

O Transistor de Efeito de Campo (FET)

O mecanismo de controlo de corrente é baseado no campo eléctrico estabelecido pelo potencial aplicado no terminal de controlo.

A corrente no transistor de efeito de campo é devida tanto por electrões como por buracos, dependendo do tipo de FET – trata-se de um dispositivo unipolar.

O MOSFET – Transistor de Efeito de Campo Metal Óxido Semicondutor; o MOSFET tornou-se bastante popular a partir da década de 70;

Comparado com o BJT, o MOSFET:

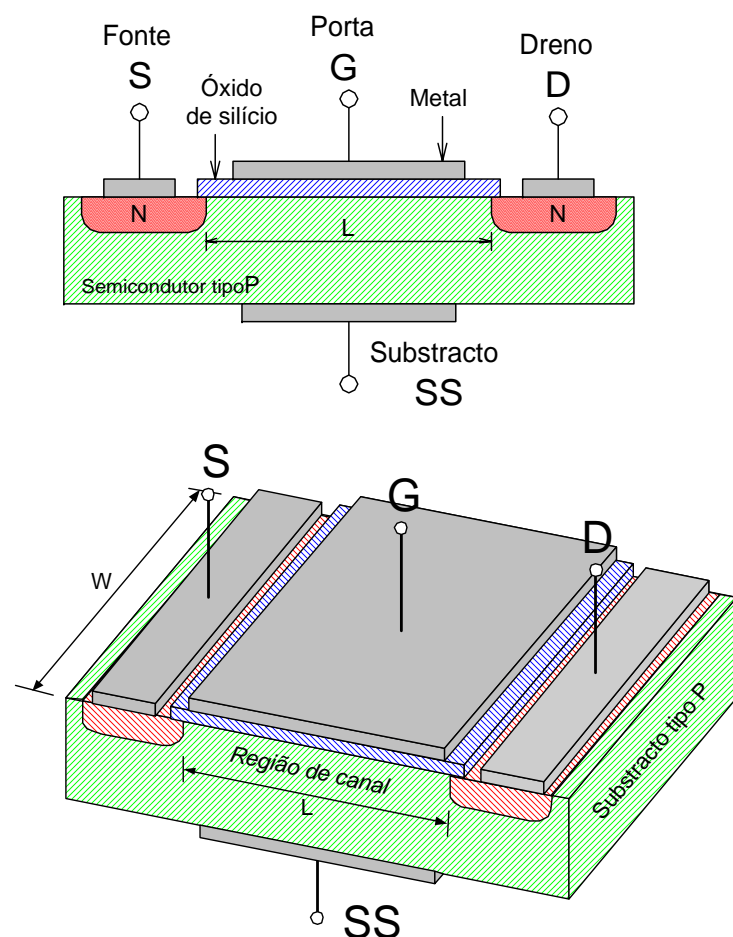
Pode ser fabricado com dimensões bastante reduzidas; elevada escala de integração;

Fácil fabricação; custos de fabrico mais reduzidos;

Circuitos simples para lógica digital;

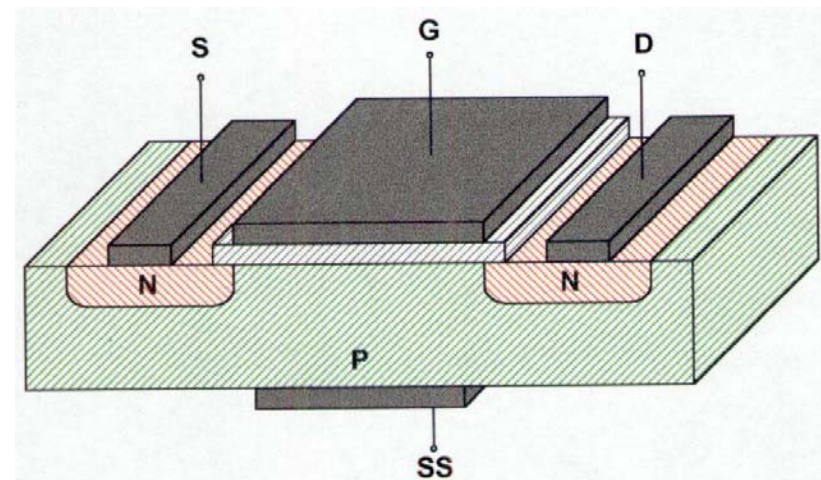
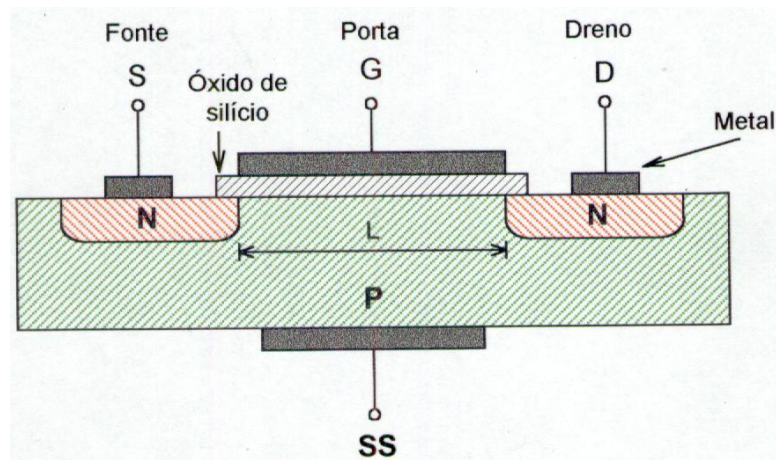
Desempenho inferior em circuitos analógicos (ganho mais baixo);

