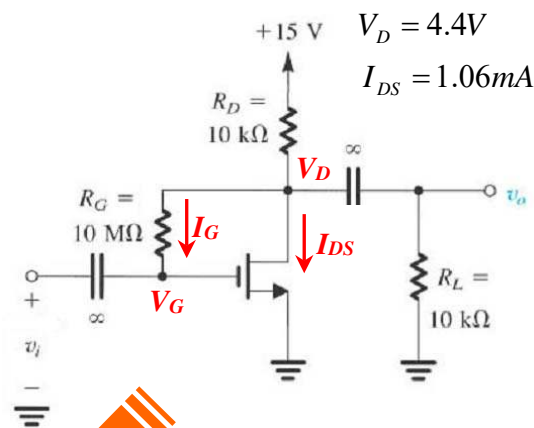
$$r_o = \frac{|V_A|}{I_{DS}} = \frac{50}{1.06} = 47 \text{ k}\Omega$$

E agora, o modelo de pequeno sinal...



E. Martins, DET Universidade de Aveiro

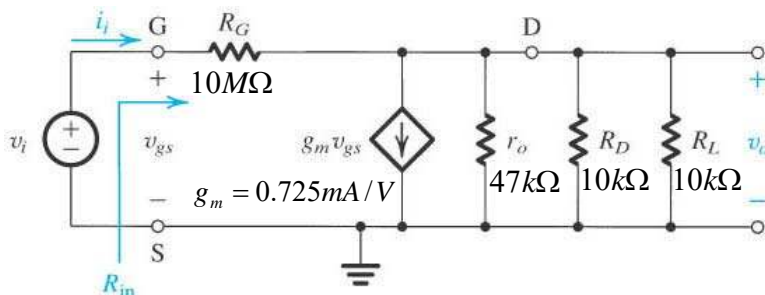
8.2-7



**Notar que:**

- Condensadores foram curto-circuitados;
- Tensão de alimentação substituída por curto-circuito.

como  $R_G$  é muito maior que as restantes resistências, podemos ignorar a corrente que a atravessa, pelo que,



$$v_o \approx -g_m v_{gs} (r_o \parallel R_D \parallel R_L) = -0.725 v_i (47 \parallel 10 \parallel 10) = -3.3 v_i$$

Portanto o valor de  $A_v$  é,  $A_v \equiv \frac{v_o}{v_i} = -3.3$

Vejamos agora a resistência de entrada  $R_{in}$ :

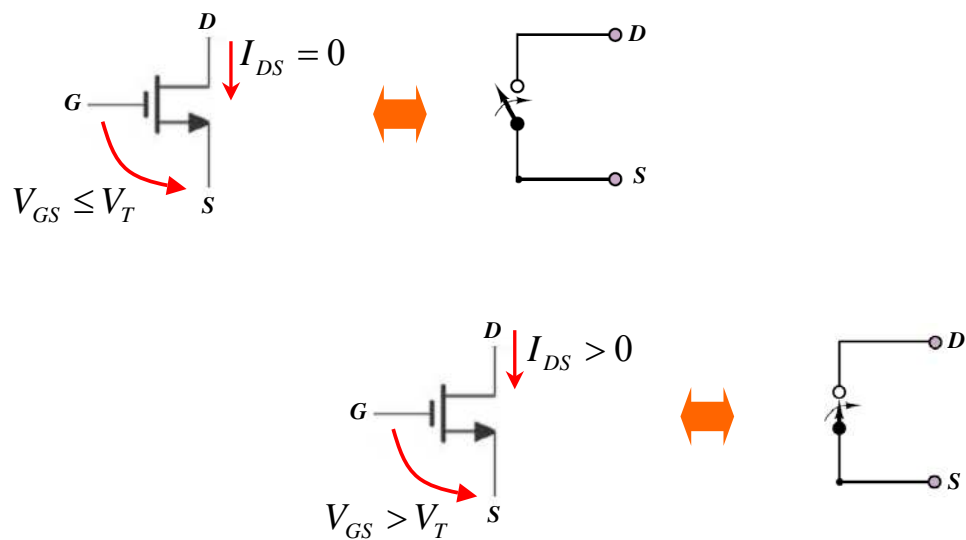
$$i_i = \frac{v_i - v_o}{R_G} = \frac{v_i}{R_G} \left( 1 - \frac{v_o}{v_i} \right) = \frac{v_i}{R_G} (1 - A_v)$$

