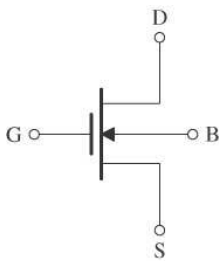


# Sinais e Sistemas Electrónicos



## Capítulo 8: O transístor MOS (parte 1)



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



Sinais e Sistemas Electrónicos – 2022/2023

### Sumário

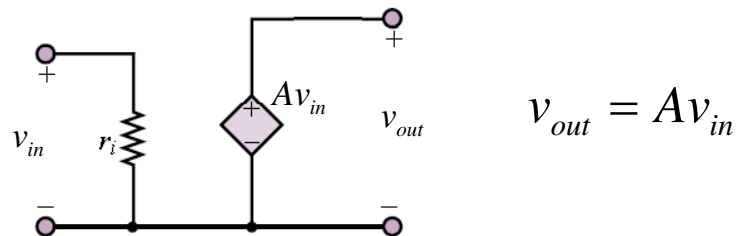
- **Introdução;**
- **Estrutura física e funcionamento do MOSFET;**
- **Modelo quadrático do NMOS e MOSFET de canal  $p$ ;**
- **MOSFET em DC;**
- **MOSFET como amplificador.**

## Introdução

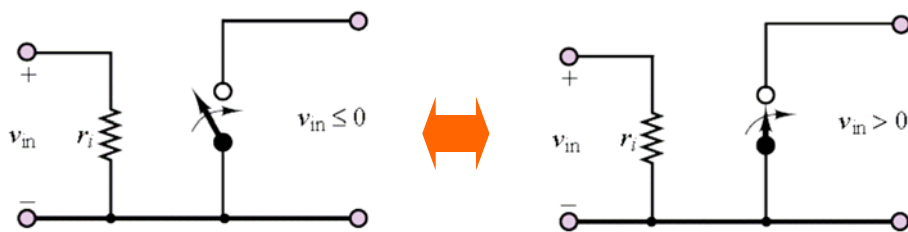
### O que é um transistor?

- 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.

# Estrutura física e funcionamento do MOSFET

E. Martins, DET Universidade de Aveiro

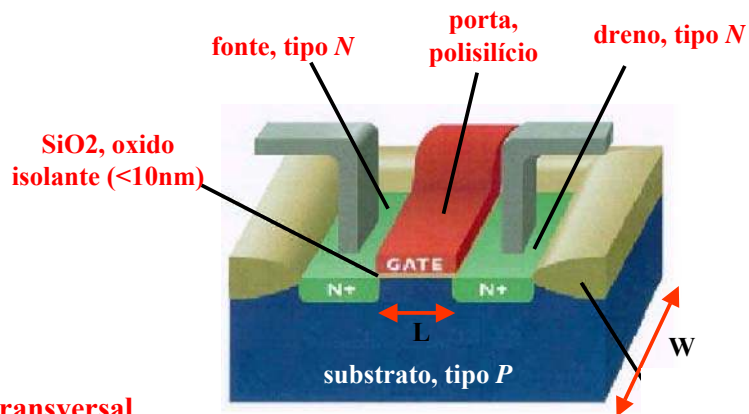
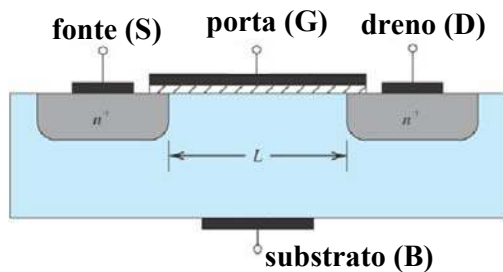
8.1-5

