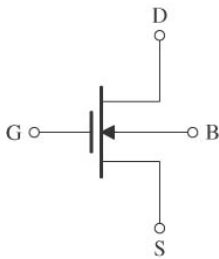


Sinais e Sistemas Electrónicos



Capítulo 8: O transístor MOS (parte 1)



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



Sinais e Sistemas Electrónicos – 2022/2023

Sumário

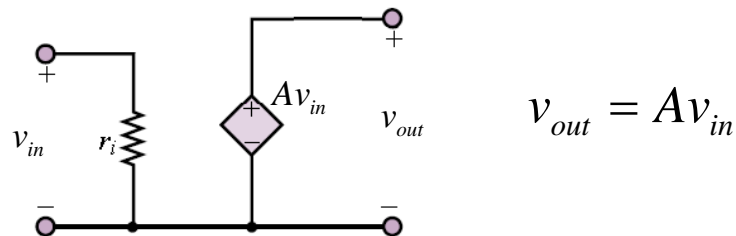
- **Introdução;**
- **Estrutura física e funcionamento do MOSFET;**
- **Modelo quadrático do NMOS e MOSFET de canal p ;**
- **MOSFET em DC;**
- **MOSFET como amplificador.**

Introdução

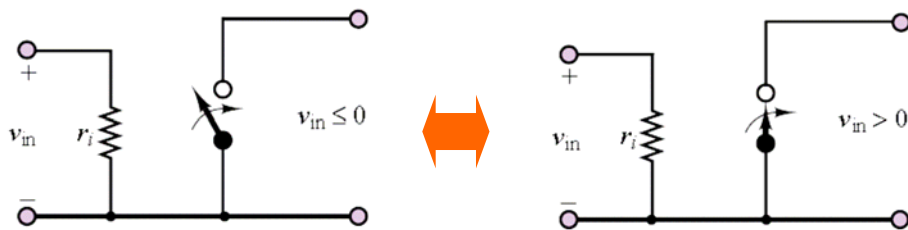
O que é um transístor?

- 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.

Estrutura física e funcionamento do MOSFET

E. Martins, DET Universidade de Aveiro

8.1-5

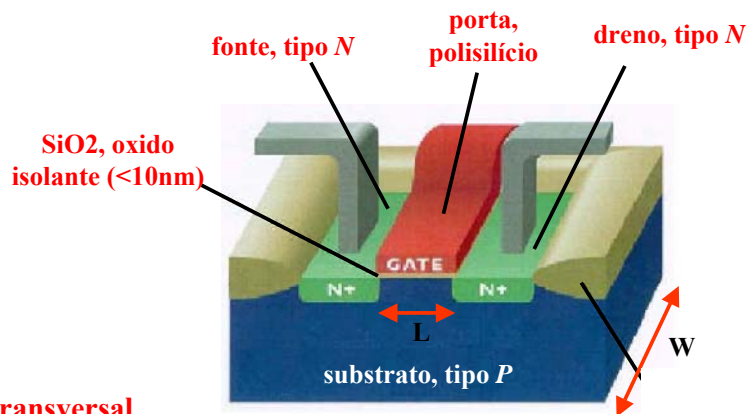
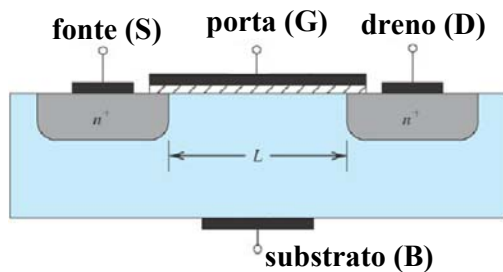
Sinais e Sistemas Electrónicos – 2022/2023

Estrutura do MOSFET de canal N

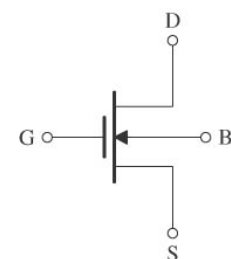
- Dispositivo simétrico: dreno é, por convenção, o terminal de maior tensão ($I_{DS} > 0$);

- Substrato é ligado à tensão mais baixa do circuito (em geral, GND).