$$R_{in} \text{ é: } R_{in} \equiv \frac{v_i}{i_i} = \frac{R_G}{(1 - A_v)} = \frac{10 \text{ M}\Omega}{(1 - (-3.3))} = 2.33 \text{ M}\Omega$$

## MOSFET como interruptor

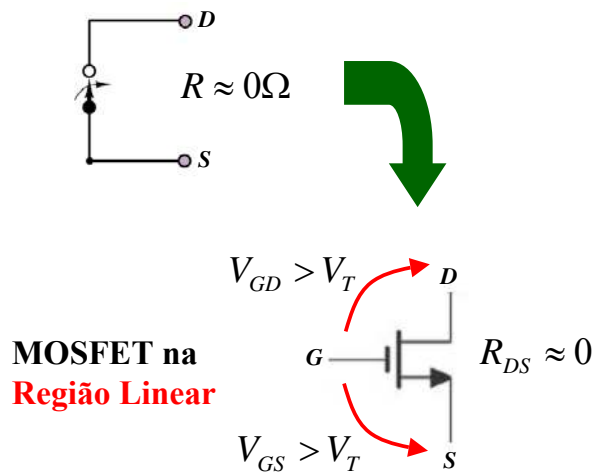
## MOSFET como interruptor

- Neste modo de funcionamento o MOSFET funciona como um **interruptor controlado por tensão**;

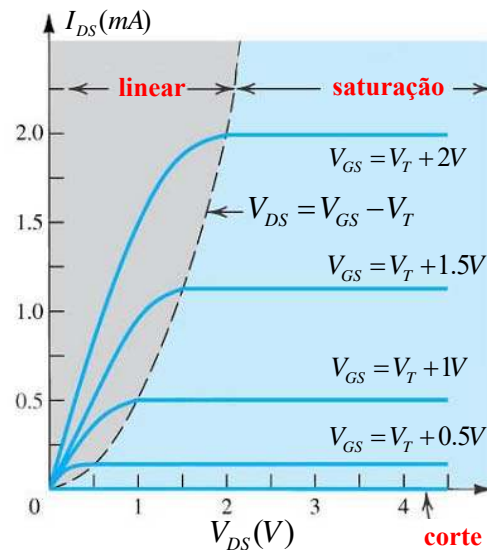


## MOSFET como interruptor

- Na posição de fechado o ‘interruptor’ deve ter a **menor resistência possível**, portanto o MOSFET deve estar a funcionar na **Região Linear**;



## MOSFET



## MOSFET como interruptor

Consideremos um MOSFET que funciona como interruptor para uma resistência de carga,  $R_L = 10K\Omega$

Admitamos para o MOSFET:  $V_T = 1V$  e  $k = 100\mu A/V^2$

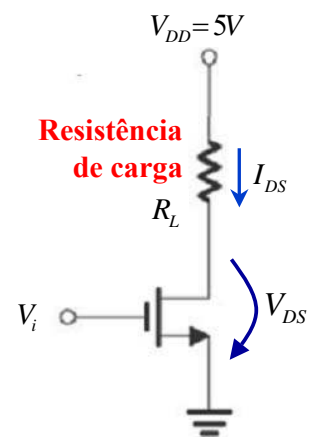
- Para  $V_i < V_T$  o MOSFET fica cortado, pelo que  $I_{DS} = 0$ ;
- Se  $V_i = V_{DD}$  o MOSFET conduz. Será que fica na **região linear**?... Vejamos:

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

- Além disso sabemos que:  $V_{DS} = V_{DD} - R_L I_{DS}$

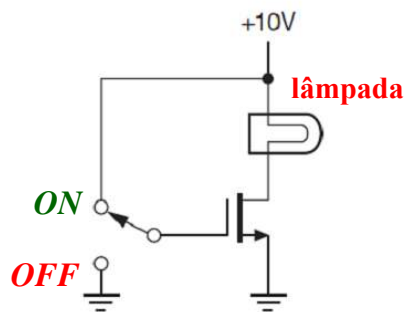
Substituindo aqui a equação de  $I_{DS}$  e resolvendo, obtemos:  $V_{DS} = 0.6V$

- Como  $V_{GD} = V_i - V_{DS} = 4.4V > V_T$  o que **confirma a região linear!**

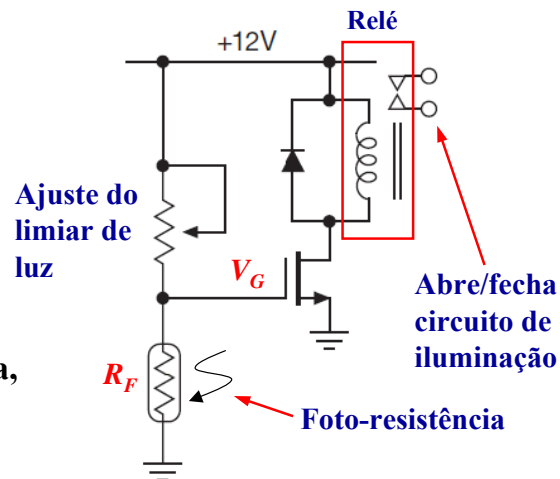


## Aplicação 1: Interruptor de potência

- Transístor é usado para controlar o estado *on/off* de uma carga



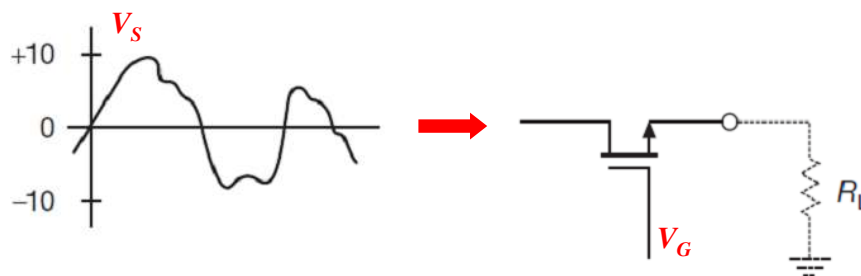
- Como a corrente de porta é nula, o MOSFET pode ser controlado por um microcontrolador;



- Quando anoitece,  $R_F$  aumenta, aumentando  $V_G$ . O transístor conduz, actuando no relé que liga o circuito de iluminação.

## Aplicação 2: Interruptor analógico

- Transístor é usado como um interruptor que bloqueia ou dá passagem a um sinal analógico;



$V_G = -15V$ : sinal  $V_S$  é bloqueado; Tensão em  $R_L$  é  $0V$ ;  
 $V_G = +15V$ : sinal  $V_S$  passa para  $R_L$ .

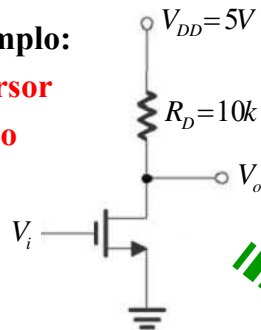
- Tensões de controlo da porta (neste caso,  $-15$  e  $+15V$ ) devem exceder a gama do sinal analógico  $V_S$  (neste caso,  $-10$  e  $+10V$ );
- MOSFET pode ser usado com interruptor bidireccional.