Sinais e Sistemas Electrónicos – 2022/2023

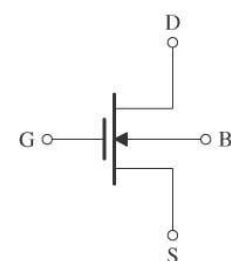
## Estrutura do MOSFET de canal N

- 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



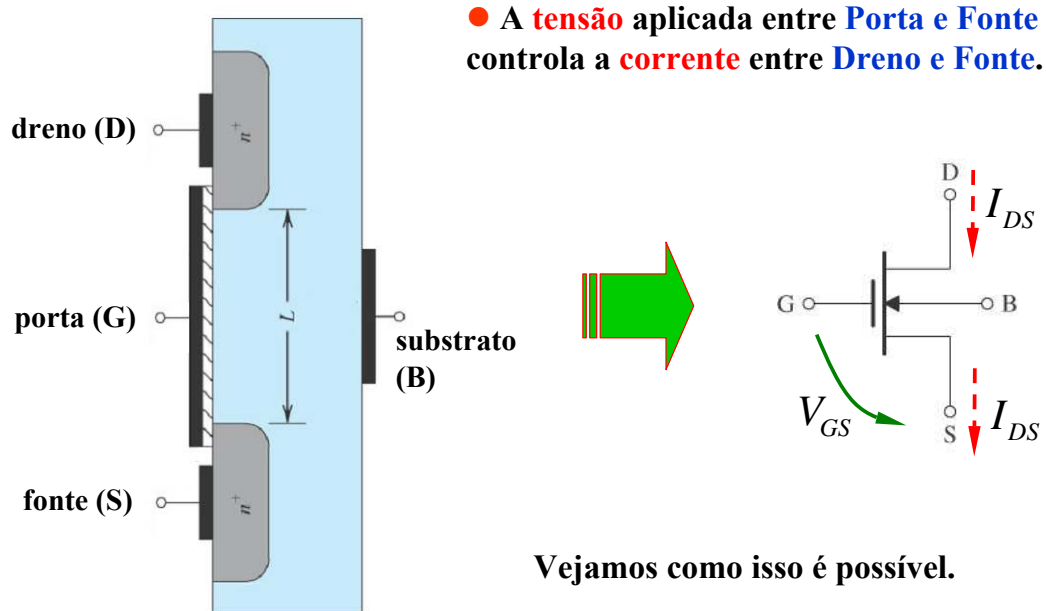
simbolo:  
Transistor  
NMOS



E. Martins, DET Universidade de Aveiro

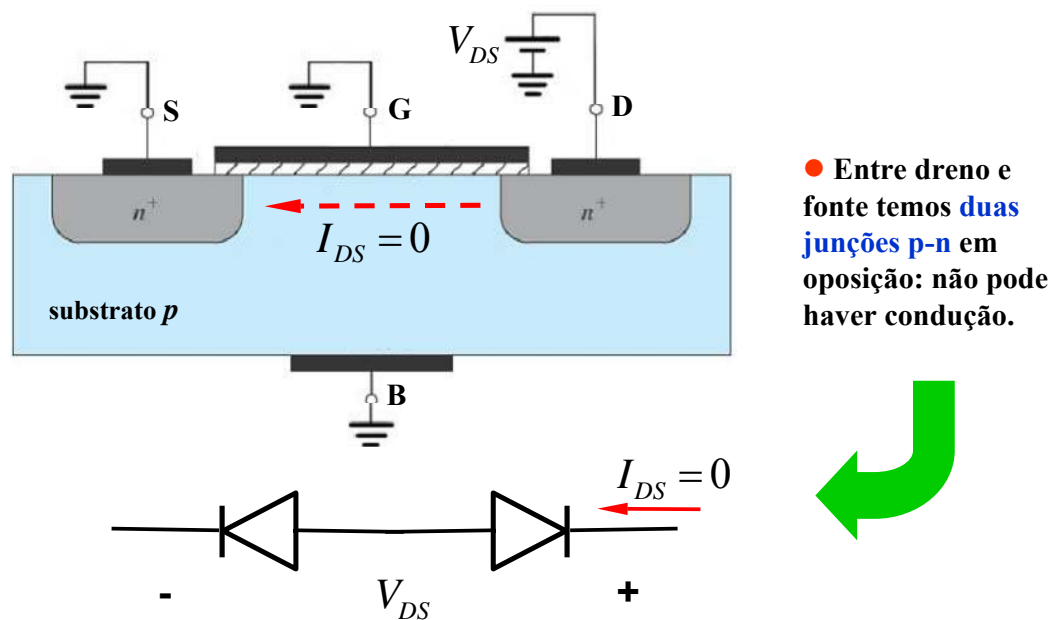
8.1-6

## Funcionamento



## Funcionamento

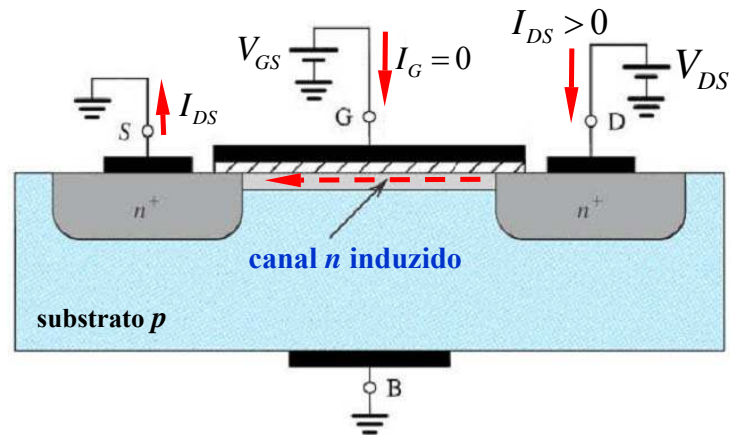
- Se  $V_{GS} = 0$  então  $I_{DS} = 0$ .



## Funcionamento

- Se  $V_{GS} \geq V_T$  então  $I_{DS} > 0$ .