Representação em corte transversal



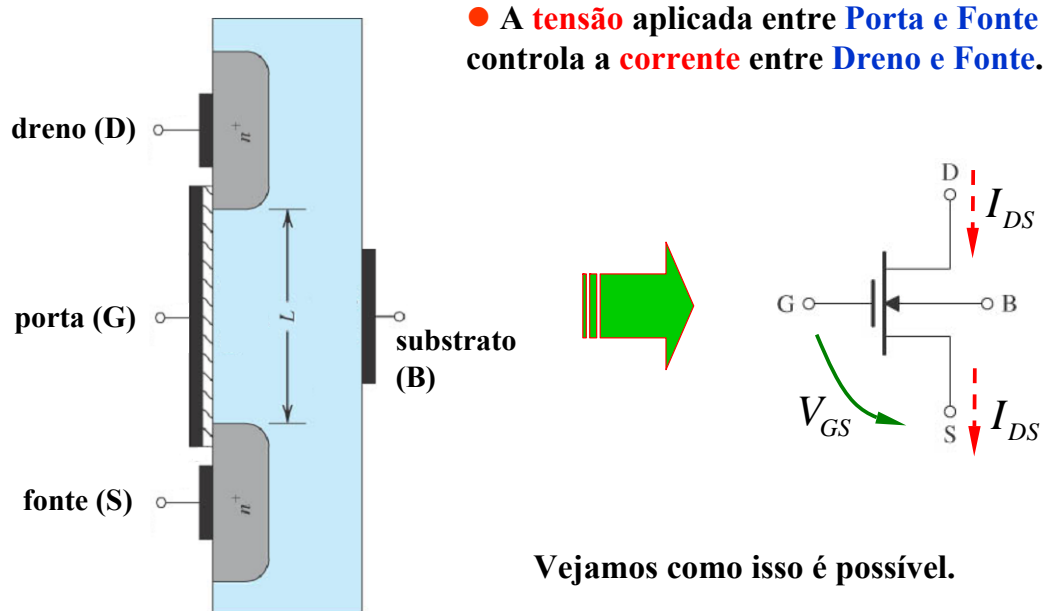
simbolo:
Transistor
NMOS



E. Martins, DET Universidade de Aveiro

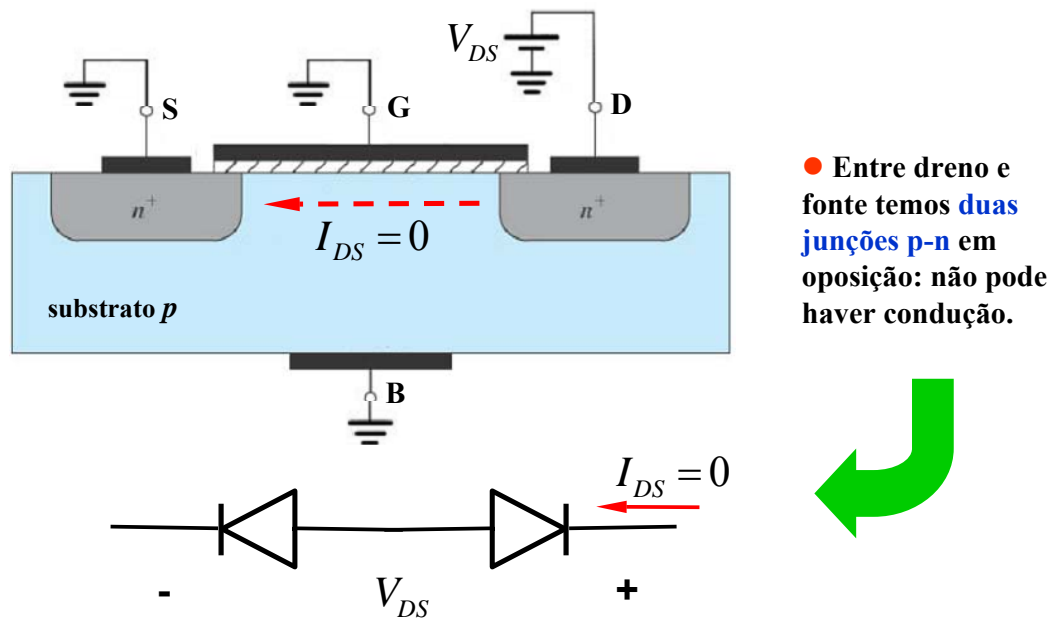
8.1-6

Funcionamento



Funcionamento

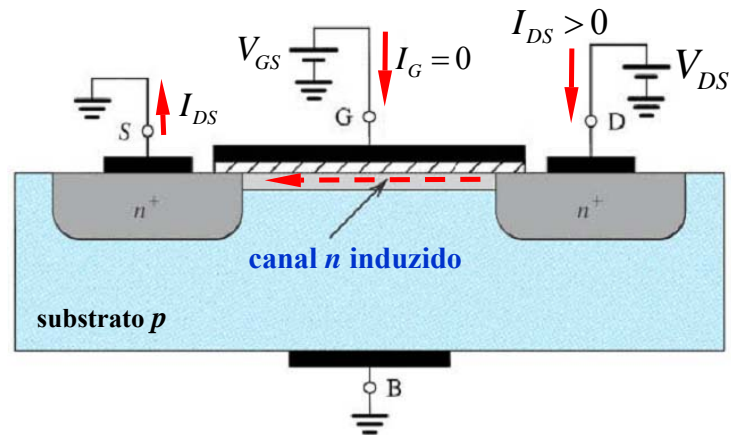
- Se $V_{GS} = 0$ então $I_{DS} = 0$.