## Aplicação 3: Circuitos digitais

- Transístor é usado também como interruptor mas os sinais são considerados binários (digitais);

Exemplo:

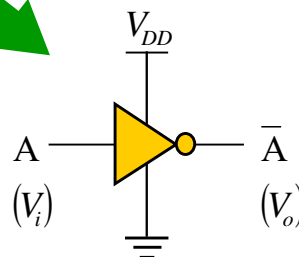
**inversor  
lógico**



$V_i$	$V_o$
$< V_T$	5V
5V	0.6V

- O circuito funciona como uma **porta lógica NOT** se considerarmos:

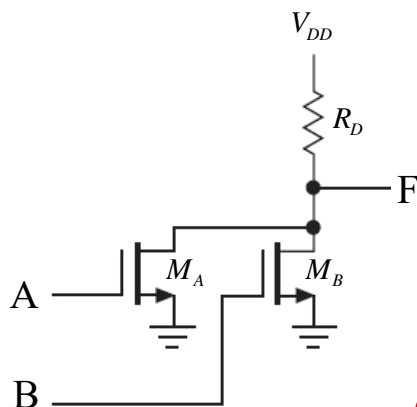
- '0'  $\Leftrightarrow$  Tensão inferior a  $V_T$
- '1'  $\Leftrightarrow$  Tensão igual a  $V_{DD}$



A	$\bar{A}$
0	1
1	0

## Aplicação 3: Circuitos digitais

- Porta lógica **NOR**



*Tabela de verdade*

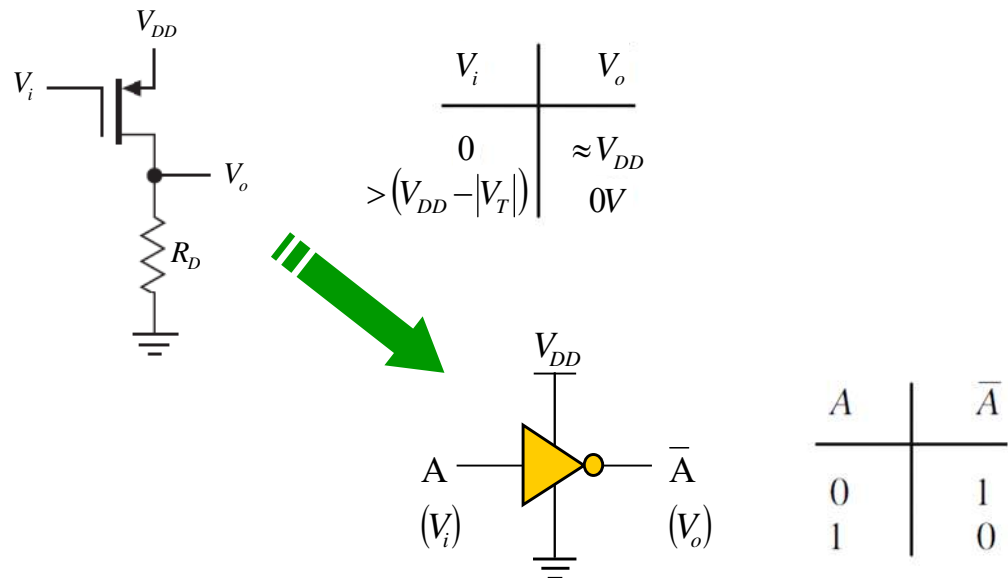
A	B	$M_A$	$M_B$	F
0	0	off	off	1
0	1	off	on	0
1	0	on	off	0
1	1	on	on	0