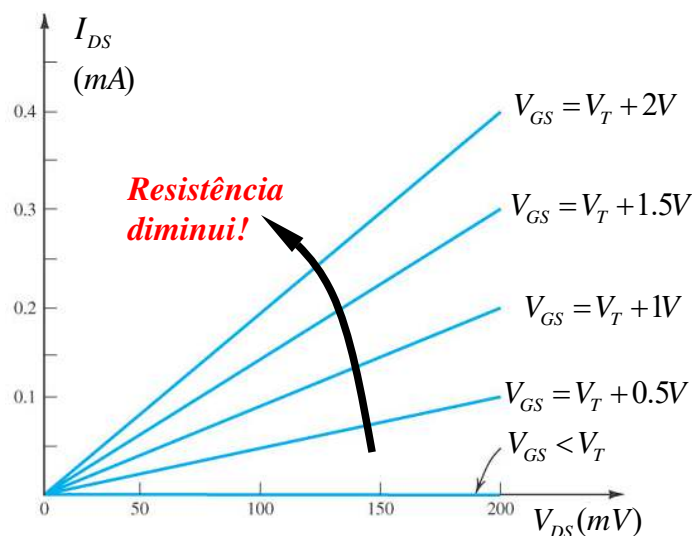
- Tensão positiva na porta repele lacunas para baixo, criando zona de carga negativa correspondente aos iões receptores que ficam a ‘descoberto’;



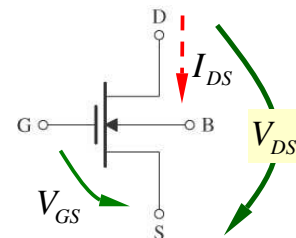
- Quando  $V_{GS}$  ultrapassa a *tensão de limiar*,  $V_T$ , o campo eléctrico vertical torna-se suficiente para atrair electrões livres das regiões da fonte e do dreno para a região debaixo da porta, criando o **canal de inversão** que é condutor.

## Funcionamento

- Se  $V_{GS} \geq V_T$  e  $V_{DS}$  pequeno



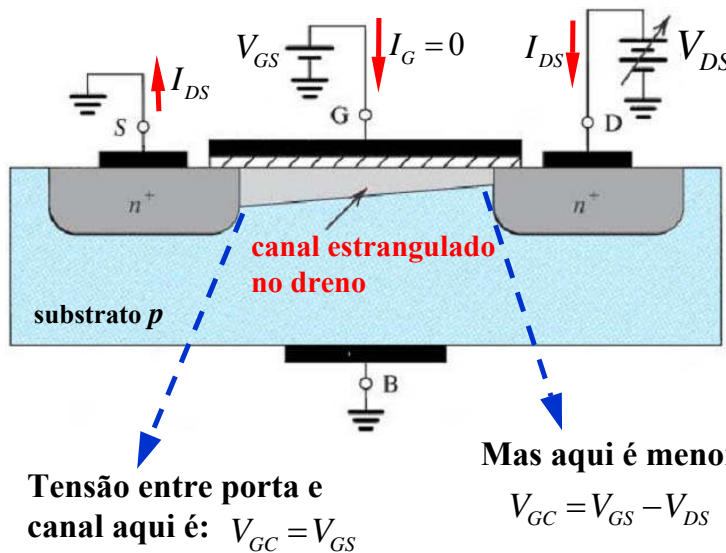
- Declive de  $I_{DS} = f(V_{DS})$  aumenta com  $V_{GS}$ : MOSFET funciona como uma **resistência controlada por tensão**;



- Nestas condições diz-se que o MOSFET está a funcionar na **região linear**.

## Funcionamento

O que acontece para  $V_{GS} \geq V_T$  e valores mais elevados de  $V_{DS}$ ?

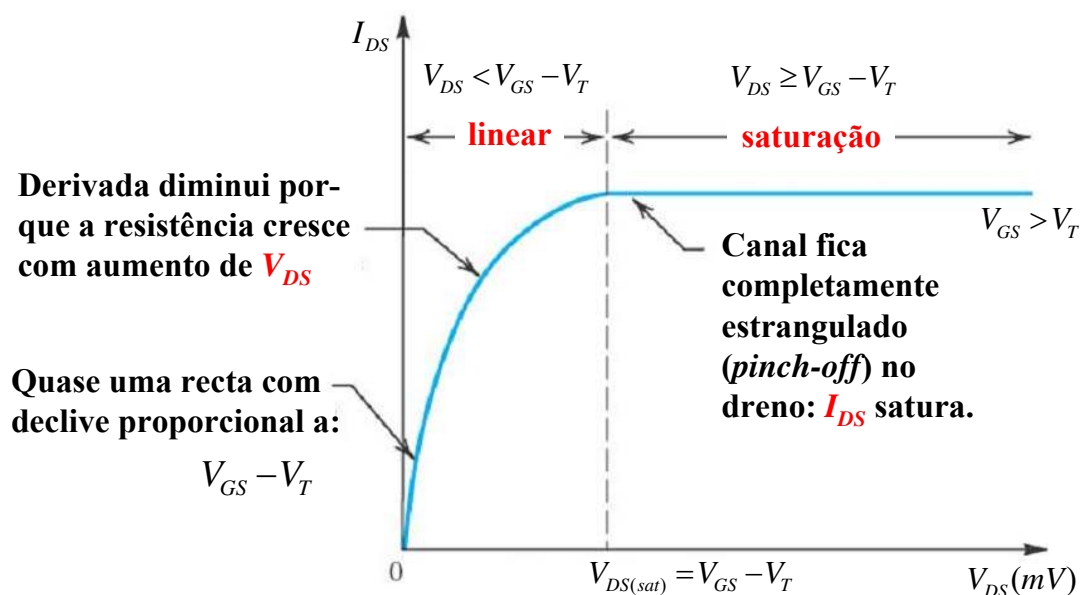


- O canal **tende a afunilar** junto ao dreno à medida que aumentamos  $V_{DS}$ ;

- O afunilamento vai corresponder a um **aumento da resistência do canal**.