Funcionamento

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

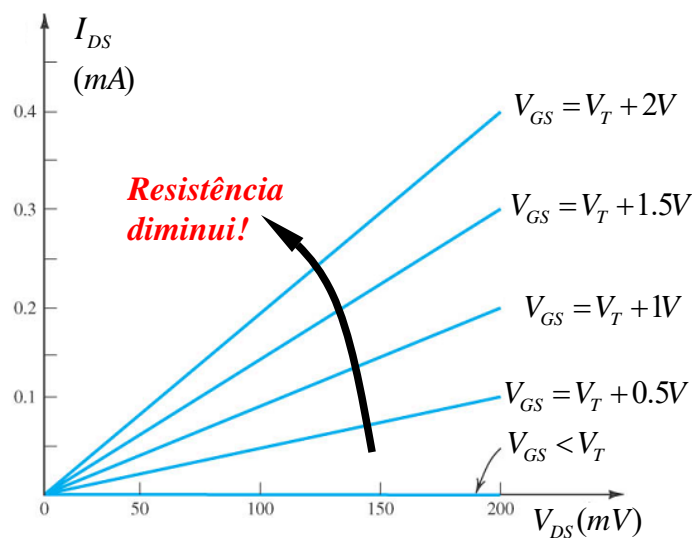
- Tensão positiva na porta repele lacunas para baixo, criando zona de carga negativa correspondente aos iões receptores que ficam a ‘descoberto’;



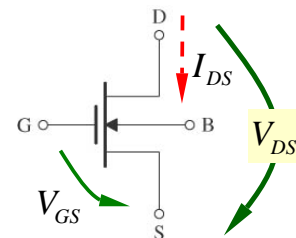
- Quando V_{GS} ultrapassa a *tensão de limiar*, V_T , o campo eléctrico vertical torna-se suficiente para atrair electrões livres das regiões da fonte e do dreno para a região debaixo da porta, criando o **canal de inversão** que é condutor.

Funcionamento

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



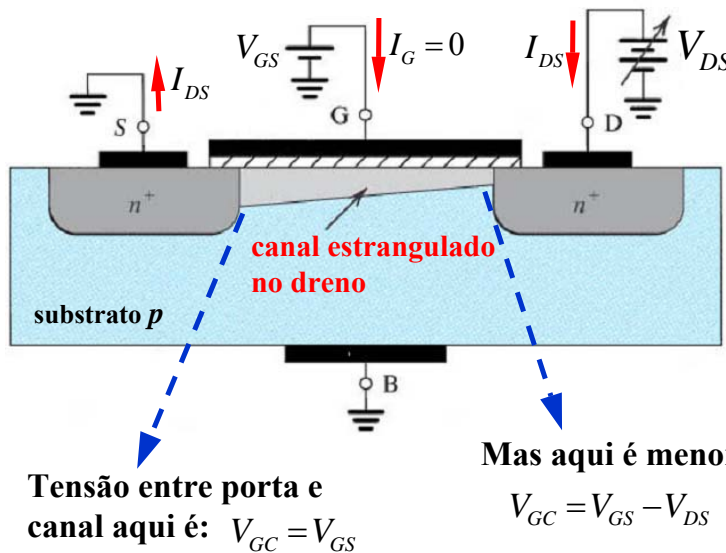
- Declive de $I_{DS} = f(V_{DS})$ aumenta com V_{GS} : MOSFET funciona como uma **resistência controlada por tensão**;



- 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} ?

