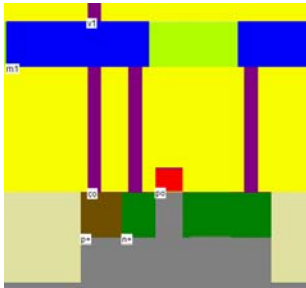


Sinais e Sistemas Electrónicos



Capítulo 7: O Transístor MOS



Ernesto Martins
evm@ua.pt
DETI (gab. 4.2.38)
Universidade de Aveiro



Sinais e Sistemas Electrónicos– 2024/2025

Sumário

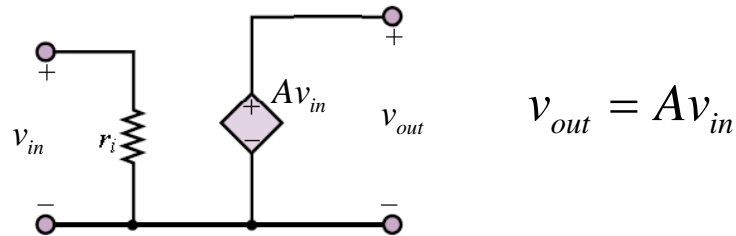
- **Introdução;**
- **MOSFET: uma abordagem funcional;**
- **MOSFET como amplificador;**
- **MOSFET como interruptor.**

Introdução

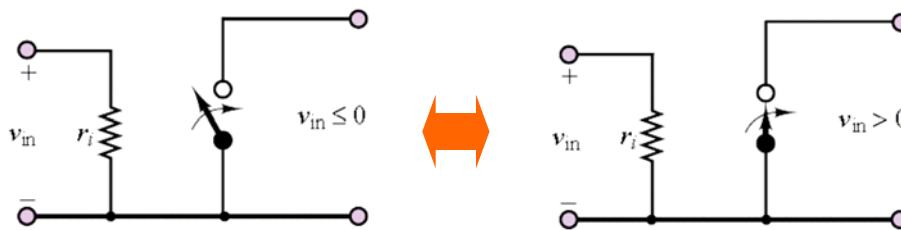
O que é um transístor?

- Dispositivo semiconductor que pode funcionar como:

Amplificador



Interruptor electrónico



Introdução



- Transístores são dispositivos de **3 terminais**.
- Duas grandes famílias:
 - transístores **bipolares**, ou **BJT**;
 - transístores de **efeito de campo**, ou **FET**.
- De entre os transístores do tipo FET, o **MOSFET** (*Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor*, também chamado de IGFET), é o dispositivo mais importante. É o dispositivo base de mais de 99% dos circuitos integrados digitais.

Transístor de efeito de campo (MOSFET – Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)

E. Martins, DET Universidade de Aveiro

7-5

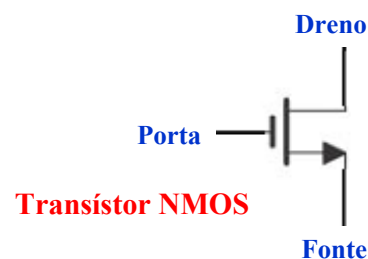
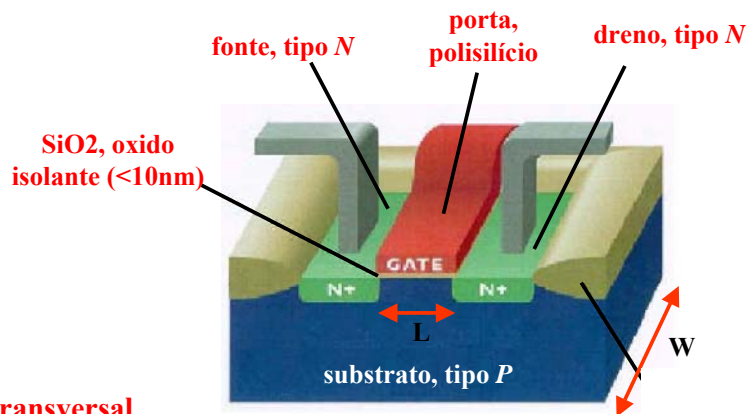
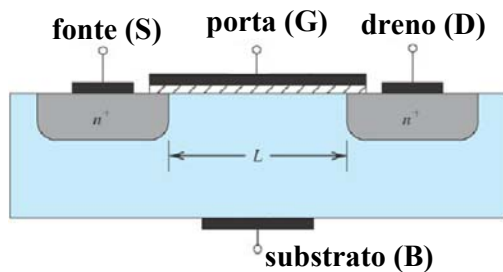
Sinais e Sistemas Electrónicos– 2024/2025

Estrutura do MOSFET de canal N

- 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).