## Funcionamento

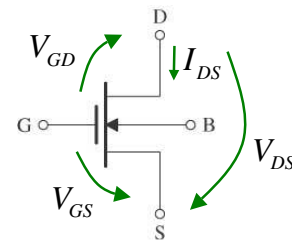
Qual é o efeito deste fenómeno na característica corrente-tensão do MOSFET?



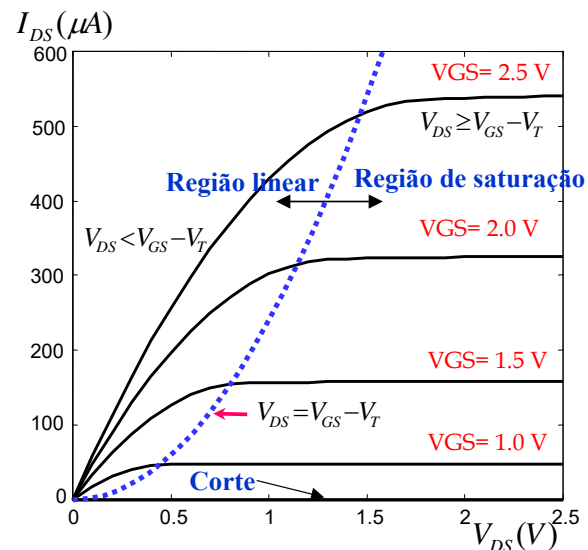
## Modelo quadrático e MOSFET de canal $p$

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

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

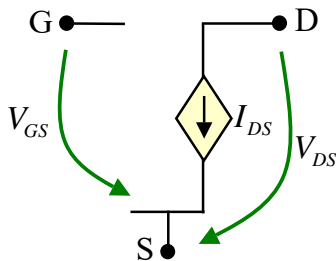


- **Corte:** Não existe canal de inversão;
- **Linear ou triodo** - Canal de inversão uniforme; condutância entre dreno e fonte é controlada por  $V_{GS}$ ;
- **Saturação:** Canal estrangulado no dreno; transistor funciona como fonte de corrente controlada por  $V_{GS}$ .



## Modelo quadrático ou de Shockley

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



$k$  é a transcondutância do MOSFET, com dimensões de A/V<sup>2</sup>.

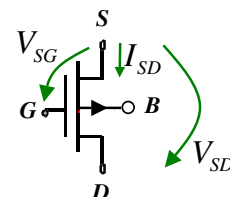
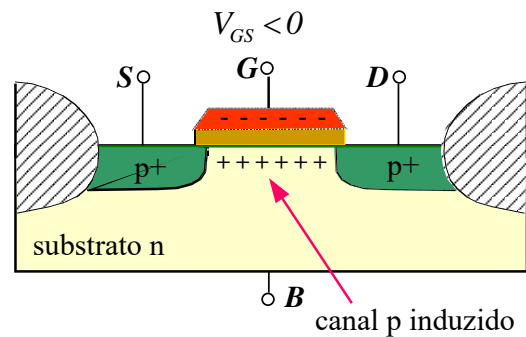
$$k = \frac{1}{2} k' \frac{W}{L}$$

$k$  depende das dimensões do transistor.  
 $k'$  é a *transcondutância do processo*;  
 $W/L$  é a *razão geométrica*

### Modelo de grande sinal do MOSFET

## MOSFET de canal P (PMOS)

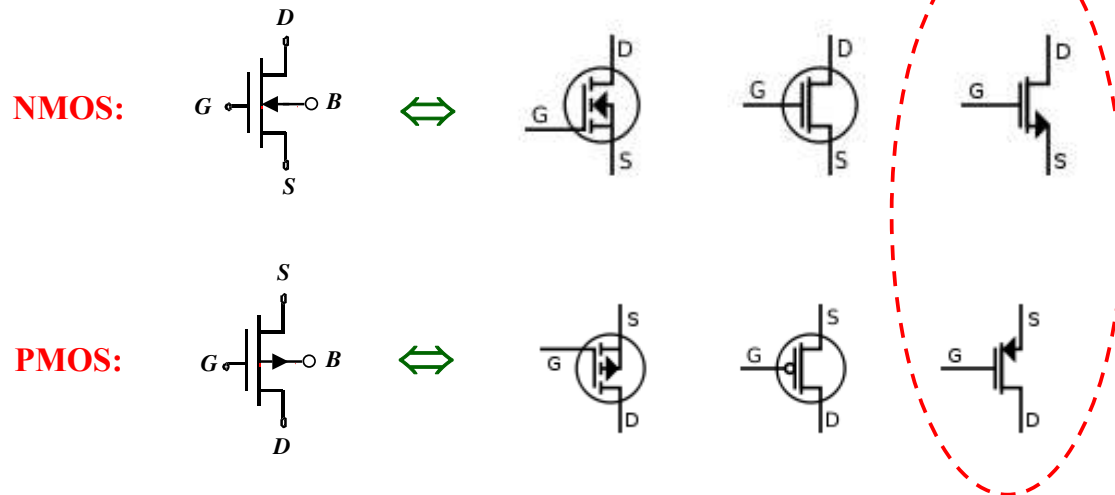
- Substrato  $n$ ; fonte e dreno  $p$ ;
- Para induzir um canal é necessário  $V_{GS} < 0$ , logo  $V_T < 0$ ;
- Portadores de corrente são lacunas;
- As expressões do Modelo Quadrático são aplicáveis desde que se considerem todas as tensões e correntes negativas;
- ... mas como é mais cómodo trabalhar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