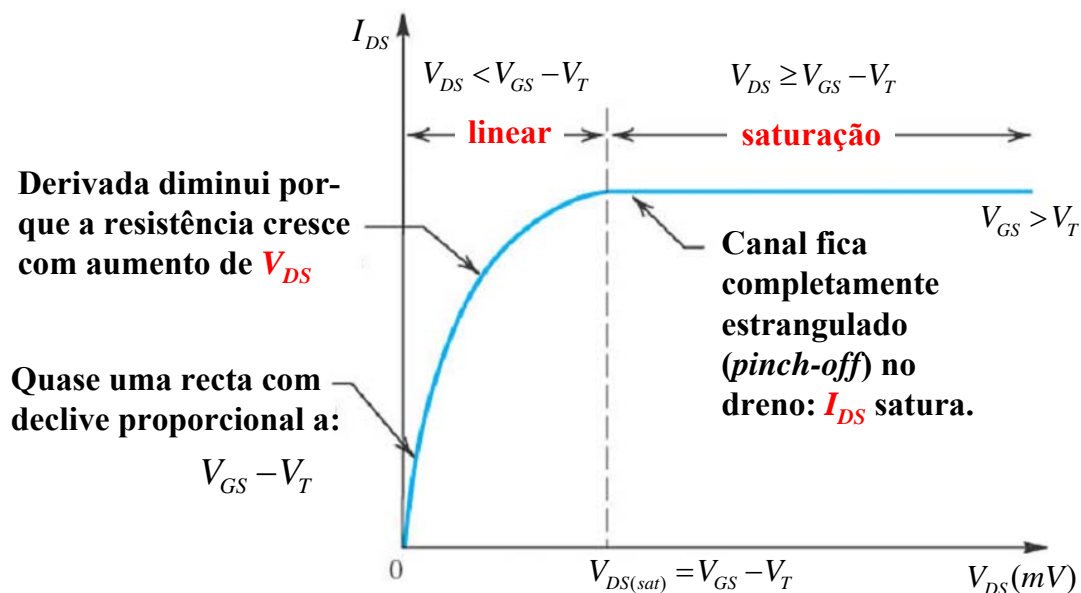


● O canal **tende a afunilar** junto ao dreno à medida que aumentamos V_{DS} ;

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

Funcionamento

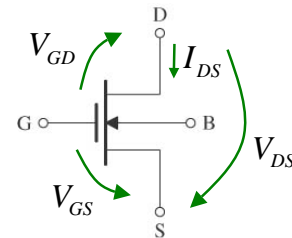
Qual é o efeito deste fenómeno na característica corrente-tensão do MOSFET?



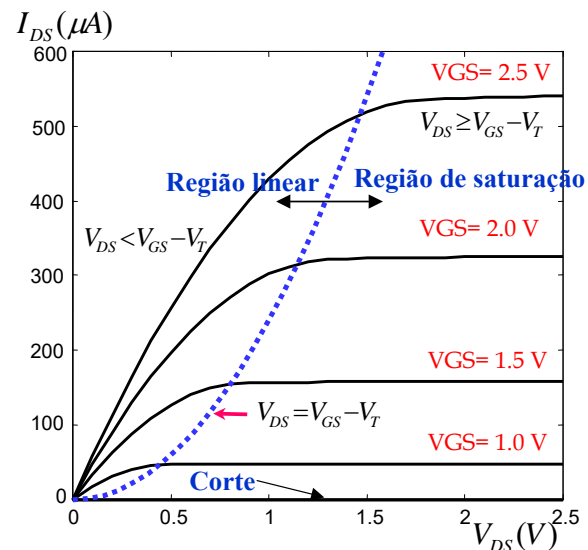
Modelo quadrático e MOSFET de canal p

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

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

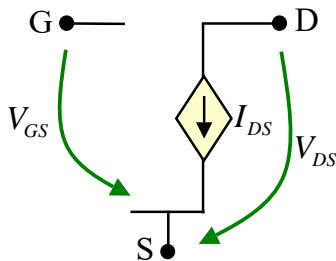


- **Corte:** Não existe canal de inversão;
- **Linear ou triodo** - Canal de inversão uniforme; condutância entre dreno e fonte é controlada por V_{GS} ;
- **Saturação:** Canal estrangulado no dreno; transistor funciona como fonte de corrente controlada por V_{GS} .



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/V².

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

k depende das dimensões do transistor.

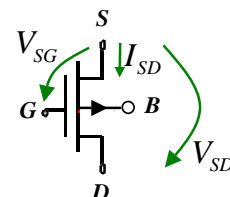
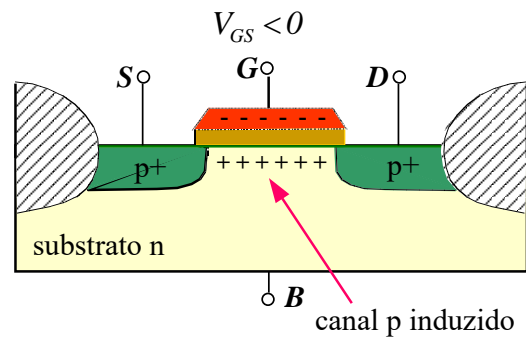
k' é a *transcondutância do processo*;