O MOSFET – estrutura física



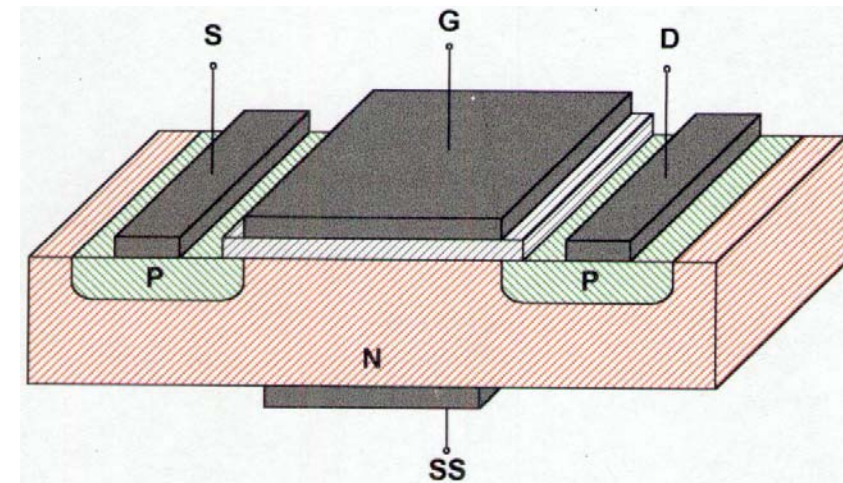
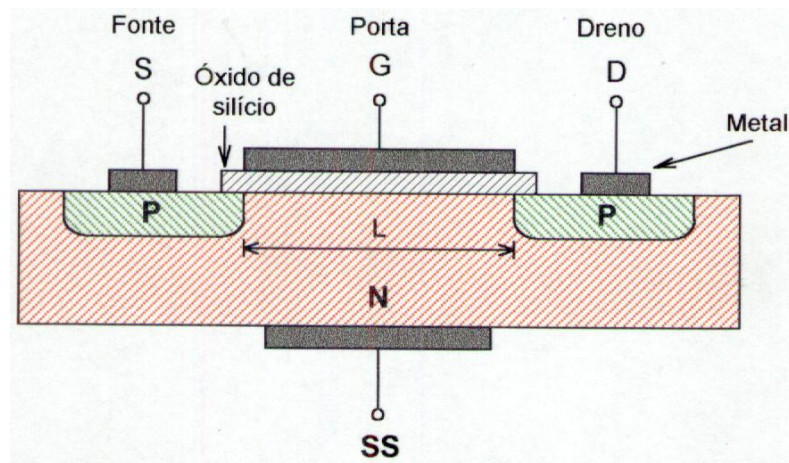
- **4 terminais:** Porta (*Gate*) (G), Dreno (*Drain*) (D), Fonte (*Source*) (S) e Substrato (*Body*) (SS)
- O MOSFET é normalmente um dispositivo simétrico;
- Tipicamente $L=0,15$ a $10\mu\text{m}$, $W=0,3$ a $500\mu\text{m}$ e a espessura da camada de óxido de silício está entre os $0,02$ a $0,1\mu\text{m}$;

O Transistor de Efeito de Campo tipo MOSFET



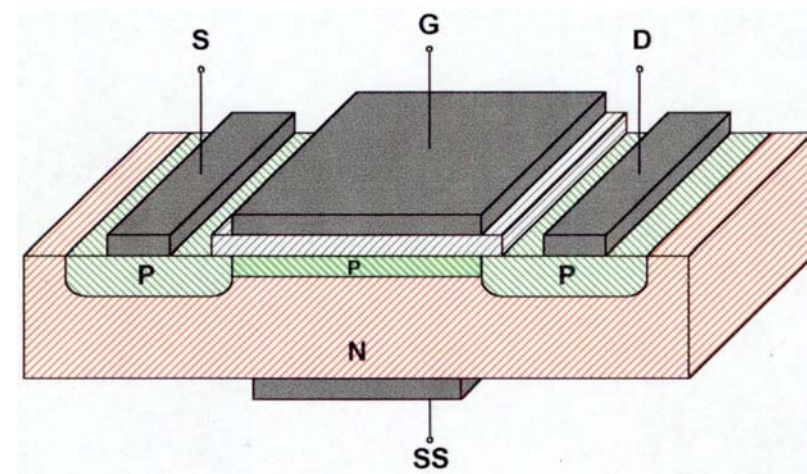
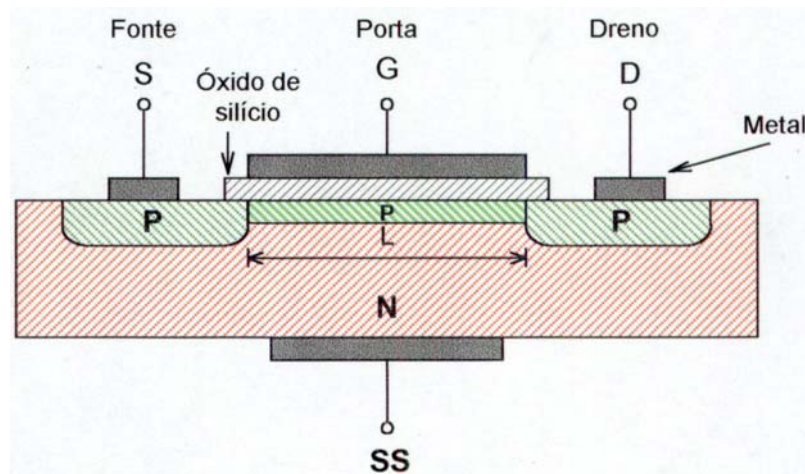
MOSFET, canal n, de intensificação ou de reforço

O Transistor de Efeito de Campo tipo MOSFET



MOSFET, canal p, de intensificação ou reforço

O Transistor de Efeito de Campo tipo MOSFET



MOSFET, canal p, de depleção

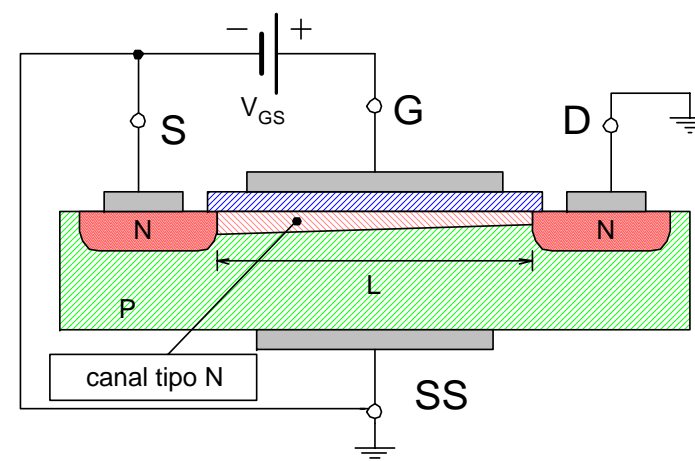
Princípio de funcionamento do MOSFET de intensificação

Gate não polarizada

Sem qualquer tensão aplicada na *Gate* não haverá corrente entre o *Drain* e a *Source*.