## Símbolos equivalentes NMOS e PMOS

Daqui para a frente usaremos estes!



- 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.

## Exemplos de cálculo: MOSFETs em DC

## Exemplo 1

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

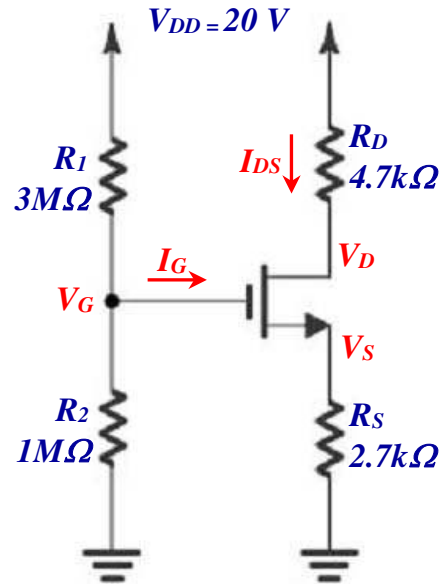
Como  $I_G = 0A$ , a tensão  $V_G$  pode calcular-se usando a expressão do divisor de tensão:

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

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...

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

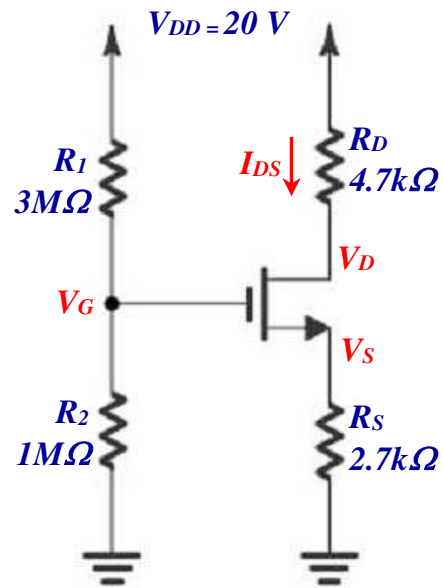
Substituindo valores, obtemos:

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

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

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

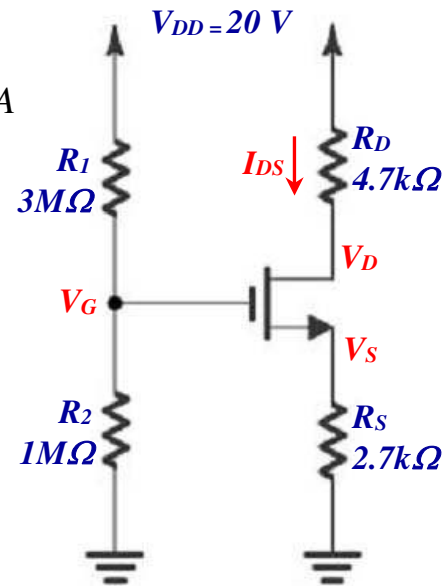
$V_D$  é dado por

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

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.

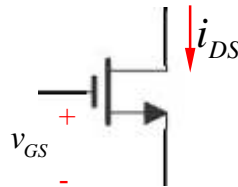


**NOTA:** Se não se confirmasse o estado saturado do transístor, teríamos que refazer os cálculos considerando-o na região linear.

## Modelo de pequeno sinal do MOSFET (transístor como amplificador)

## MOSFET como amplificador

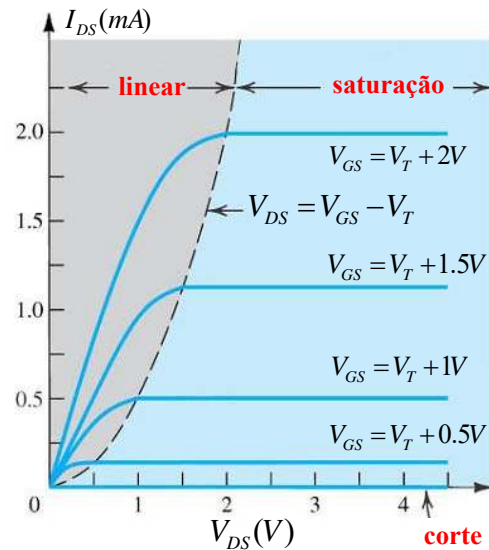
- Na região de saturação  $i_{DS}$  só depende de  $v_{GS}$