W/L é a *razão geométrica*

Modelo de grande sinal do MOSFET

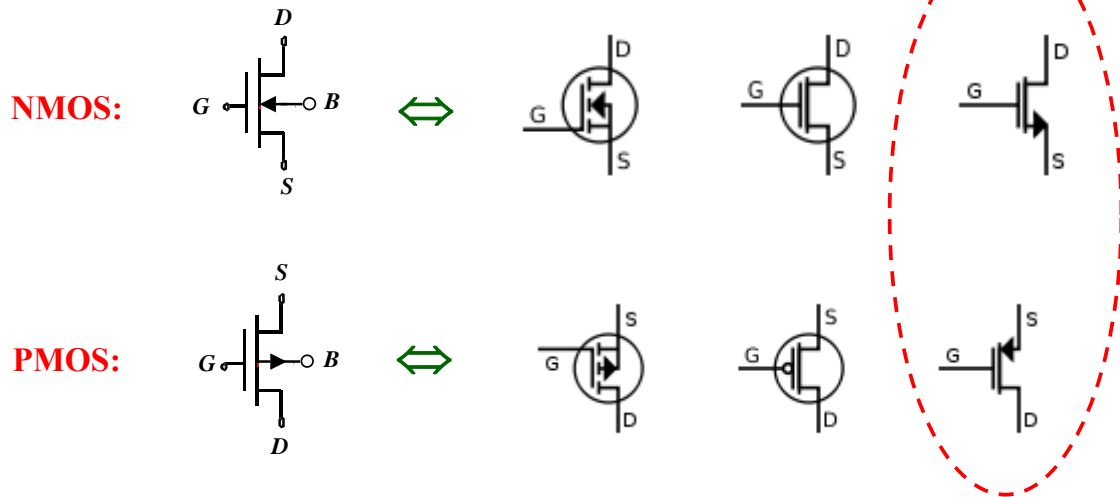
MOSFET de canal P (PMOS)

- 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 .

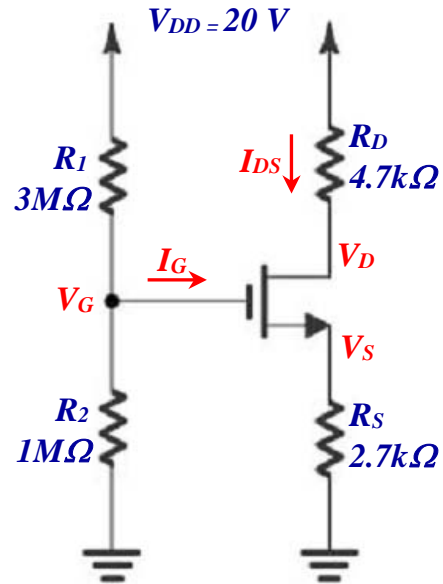
Como $I_G = 0A$, a tensão V_G pode calcular-se usando a expressão do divisor de tensão:

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

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...

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

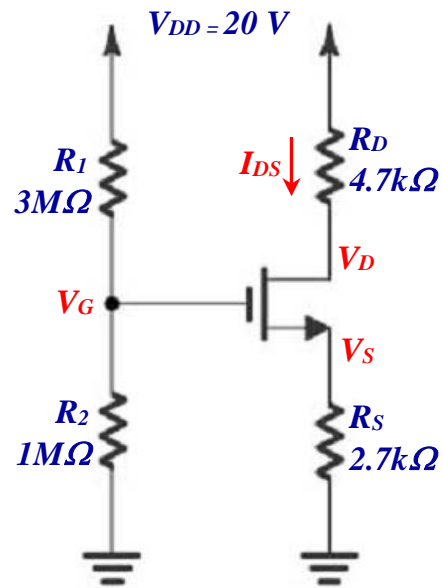
Substituindo valores, obtemos:

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

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

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

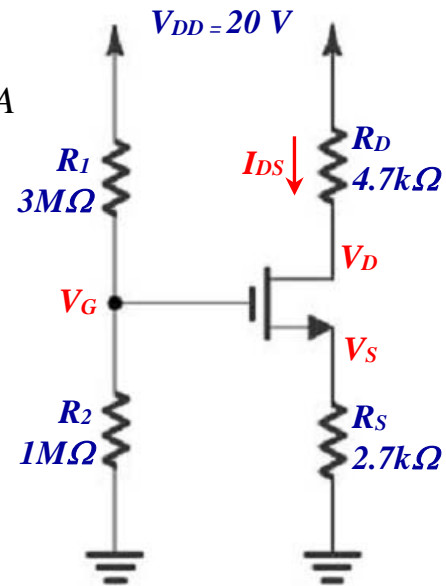
V_D é dado por

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

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.

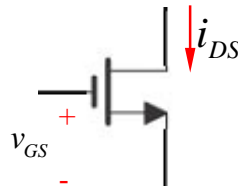


NOTA: Se não se confirmasse o estado saturado do transístor, teríamos que refazer os cálculos considerando-o na região linear.