Gate polarizada com tensão V_{GS}

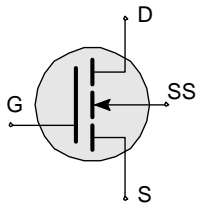
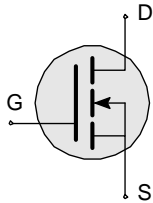
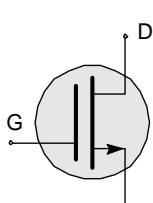
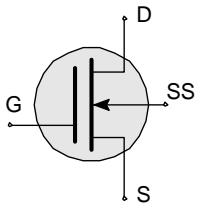
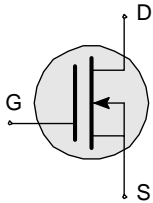
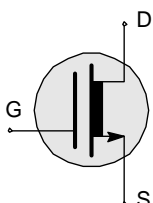
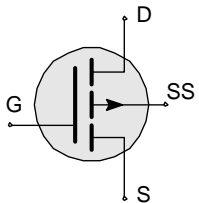
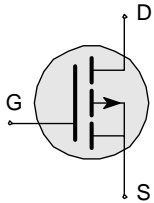
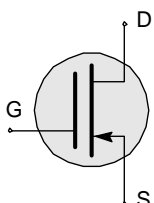
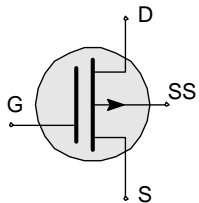
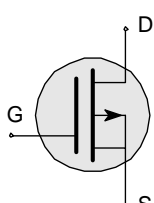
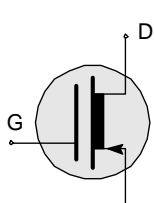
Com os terminais S, D e SS colocadas à massa e com uma tensão positiva aplicada no terminal G estabelece-se um campo eléctrico dirigido de G para SS; os buracos são repelidos e afastam-se da região de canal.



Aumentando a tensão na Gate, V_{GS} , o campo eléctrico atrai os portadores minoritários (electrões) do substrato para a região de canal. Logo que se acumule uma quantidade suficiente de electrões na região do substrato junto à Gate, cria-se uma região tipo n, designada por camada de inversão, do mesmo tipo das regiões da Source e do Drain com capacidade

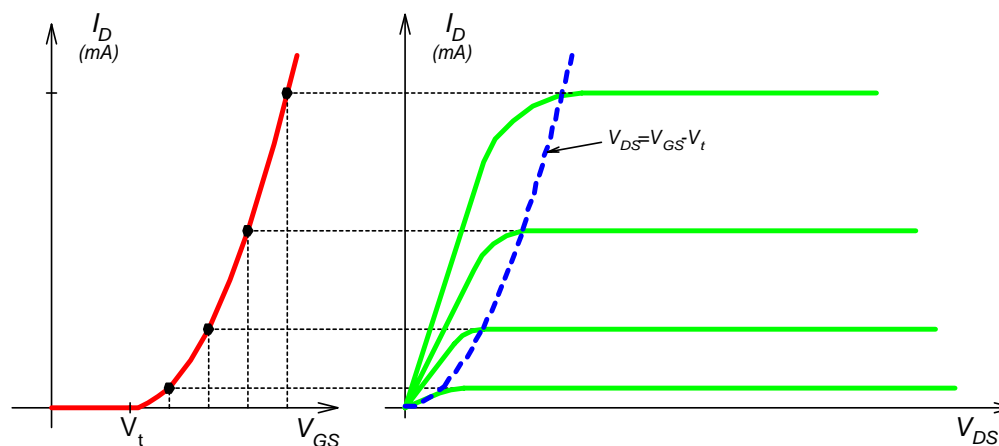
O valor de V_{GS} para a qual se forma a camada de inversão é designada por tensão de limiar, $V_{GS_{th}}$ ou apenas V_t . Para o dispositivo canal n, V_t é positivo e tipicamente apresenta valores entre 1 a 3V.

Símbolos do MOSFET

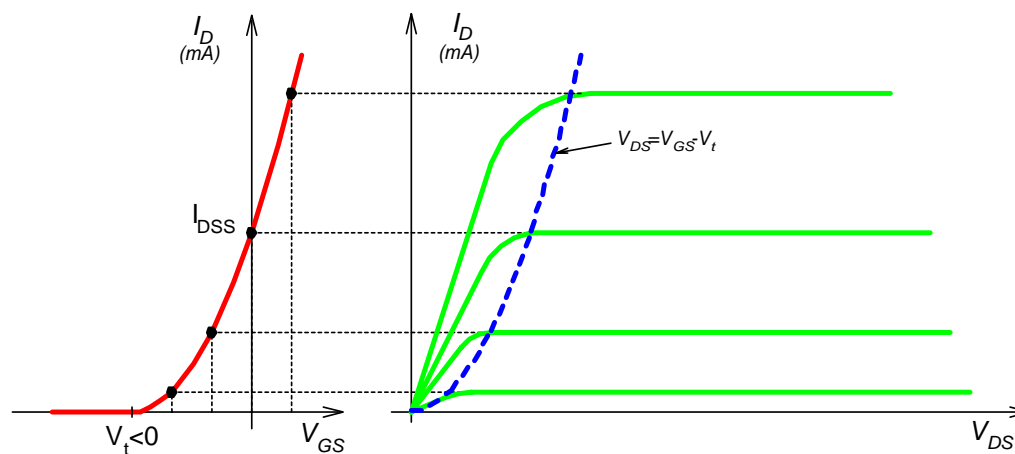
MOSFET canal n		MOSFET canal p	
intensificação	deplexão	intensificação	deplexão
  	  	  	  