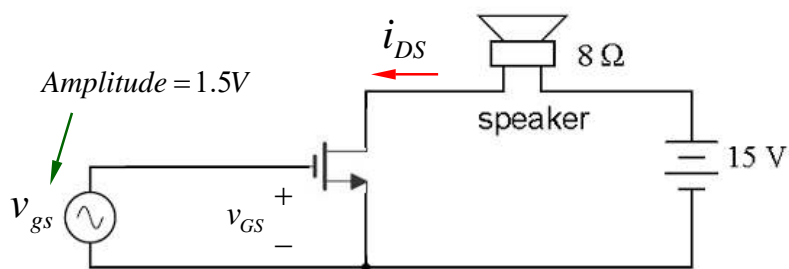
$$i_{DS} = k(v_{GS} - V_T)^2$$

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

### MOSFET

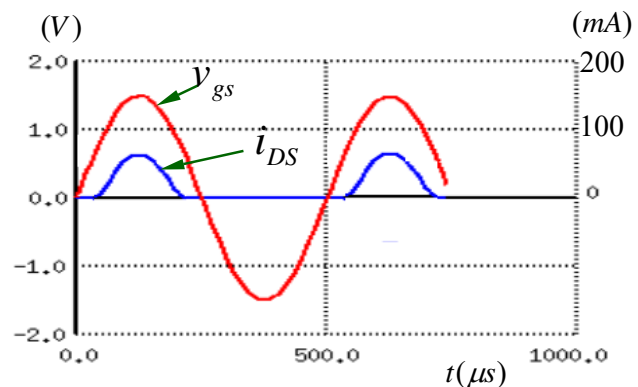


## Exemplo de aplicação: amplificador audio

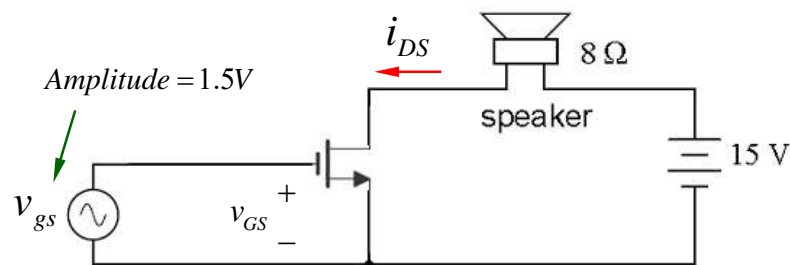


- ... mas a forma de onda da corrente  $i_{DS}$  não aparece igual à da fonte  $v_{gs}$  !

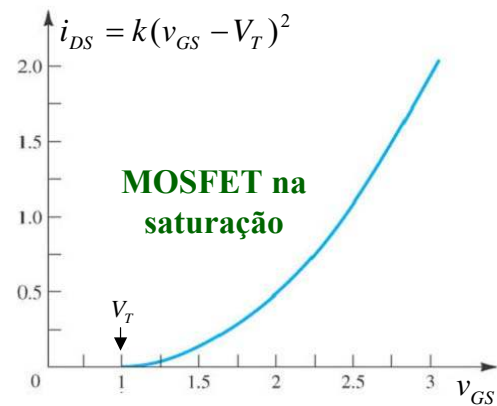
- Porquê?



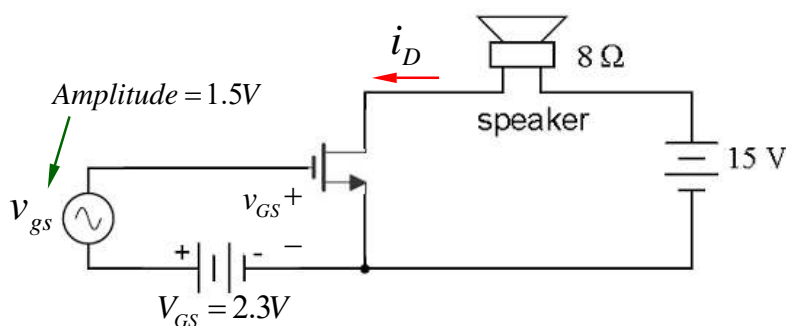
## Exemplo de aplicação: amplificador audio



- Para valores de  $v_{GS}$  inferiores a  $V_T$  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.