Modelo de pequeno sinal do MOSFET (transístor como amplificador)

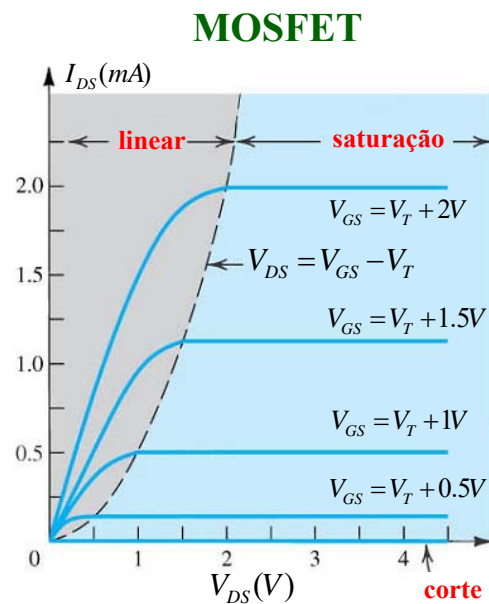
MOSFET como amplificador

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

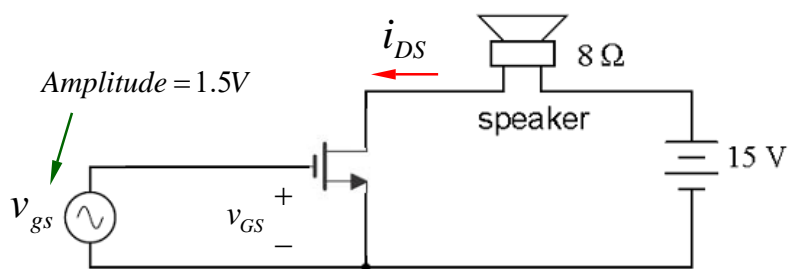


$$i_{DS} = k(v_{GS} - V_T)^2$$

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

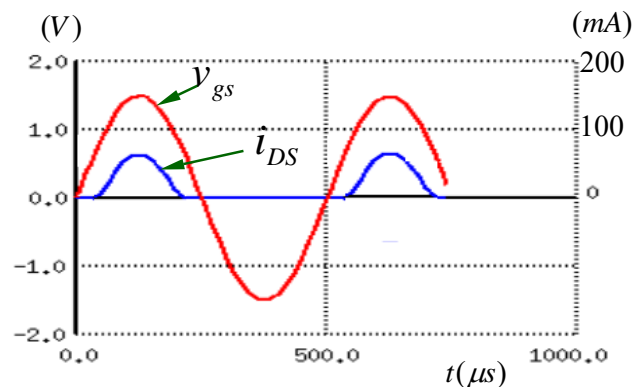


Exemplo de aplicação: amplificador audio

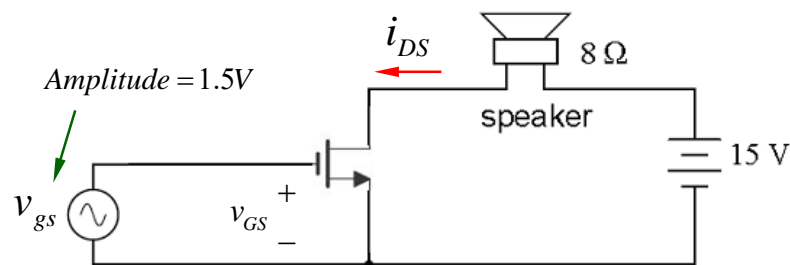


- ... mas a forma de onda da corrente i_{DS} não aparece igual à da fonte v_{gs} !

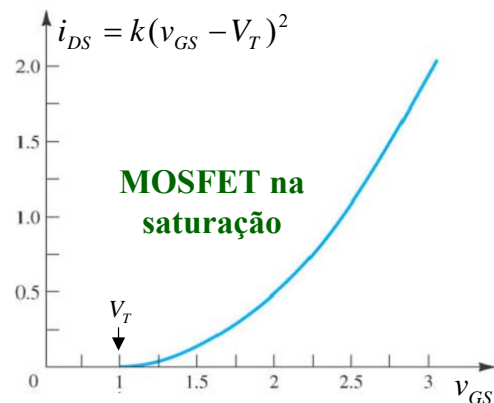
- Porquê?



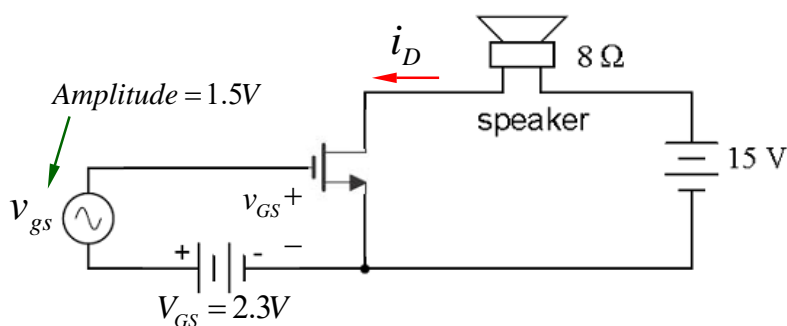
Exemplo de aplicação: amplificador audio



- Para valores de v_{GS} inferiores 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.