Curvas características do MOSFET canal n

Intensificação ($V_t > 0$)

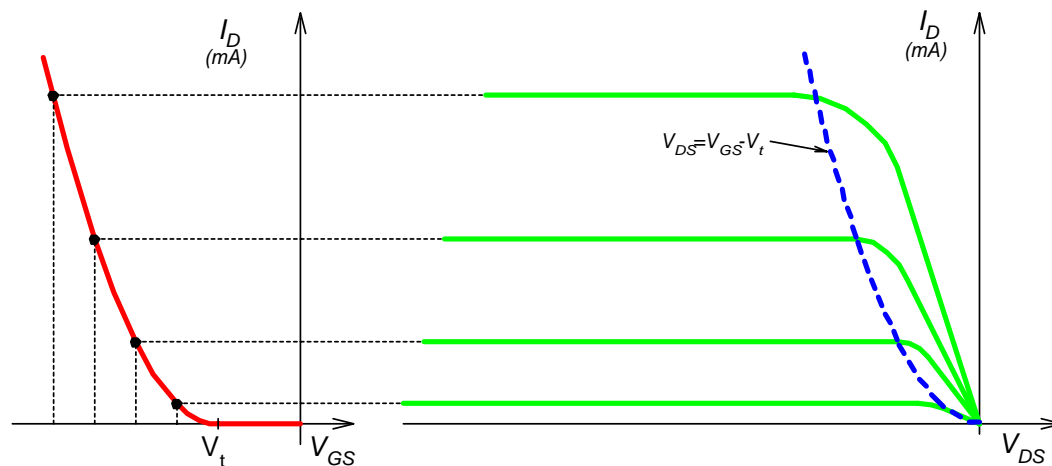


Depleção ($V_t < 0$)

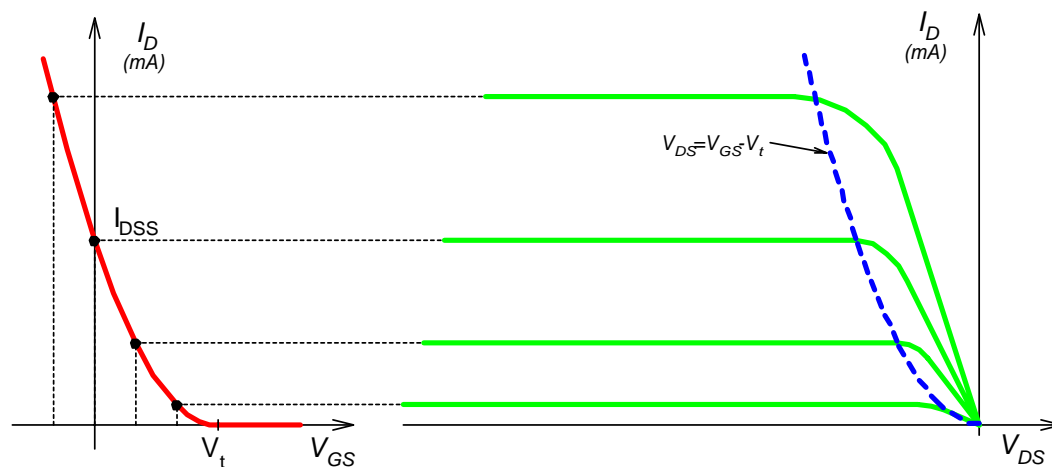


Curvas características do MOSFET canal p

Intensificação ($V_t < 0$)

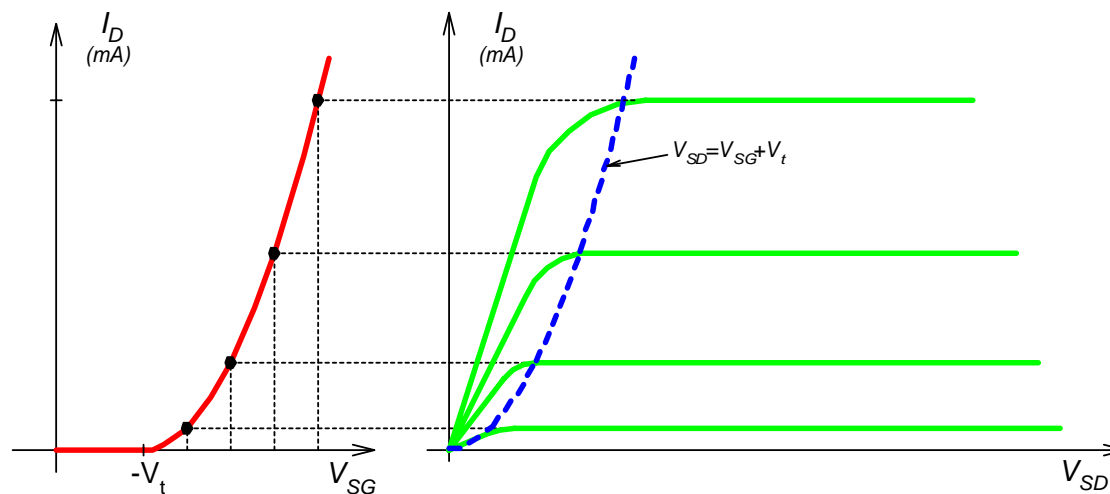


Deplexão ($V_t > 0$)