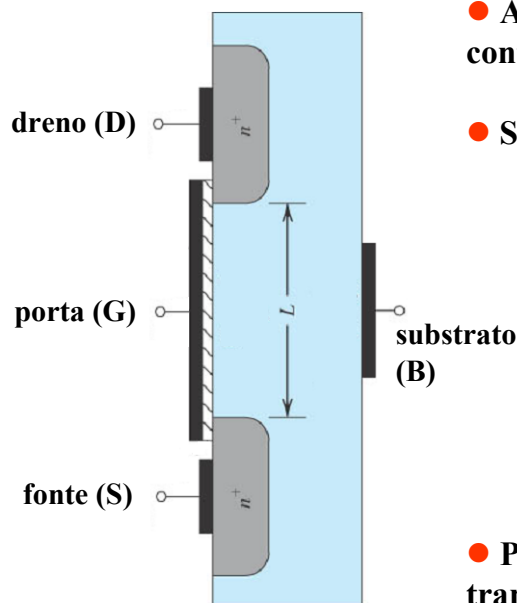
Representação em corte transversal



E. Martins, DET Universidade de Aveiro

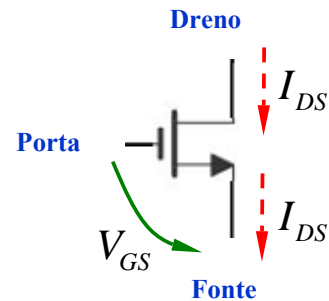
7-6

Funcionamento



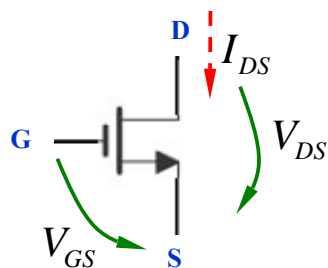
● A **tensão** aplicada entre **Porta e Fonte** controla a **corrente** entre **Dreno e Fonte**;

● Se $V_{GS} > V_T \Rightarrow I_{DS} > 0$.



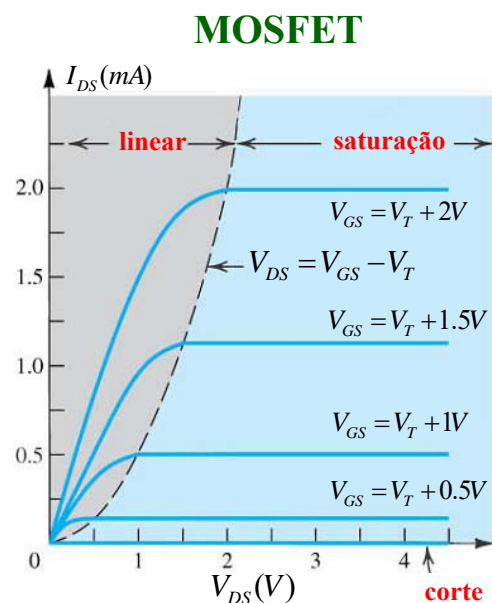
● Porta está **isolada** do resto do corpo do transistor – **não há corrente de porta!**

Característica I/V: regiões de funcionamento

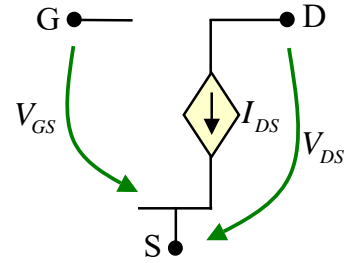
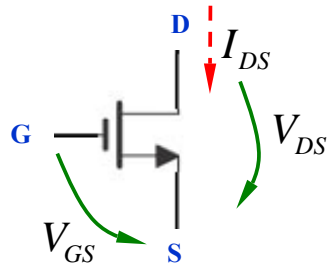


● Para funcionar como interruptor, o MOSFET é polarizado na **Região Linear**.