$$F = \overline{A + B}$$



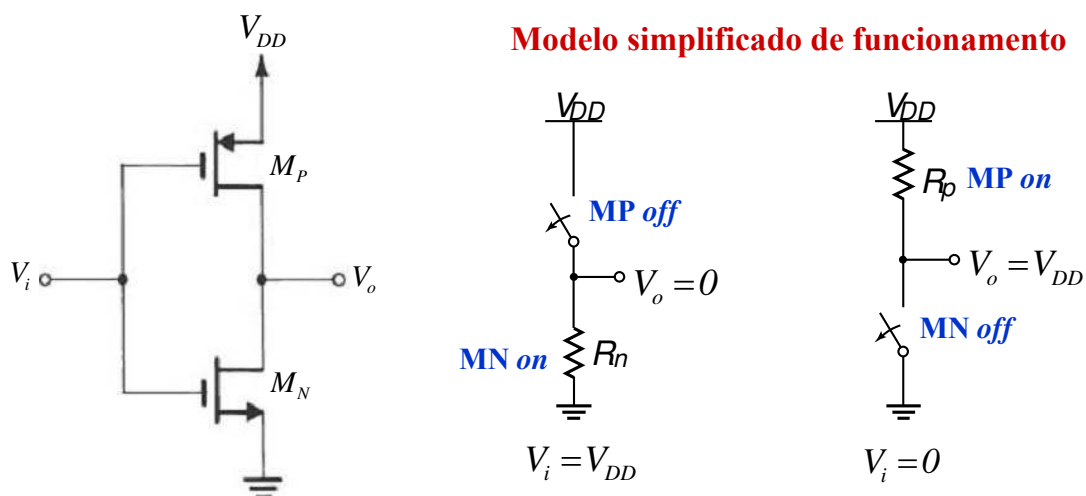
## Aplicação 3: Circuitos digitais

### ● Inversor (NOT) com transístor PMOS



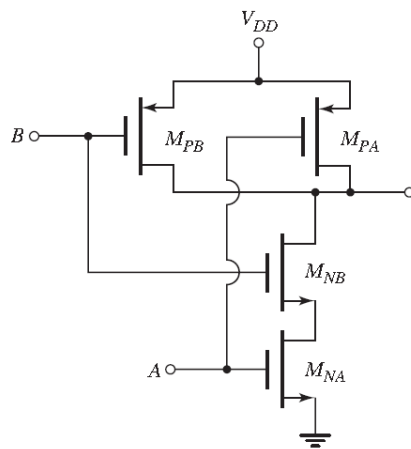
## Aplicação 3: Circuitos digitais

- Inversor (NOT) CMOS ou *Complementary MOS*: usa um transístor NMOS e um PMOS;
- Tecnologia dominante em CIs digitais desde meados dos anos 80.



## Aplicação 3: Circuitos digitais

### Porta lógica **NAND** em CMOS



*Tabela de verdade*

A	B	M <sub>NA</sub>	M <sub>NB</sub>	M <sub>PA</sub>	M <sub>PB</sub>	F
0	0	off	off	on	on	1
0	1	off	on	on	off	1
1	0	on	off	off	on	1
1	1	on	on	off	off	0

$$F = \overline{A \cdot B}$$

## Aplicação 3: Circuitos digitais

### Célula de memória dinâmica (DRAM);

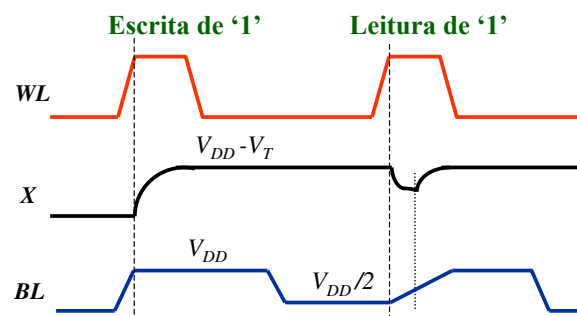
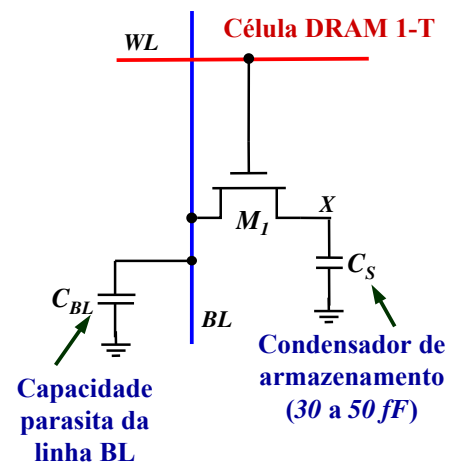
### Um transístor + um condensador por cada bit;

### O valor lógico de cada bit expresso pela tensão em $C_S$ :

- $V_{DD} - V_T$  para '1'
- $0V$  para '0'