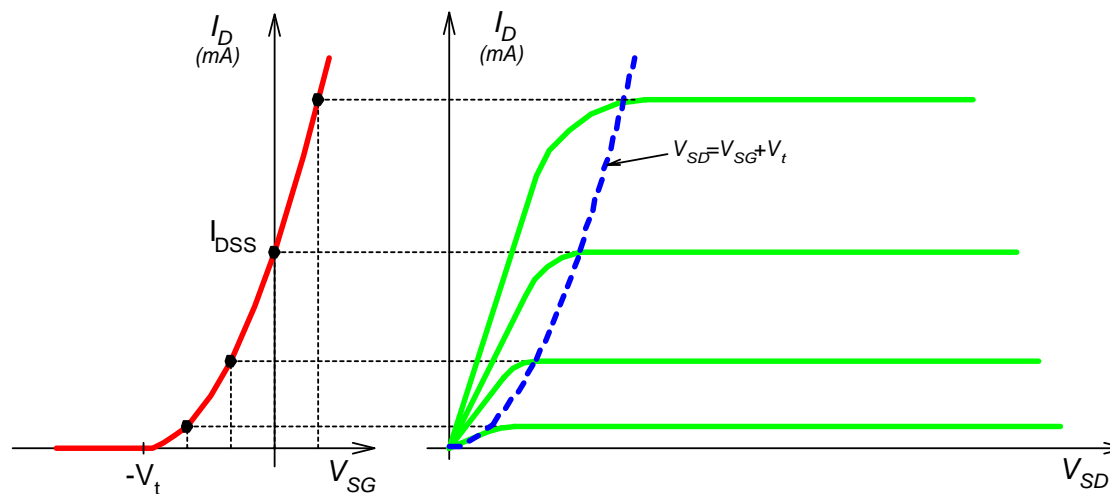


Curvas características do MOSFET canal p

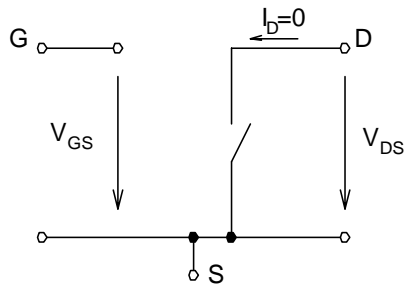
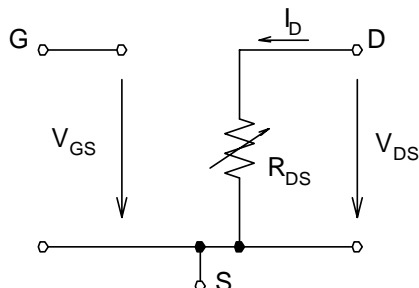
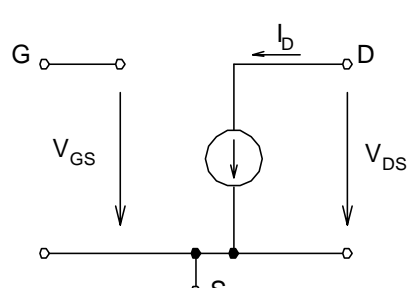
Intensificação ($V_t < 0$)



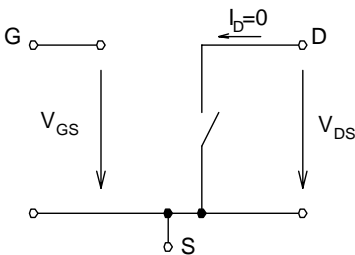
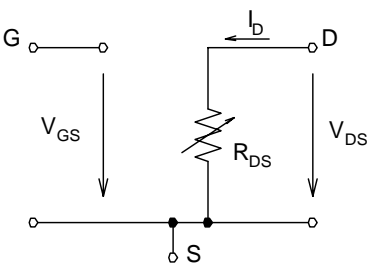
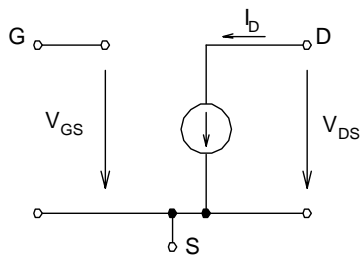
Deplexão ($V_t > 0$)



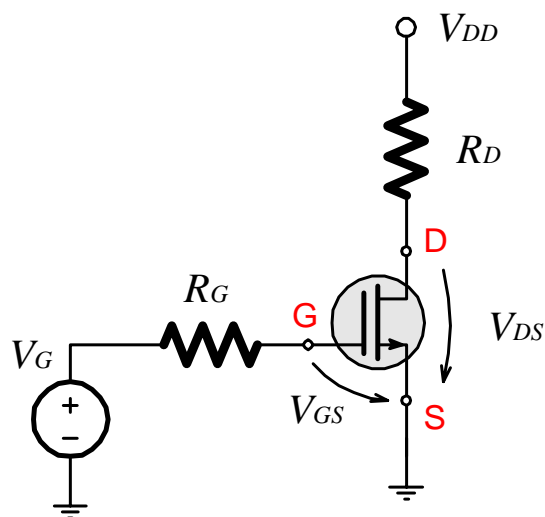
MOSFET canal n – zonas de funcionamento e modelos *dc*

Zona de Corte	Zona Tríodo	Zona de Saturação
$V_{GS} < V_t$ <p>Circuito aberto</p>  $I_D = 0$	$V_{GS} > V_t$ $V_{DS} < V_{GS} - V_t$ <p>Resistência controlada por tensão</p>  $I_D = k \left[2(V_{GS} - V_t)V_{DS} - V_{DS}^2 \right]$	$V_{GS} > V_t$ $V_{DS} \geq V_{GS} - V_t$ <p>Fonte de corrente controlada por tensão</p>  $I_D = k(V_{GS} - V_t)^2(1 + \lambda V_{DS})$

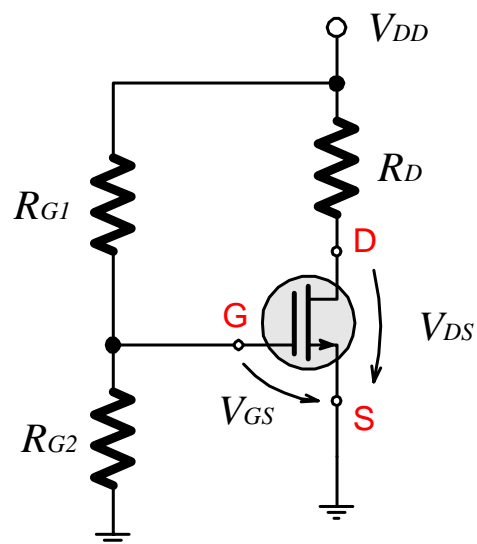
MOSFET canal p – zonas de funcionamento e modelos dc