● Para funcionar como amplificador, o MOSFET é polarizado na **Região de Saturação**.



Modelo quadrático ou de *Shockley*



Modelo de grande sinal do MOSFET

$$I_{DS} = \begin{cases} 0 ; V_{GS} < V_T & \text{Corte} \\ k \left(2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2 \right) ; V_{GS} \geq V_T \text{ e } V_{GD} > V_T & \text{Linear} \\ k(V_{GS} - V_T)^2 ; V_{GS} \geq V_T \text{ e } V_{GD} \leq V_T & \text{Saturação} \end{cases}$$

k é a transconductância do MOSFET, com dimensões de A/V².

Exemplos de cálculo: MOSFETs em DC

Exemplo - polarização

Sabendo que $V_T = 2V$ e $k = 1mA/V^2$, calcular I_{DS} e V_D .

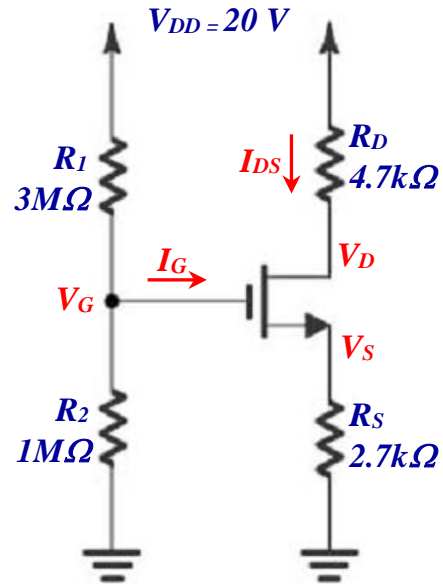
Como $I_G = 0A$, a tensão V_G pode calcular-se usando a expressão do divisor de tensão:

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

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...

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

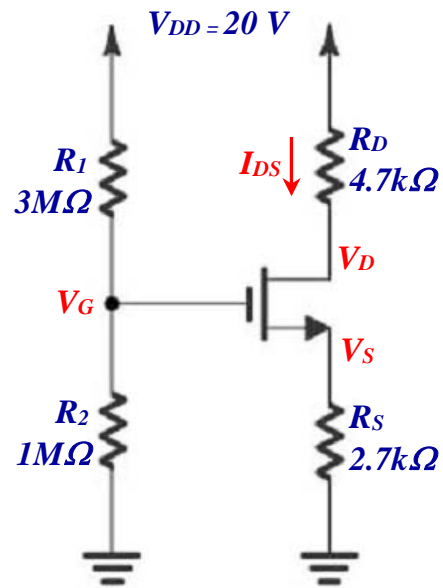
Substituindo valores, obtemos:

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

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

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

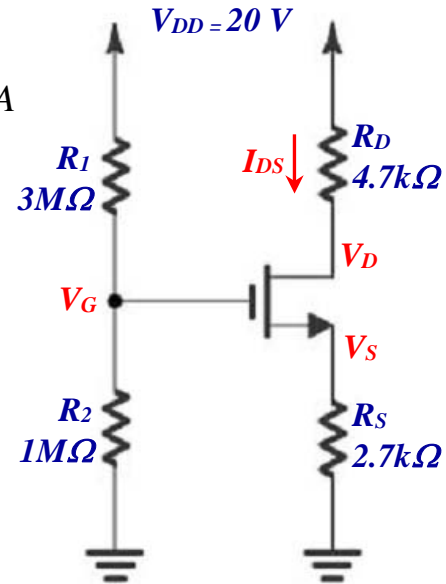
V_D é dado por

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

Com esta tensão temos

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

O que confirma que o transístor está efectivamente saturado.

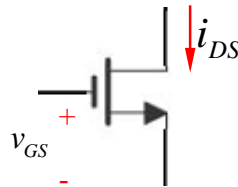


NOTA: Se não se confirmasse o estado saturado do transístor, teríamos que refazer os cálculos considerando-o na região linear.