### Na leitura, o sentido da variação da tensão em BL indica o valor lido:

- $\Delta V_{BL} > 0 \Rightarrow '1'$
- $\Delta V_{BL} < 0 \Rightarrow '0'$



## Capacidades intrínsecas do MOSFET

## Capacidades do MOSFET

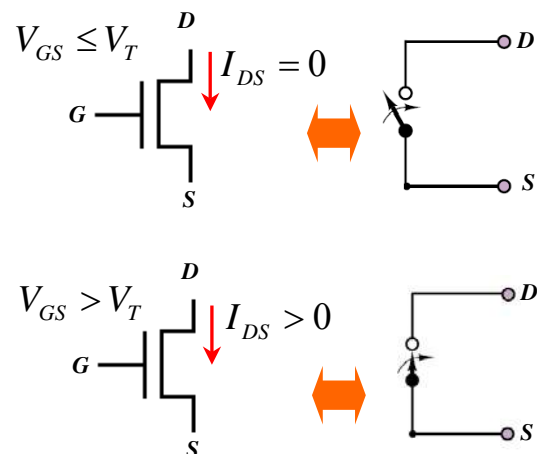
● Nos circuitos digitais o MOSFET funciona como um interruptor controlado por tensão;

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

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

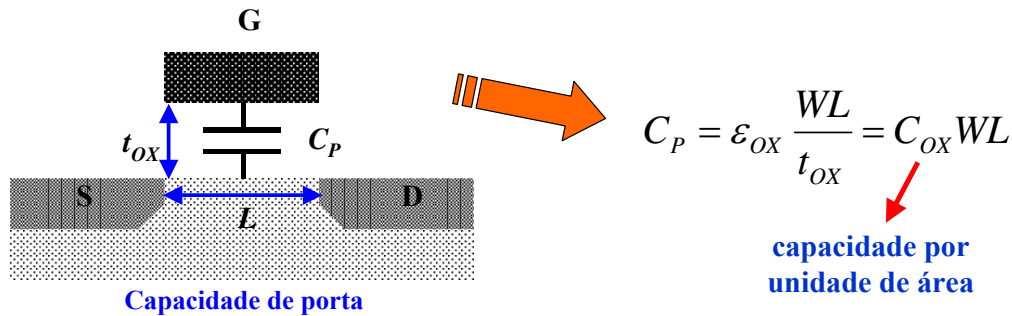
● MOSFET apresenta **2 tipos principais** de capacidades intrínsecas:

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



## Capacidade do canal

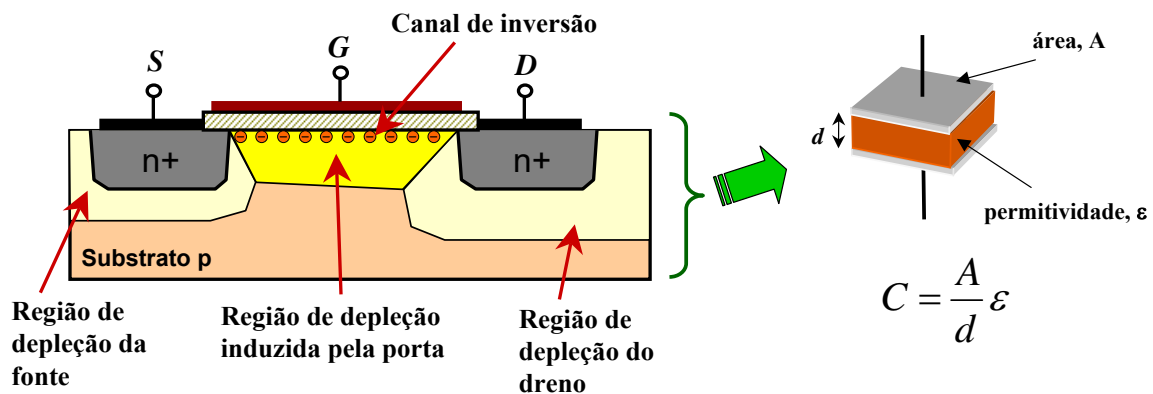
- Estrutura física do MOSFET forma um condensador que é essencial ao funcionamento do dispositivo;



- 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'.