Zona de Corte	Zona Trípodo	Zona de Saturação
$V_{GS} > V_t$ ou $V_{SG} < -V_t$ <p>Circuito aberto</p>  $I_D = 0$	$V_{GS} < V_t \quad \wedge \quad V_{DS} > V_{GS} - V_t$ ou $V_{SG} > -V_t \quad \wedge \quad V_{SD} < V_{SG} + V_t$ <p>Resistência controlada por tensão</p>  $I_D = k[2(V_{GS} - V_t)V_{DS} - V_{DS}^2]$ ou $I_D = k[2(V_{SG} + V_t)V_{SD} - V_{SD}^2]$	$V_{GS} < V_t \quad \wedge \quad V_{DS} \leq V_{GS} - V_t$ ou $V_{SG} > -V_t \quad \wedge \quad V_{SD} \geq V_{SG} + V_t$ <p>Fonte de corrente controlada por tensão</p>  $I_D = k(V_{GS} - V_t)^2(1 + \lambda V_{DS})$ ou $I_D = k(V_{SG} + V_t)^2(1 + \lambda V_{SD})$

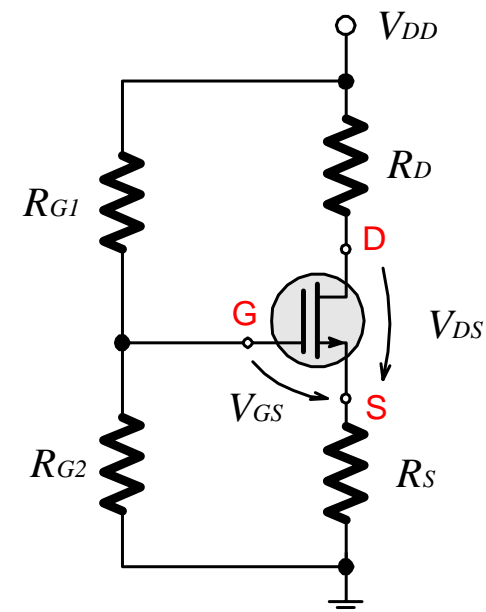
Exemplos de circuitos de polarização dc (MOSFET canal n)



a) Polarização simples

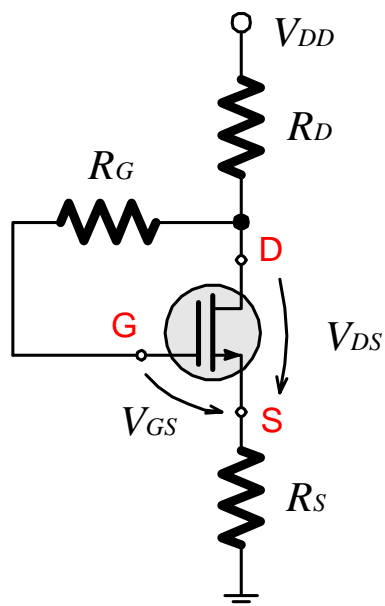


b) Polarização por divisor
de tensão

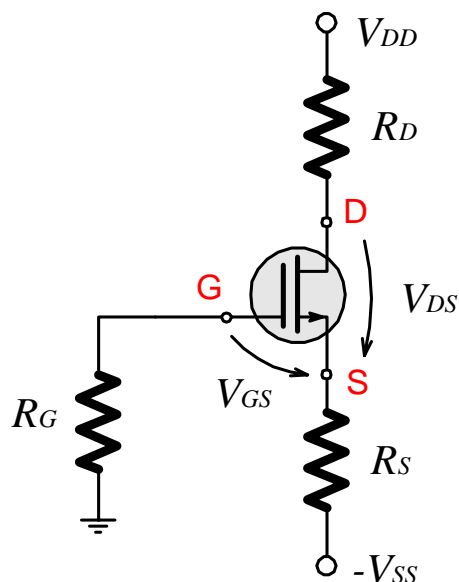


c) Polarização por divisor de
tensão e resistência na fonte

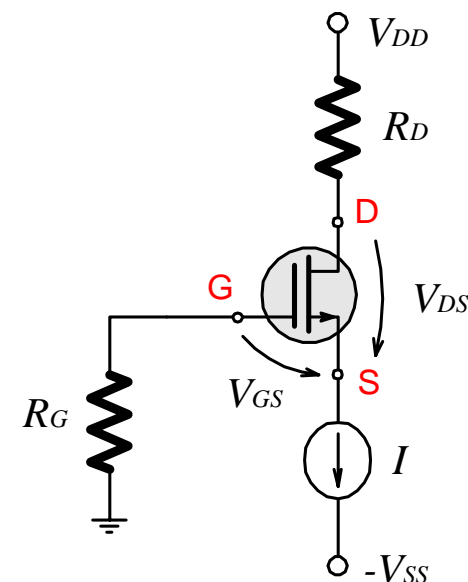
Exemplos de circuitos de polarização *dc* (MOSFET canal **n**) (cont.)



d) Polarização com resistência de retroacção entre dreno e porta



e) Polarização com duas fontes de tensão



f) Polarização por fonte de corrente

Calcule I_D e V_{GS} para:

- $V_G = 1V$
- $V_G = 3V$
- $V_G = 4V$

Equações:

① Malha Gate/Source:

$$-V_G + R_G I_G + V_{GS} = 0$$

$$I_G = 0$$

$$\boxed{V_{GS} = V_G}$$

② Malha Drain/Source:

$$-V_{DD} + R_D I_D + V_{DS} = 0$$

$$\boxed{V_{DS} = V_{DD} - R_D \cdot I_D}$$

a) $V_G = 1V \Rightarrow V_{GS} = 1V$

• Comparação com V_t

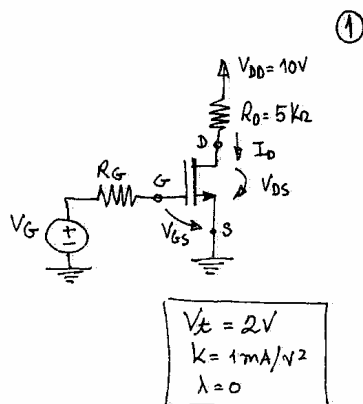
Se $V_{GS} < V_t \Rightarrow$ MOSFET "OFF" \Leftrightarrow Z. Corte

Se $V_{GS} > V_t \Rightarrow$ MOSFET "ON" \Leftrightarrow Z. Triodo ou Z. Saturação

No nosso caso tem-se:

$$V_{GS} < V_t \quad (1 < 2) \Rightarrow \text{Z. Corte}$$

$$I_D = 0 \Rightarrow V_{DS} = V_{DD}$$



b) $V_G = 3V \Rightarrow V_{GS} = 3V$

$V_{GS} > V_t \quad (3 > 2) \Rightarrow$ MOSFET "ON" \Leftrightarrow Z. Triodo ou Z. Saturação

H: Z. Saturação

Equação para Z.S.: $I_D = k (V_{GS} - V_t)^2 \cdot (1 + \lambda V_{DS})$

Como $\lambda = 0 \Rightarrow I_D = k (V_{GS} - V_t)^2$

$$I_D = 1\text{mA/V}^2 \cdot (3 - 2)^2 \cdot V^2 = 1\text{mA}$$

$$V_{DS} = 10 - 5\text{k} \cdot 1\text{mA} = 5V$$

Verificação: $V_{DS} > V_{GS} - V_t$ (para Z.S.)
 $5 > 3 - 2$ (V) confirma a hipótese

PFR: $\begin{cases} V_{GS} = 3V \\ V_{DS} = 5V \\ I_D = 1\text{mA} \end{cases}$

c) $V_G = 4V \Rightarrow V_{GS} = 4V$

$V_{GS} > V_t \quad (4 > 2) \Rightarrow$ Z.T. ou Z.S.

H: Z. SATURAÇÃO

$$I_D = k (V_{GS} - V_t)^2 \quad (\lambda = 0)$$

$$I_D = 1\text{mA/V}^2 \cdot (4 - 2)^2 \cdot V^2 = 4\text{mA}$$

$$V_{DS} = 10 - 5\text{k} \cdot 4\text{mA}$$

$$V_{DS} = -10V$$

Verificação: $V_{DS} > V_{GS} - V_t \Leftrightarrow -10 > 4 - 2$ (F) \Rightarrow Z. Triodo.

H: Z. TRIODO $I_D = k [2(V_{GS} - V_t) \cdot V_{DS} - V_{DS}^2]$ (3)

Precisamos de uma outra equação com I_D e V_{DS} .

$$\begin{cases} I_D = k [2(V_{GS} - V_t) \cdot V_{DS} - V_{DS}^2] \\ V_{DS} = V_{DD} - R_D I_D \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} I_D = k [2(V_{GS} - V_t) \cdot V_{DS} - V_{DS}^2] \\ I_D = \frac{V_{DD} - V_{DS}}{R_D} \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow k [2(V_{GS} - V_t) \cdot V_{DS} - V_{DS}^2] = \frac{V_{DD} - V_{DS}}{R_D} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow k \cdot R_D [2(V_{GS} - V_t) \cdot V_{DS} - V_{DS}^2] = V_{DD} - V_{DS} \Leftrightarrow$$

$$1mA \cdot 5k [2(4 - 2) \cdot V_{DS} - V_{DS}^2] = 10 - V_{DS} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow 5 [4 V_{DS} - V_{DS}^2] - 10 + V_{DS} = 0 \Leftrightarrow$$

$$20 V_{DS} - 5 V_{DS}^2 + V_{DS} - 10 = 0 \Leftrightarrow$$

$$\boxed{-5 V_{DS}^2 + 21 V_{DS} - 10 = 0}$$

$$V_{DS} = \begin{cases} 0,548 V \\ 3,652 V (*) \end{cases}$$

Esta 2ª Solução não serve visto que $V_{DS} < V_{GS} - V_t \Leftrightarrow 3,652 < 4 - 2$ (F)
Esta solução corresponderia à condição da Zona de Saturação;

Considerando a 1ª Solução, $V_{DS} = 0,548 V$

Verificação: $V_{DS} < V_{GS} - V_t \Leftrightarrow 0,548 < 4 - 2$ (V)
Confirma a hipótese da Z. Triodo.

$$I_D = \frac{10 - 0,548}{5k} = 1,89 mA$$

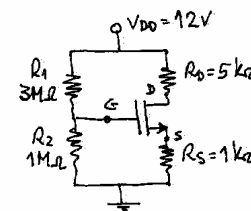
Solução: PFR $\begin{cases} V_{GS} = 4V \\ V_{DS} = 0,548V \\ I_D = 1,89mA \end{cases} \Rightarrow$ Z. TRIODO

Exemplo 2:

Equivalente de Thevenin de rede R_1, R_2, V_{DD} :

$$R_{Gth} = R_1 \parallel R_2 = 750k\Omega$$

$$V_{Gth} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{DD} = \frac{1M}{8M + 1M} \cdot 12 = 3V$$