MOSFET como amplificador

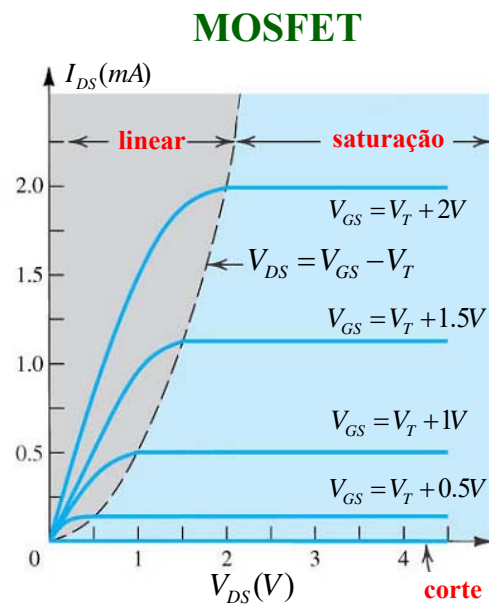
MOSFET como amplificador

- Na região de saturação i_{DS} só depende de v_{GS}

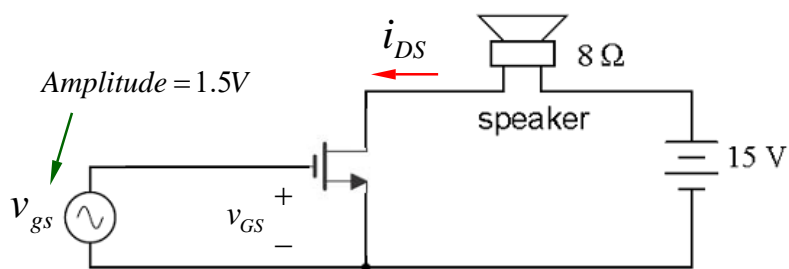


$$i_{DS} = k(v_{GS} - V_T)^2$$

- O MOSFET funciona como uma fonte de corrente controlada por tensão...
- ... ou um amplificador de transconductância;
- Esta é pois a região adequada para operar o MOSFET como amplificador.

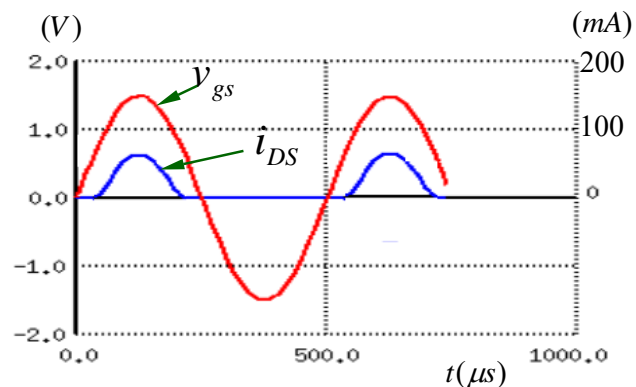


Exemplo de aplicação: amplificador audio

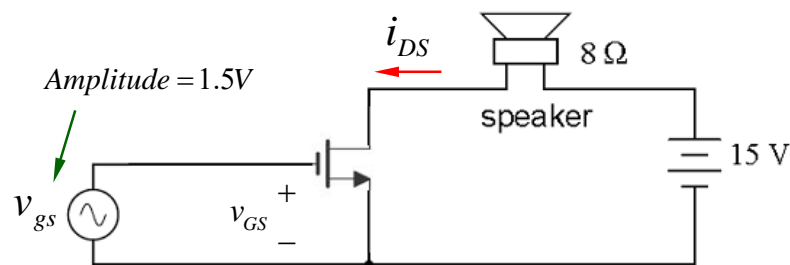


- ... mas a forma de onda da corrente i_{DS} não aparece igual à da fonte v_{gs} !

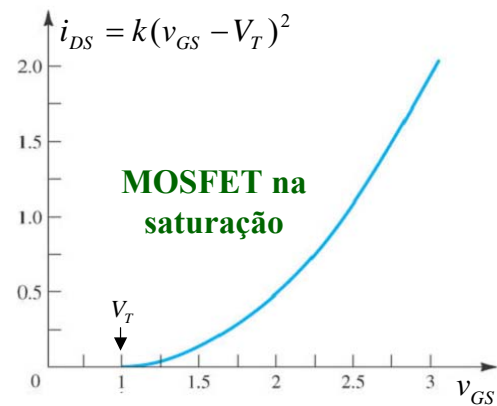
- Porquê?