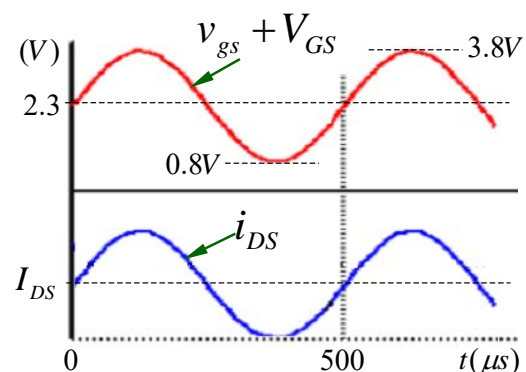


Exemplo de aplicação: amplificador audio



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

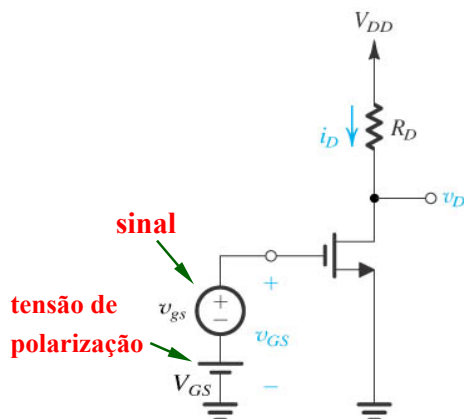
- A polarização garante que o MOSFET conduz para todos os valores de v_{gs} .
- Forma de onda de i_{DS} é uma reprodução fiel de v_{gs} .



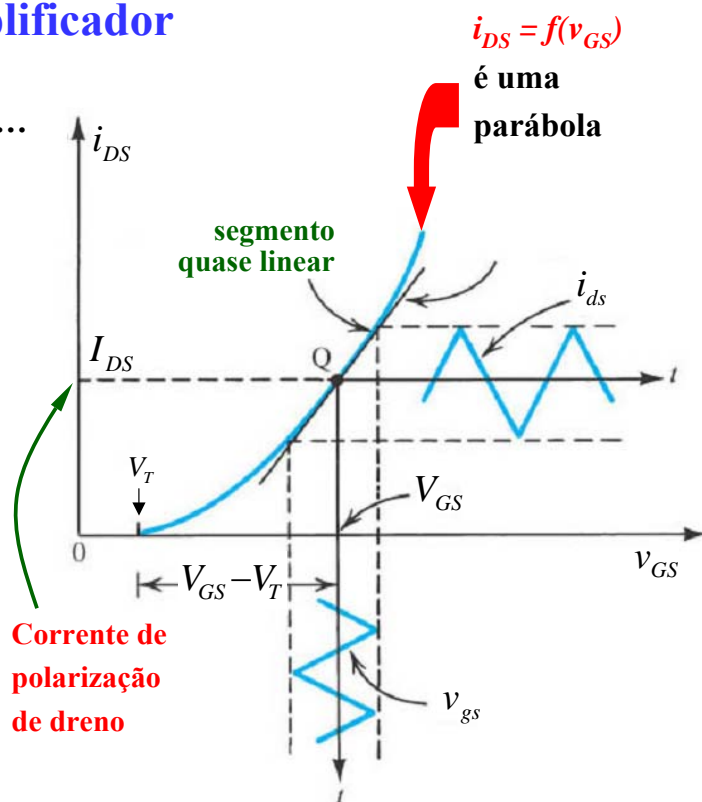
MOSFET como amplificador

- Desenhado de outra forma...