① Malha GS

$$-V_{Gth} + R_{Gth} I_G + V_{GS} + R_S I_D = 0$$

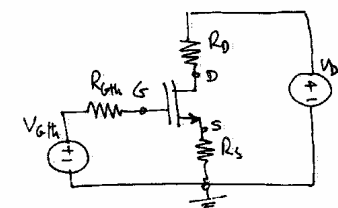
$$I_G = 0$$

$$\boxed{V_{GS} = V_{Gth} - R_S \cdot I_D}$$

② Malha DS

$$-V_{DD} + R_D I_D + V_{DS} + R_S I_D = 0$$

$$\boxed{V_{DS} = V_{DD} - (R_D + R_S) \cdot I_D}$$



H: Zona de Saturação

$$\begin{cases} I_D = k (V_{GS} - V_t)^2 \cdot (1 + \lambda V_{DS}) \\ V_{GS} = V_{Gth} - R_S \cdot I_D \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} I_D = k (V_{GS} - V_t)^2 \\ I_D = \frac{V_{Gth} - V_{GS}}{R_S} \end{cases} \Leftrightarrow k (V_{GS} - V_t)^2 = \frac{V_{Gth} - V_{GS}}{R_S} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow 1mA (V_{GS} - 2)^2 = \frac{3 - V_{GS}}{1k} \Leftrightarrow 1mA \cdot 1k (V_{GS} - 2)^2 = 3 - V_{GS} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow (V_{GS} - 2)^2 - 3 + V_{GS} = 0 \Leftrightarrow V_{GS}^2 + 4 - 4V_{GS} - 3 + V_{GS} = 0 \Leftrightarrow$$

$$V_{GS}^2 - 3V_{GS} + 1 = 0 \Rightarrow V_{GS} = \begin{cases} 2,618 V \\ 0,382 V (*) \end{cases}$$

(*) Esta solução não serve visto que $V_{GS} < V_T \Leftrightarrow$ Z. Corte ⁽²⁾

Então, considerando $V_{GS} = 2,618V \Rightarrow I_D = \frac{3 - 2,618}{1k} = 0,382mA$

$V_{DS} = 12 - (5k + 1k) \cdot 0,382mA = 9,7V$

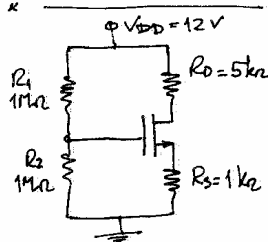
Verificação (Z.S.):

$V_{DS} > V_{GS} - V_T \Leftrightarrow 9,7 > 2,618 - 2 \quad (\checkmark)$
Verifica a hipótese.

PAR: $\begin{cases} V_{GS} = 2,618V \\ V_{DS} = 9,7V \\ I_D = 0,382mA \end{cases}$

Equivalente de Thévenin:

$R_{th} = R_1 || R_2 = 500k\Omega$
 $V_{Gth} = \frac{17}{17+17} \cdot 12 = 6V$



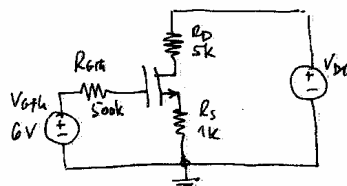
H: Zona de Saturação

$\begin{cases} I_D = k(V_{GS} - V_T)^2 \\ I_D = \frac{V_{Gth} - V_{GS}}{R_S} \end{cases}$

$k(V_{GS} - V_T)^2 = \frac{V_{Gth} - V_{GS}}{R_S}$

$1mA(V_{GS} - 2)^2 = \frac{6 - V_{GS}}{1k} \Leftrightarrow V_{GS}^2 + 4 - 4V_{GS} - 6 + V_{GS} = 0$

$V_{GS}^2 - 3V_{GS} - 2 = 0 \Leftrightarrow V_{GS} = \begin{cases} 3,56V \\ -0,56V (*) \end{cases}$



(*) A solução $-0,56V$ não serve, já que se tem $V_{GS} < V_T \Leftrightarrow$ Z. Corte ⁽³⁾

Considerando $V_{GS} = 3,56V \Rightarrow I_D = \frac{6 - 3,56}{1k} = 2,44mA$

$V_{DS} = 12 - (5k + 1k) \cdot 2,44mA = -2,64V$

Verificação (Z.S.) $\Rightarrow V_{DS} > V_{GS} - V_T \Leftrightarrow -2,64 > 3,56 - 2 \quad (\text{F}) \Rightarrow$ Z. Triodo.

Reformulando a hipótese para Zona Triodo:

$\begin{cases} I_D = k[2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2] \\ V_{GS} = V_{Gth} - R_S I_D \\ V_{DS} = V_{DD} - (R_0 + R_S) \cdot I_D \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} I_D = k[2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2] \\ V_{GS} = 6 - 1 \cdot I_D \\ V_{DS} = 12 - 6 \cdot I_D \end{cases} \Leftrightarrow$

$\Leftrightarrow I_D = 1mA[2(6 - I_D - 2)(12 - 6I_D) - (12 - 6I_D)^2] = 1mA[2(4 - I_D)(12 - 6I_D) - (12 - 6I_D)^2] =$

$= 1mA[2(48 - 24I_D - 12I_D + 6I_D^2) - (144 + 36I_D^2 - 144I_D)] =$

$= 1mA[12I_D^2 - 72I_D + 96 - 36I_D^2 + 144I_D - 144] =$

$\Leftrightarrow 24I_D^2 - 71I_D + 48 = 0$

$I_D = \begin{cases} 1,0456mA \quad (1) \\ 1,9126mA \quad (2) \end{cases}$

(1) Para $I_D = 1,0456mA \Rightarrow V_{GS} = 6 - 1k \cdot 1,0456mA = 4,9544V$
 $V_{DS} = 12 - 6k \cdot 1,0456mA = 5,7264V$

Verificação (Z.T.) $\Rightarrow V_{DS} < V_{GS} - V_T \Leftrightarrow 5,7264 < 4,9544 - 2 \quad (\text{F})$
A solução $I_D = 1,0456mA$ não serve.

(2) Para $I_D = 1,9126mA \Rightarrow V_{GS} = 6 - 1k \cdot 1,9126mA = 4,0874V$
 $V_{DS} = 12 - 6k \cdot 1,9126mA = 0,5244V$

Verificação (Z.T.) $\Leftrightarrow V_{DS} < V_{GS} - V_T \Leftrightarrow 0,5244 < 4,0874 - 2 \quad (\checkmark)$ - Verifica-se:

PAR: $\begin{cases} V_{GS} = 4,0874V \\ V_{DS} = 0,5244V \\ I_D = 1,9126mA \end{cases}$