Exemplo de aplicação: amplificador audio



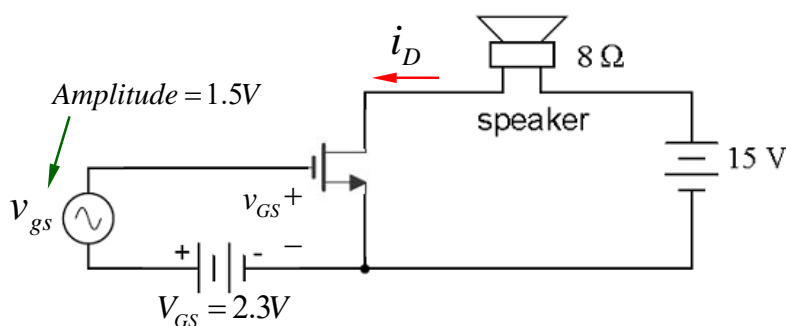
- Para valores de v_{GS} inferiores à tensão de limiar, V_T , o transistor **corta**;
- A solução é **polarizar** o transistor de forma a garantir que $v_{GS} > V_T$ para todos os valores do sinal de entrada.



E. Martins, DET Universidade de Aveiro

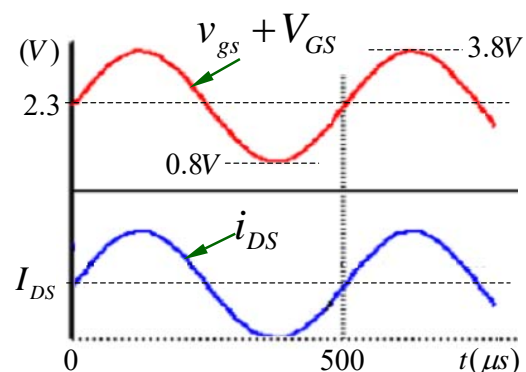
7-17

Exemplo de aplicação: amplificador audio



Assumimos $V_T = 0.8V$
 por isso de
 $-1.5 + V_{GS} = 0.8$
 obtemos $V_{GS} = 2.3V$

- A polarização garante que o MOSFET conduz para todos os valores de v_{gs} .
- Forma de onda de i_{DS} é uma reprodução fiel de v_{gs} .