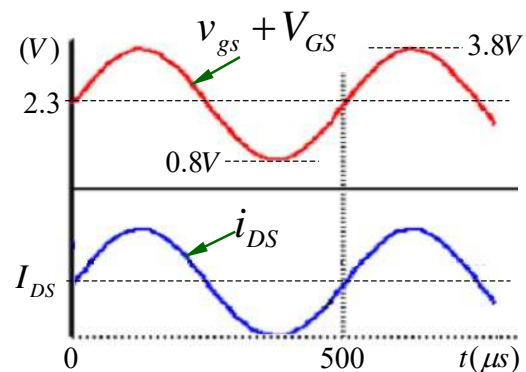


## Exemplo de aplicação: amplificador audio



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

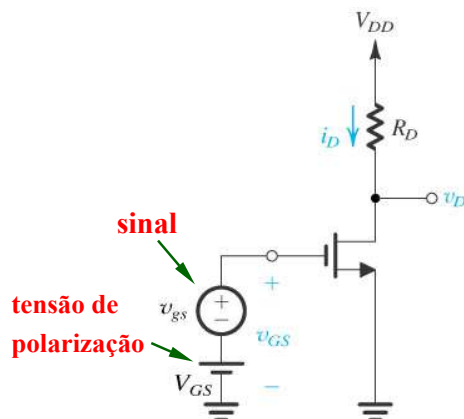
- A polarização garante que o MOSFET conduz para todos os valores de  $v_{gs}$ .
- Forma de onda de  $i_{DS}$  é uma reprodução fiel de  $v_{gs}$ .



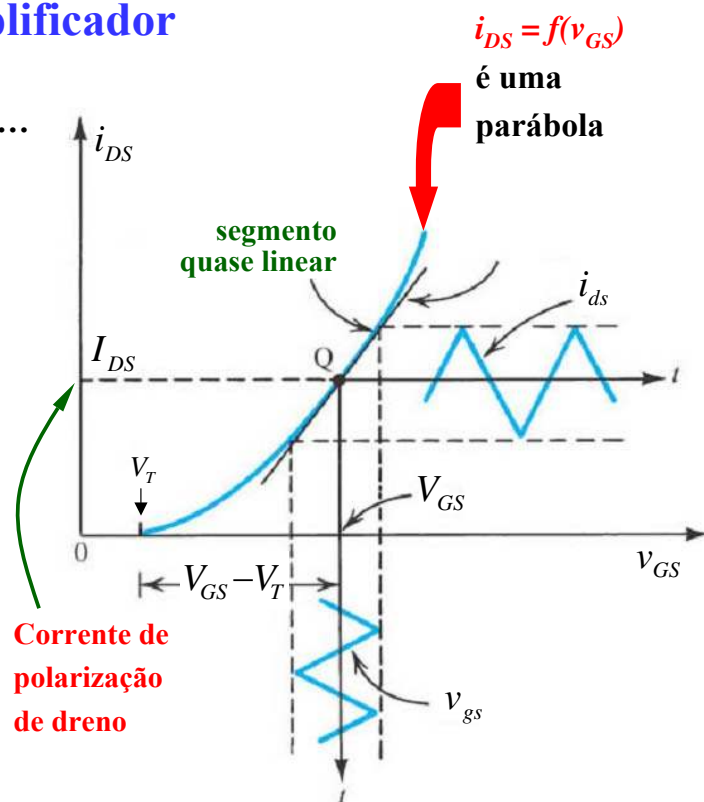
## MOSFET como amplificador

- Desenhado de outra forma...