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

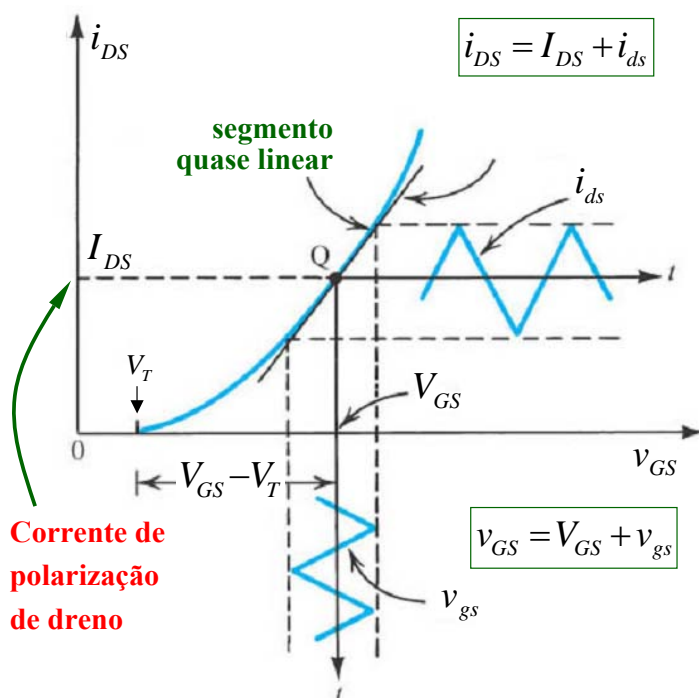


E. Martins, DET Universidade de Aveiro



8.1-27

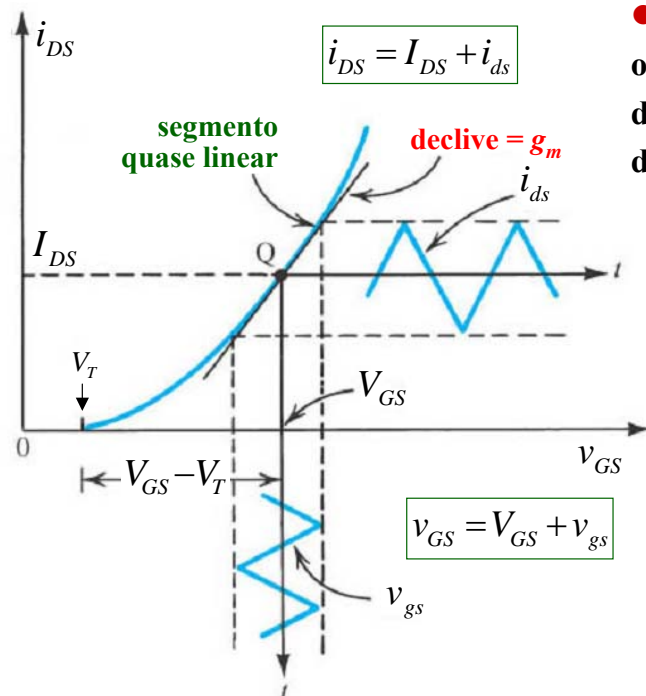
(Um parêntesis sobre notação...)



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:

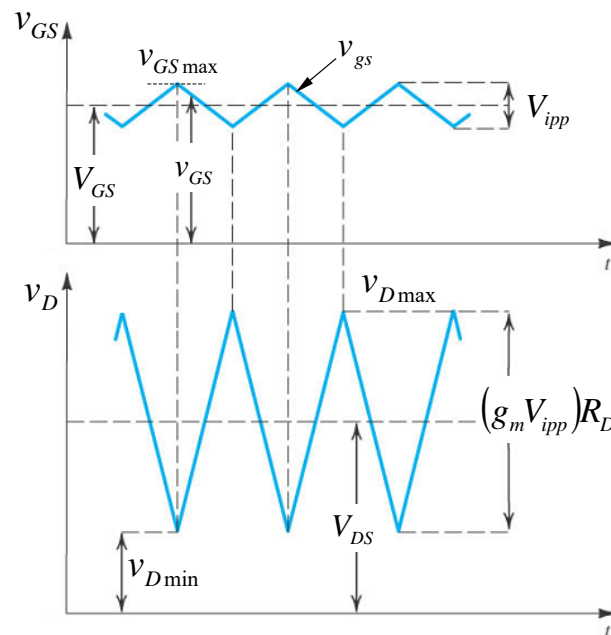
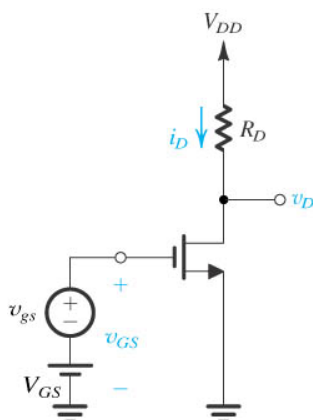
$$i_{ds} = g_m v_{gs}$$

Sendo g_m a **transconductância** do transístor em A/V.

E. Martins, DET Universidade de Aveiro

8.1-29

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: $v_{Dmax} < V_{DD}$

E. Martins, DET Universidade de Aveiro

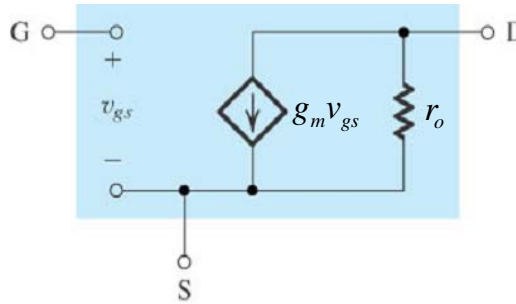
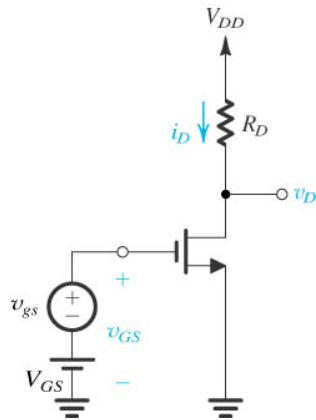
8.1-30

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.*