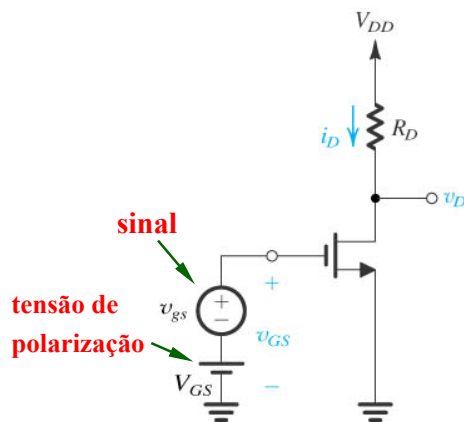
E. Martins, DET Universidade de Aveiro

7-18

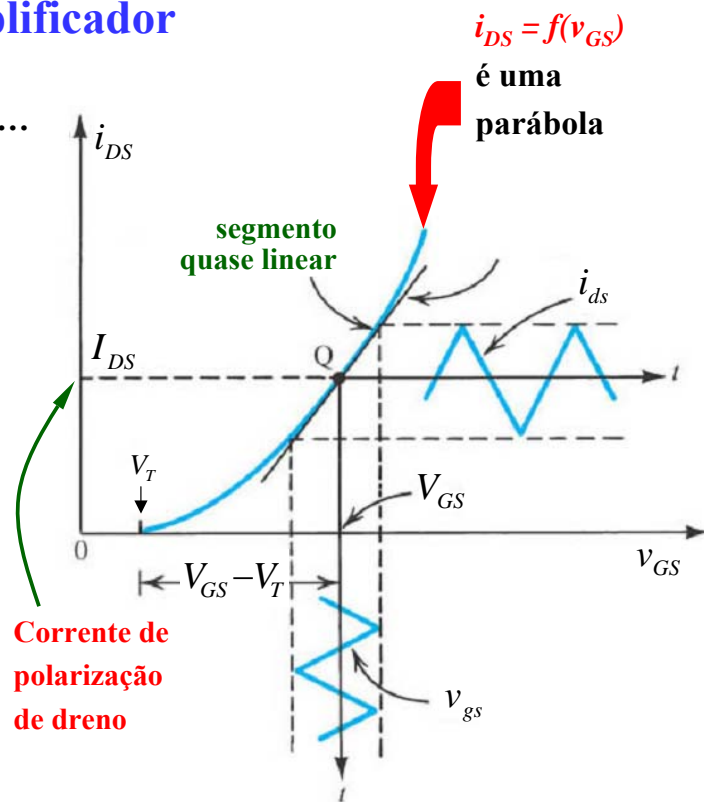
MOSFET como amplificador

- Desenhado de outra forma...

- Se o sinal v_{gs} for pequeno, podemos aproximar a curva $i_{DS} = f(v_{GS})$ por uma recta.



E. Martins, DET Universidade de Aveiro



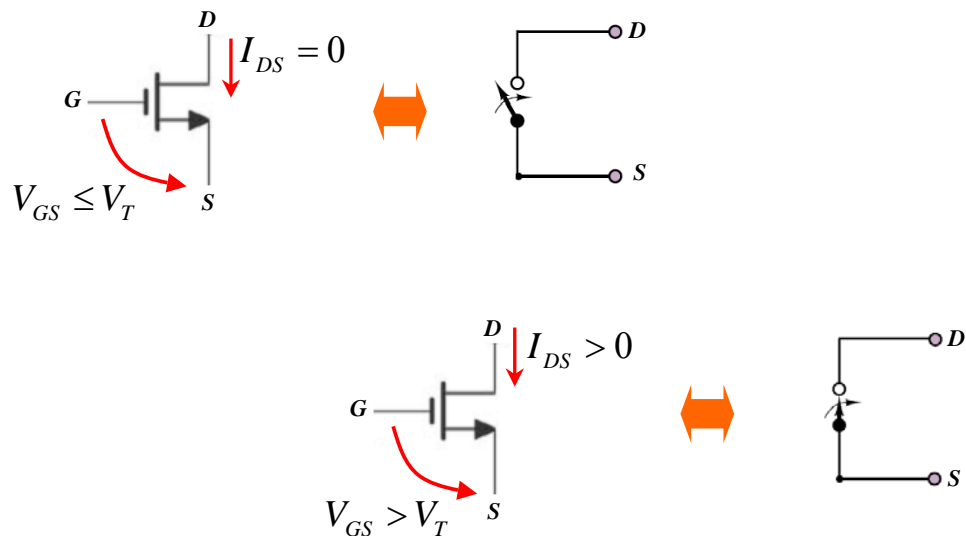
Corrente de polarização de dreno

7-19

MOSFET como interruptor

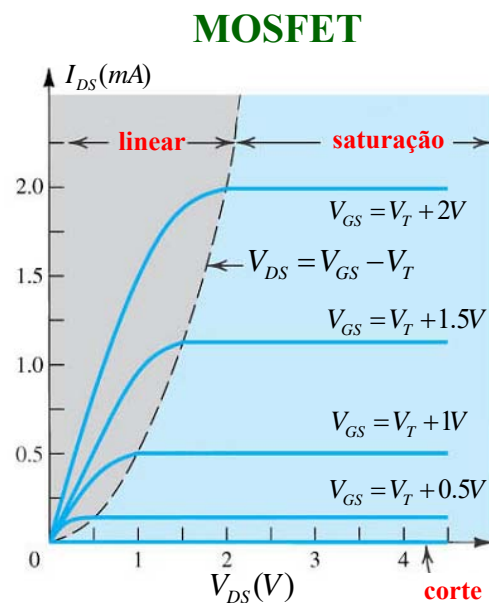
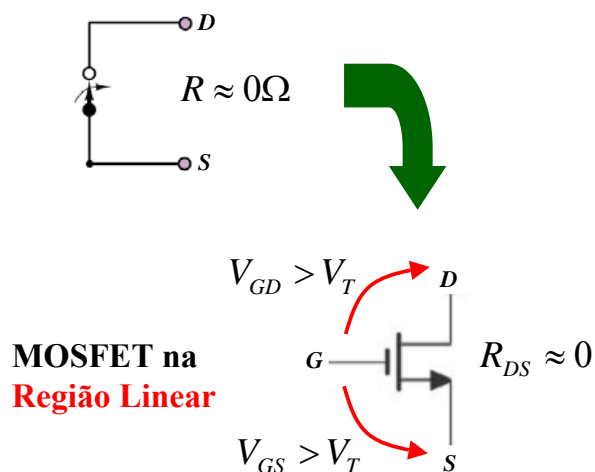
MOSFET como interruptor