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

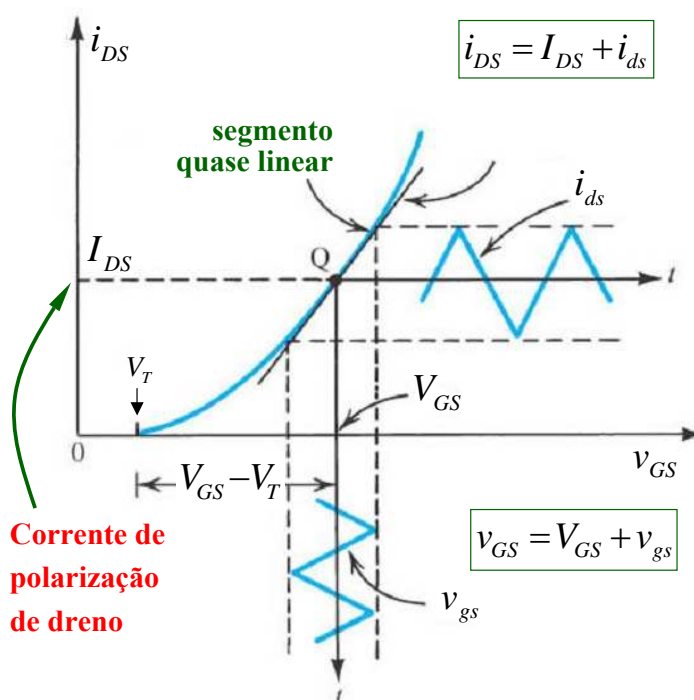


E. Martins, DET Universidade de Aveiro



8.1-27

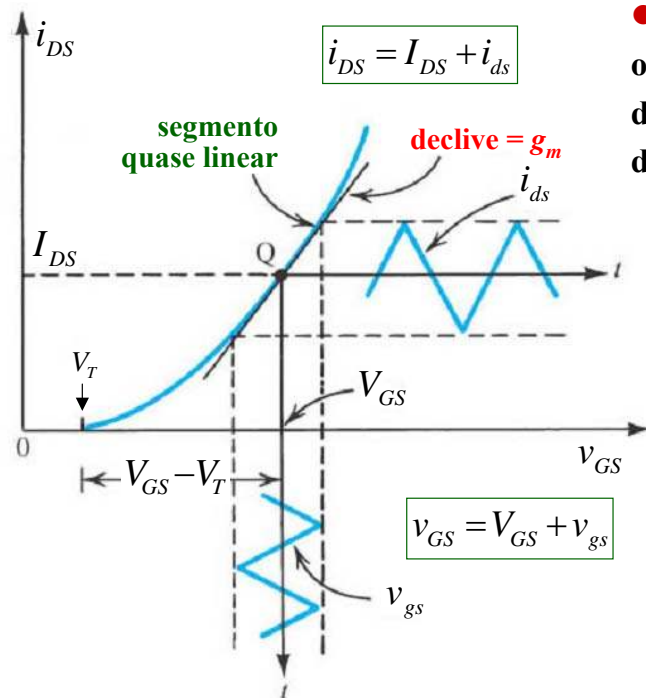
## (Um parêntesis sobre notação...)



### Notar que:

- $I_{DS}$  é a corrente **DC** no dreno;
- $i_{ds}$  é a corrente de **sinal** no dreno, ou seja corresponde apenas à variação em torno do valor DC;
- $i_{DS}$  é a corrente **total** no dreno;
- As mesmas considerações são válidas para  $V_{GS}$ ,  $v_{gs}$  e  $v_{GS}$ .

## Aproximação de pequeno sinal



● Relação não-linear entre  $i_{DS}$  e  $v_{GS}$  obriga a que o sinal  $v_{gs}$  **seja pequeno**, de forma a que  $i_{ds}$  seja uma reprodução fiel de  $v_{gs}$ .

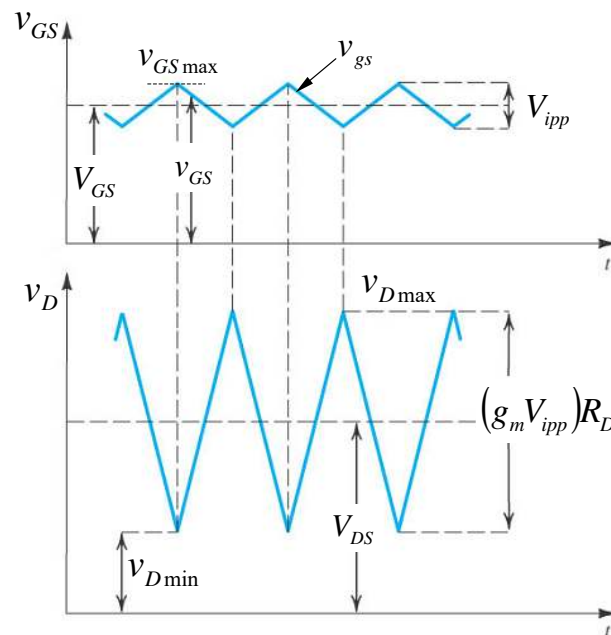
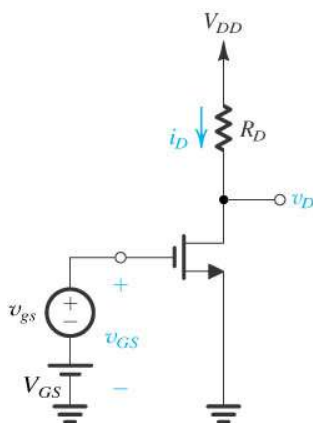
● Para que a curva  $i_{DS} / v_{GS}$  possa ser considerada uma recta de declive  $g_m$  no ponto Q é preciso que  $v_{gs} \ll 2(V_{GS} - V_T)$

● E assim:

$$i_{ds} = g_m v_{gs}$$

Sendo  $g_m$  a **transcondutância** do transístor em A/V.

## Extremos da tensão de saída



● Para que o MOSFET **não saia da região de saturação** é necessário que:  $v_{GSmax} - v_{Dmin} < V_T$  ou seja  $v_{Dmin} > v_{GSmax} - V_T$

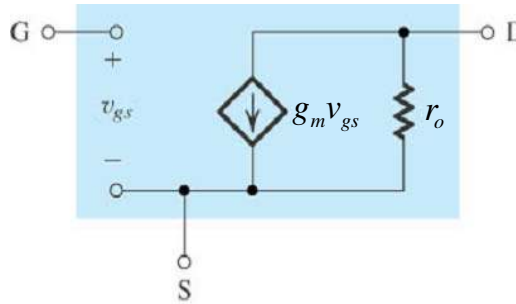
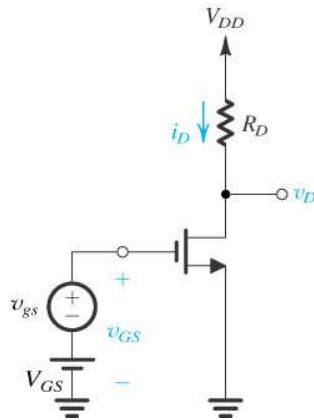
● Para que o MOSFET **não corte** é preciso que:  $v_{Dmax} < V_{DD}$

## 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.*