- 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 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 $I_{DS} = 0$;

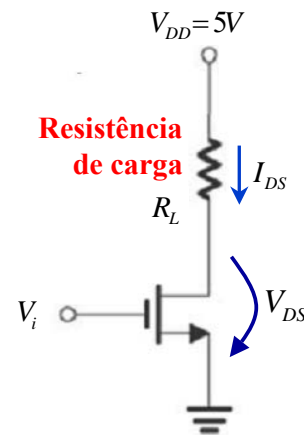
- Se $V_i = V_{DD}$ o MOSFET conduz. Será que fica na **região linear**?... Vejamos:

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

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

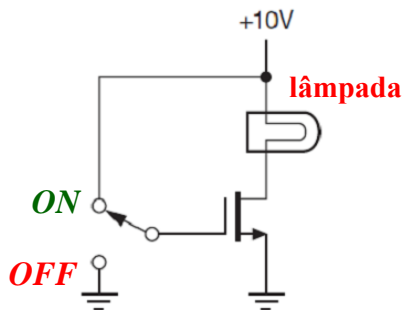
Substituindo aqui a equação de I_{DS} e resolvendo, obtemos: $V_{DS} = 0.6V$

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

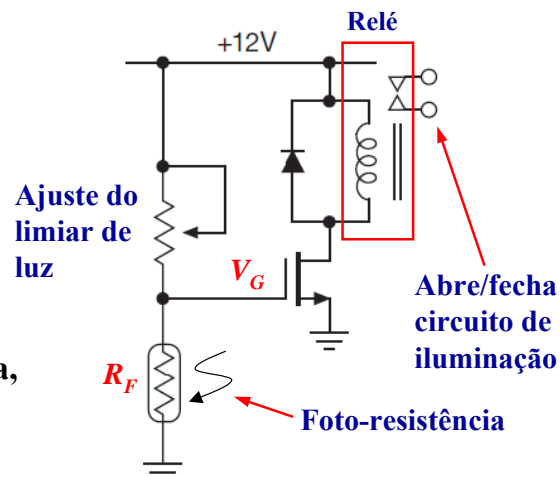


Aplicação 1: Interruptor de potência

- Transistor 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;



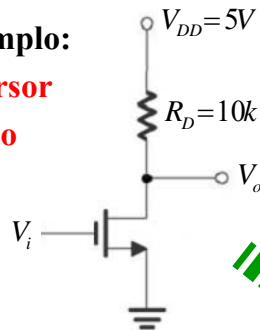
- Quando anoitece, R_F aumenta, aumentando V_G . O transistor conduz, actuando no relé que liga o circuito de iluminação.

Aplicação 2: Circuitos digitais

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

Exemplo:

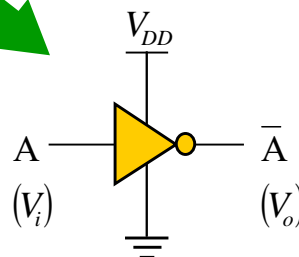
**inversor
lógico**



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

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

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



A	\bar{A}
0	1
1	0

Aplicação 2: Circuitos digitais

- Porta lógica **NOR**

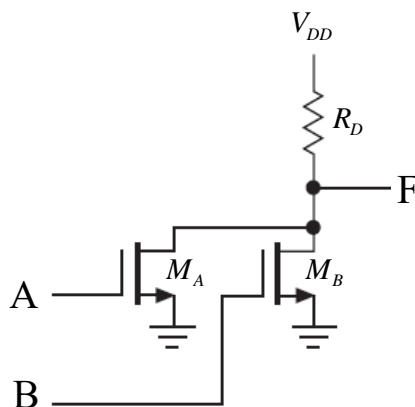


Tabela de verdade

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 2: 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:
 - $\Delta V_{BL} > 0 \Rightarrow \text{'1'}$
 - $\Delta V_{BL} < 0 \Rightarrow \text{'0'}$

