



Transistor FET

FET

□ Construção

■ Transistor de efeito de campo (FET)

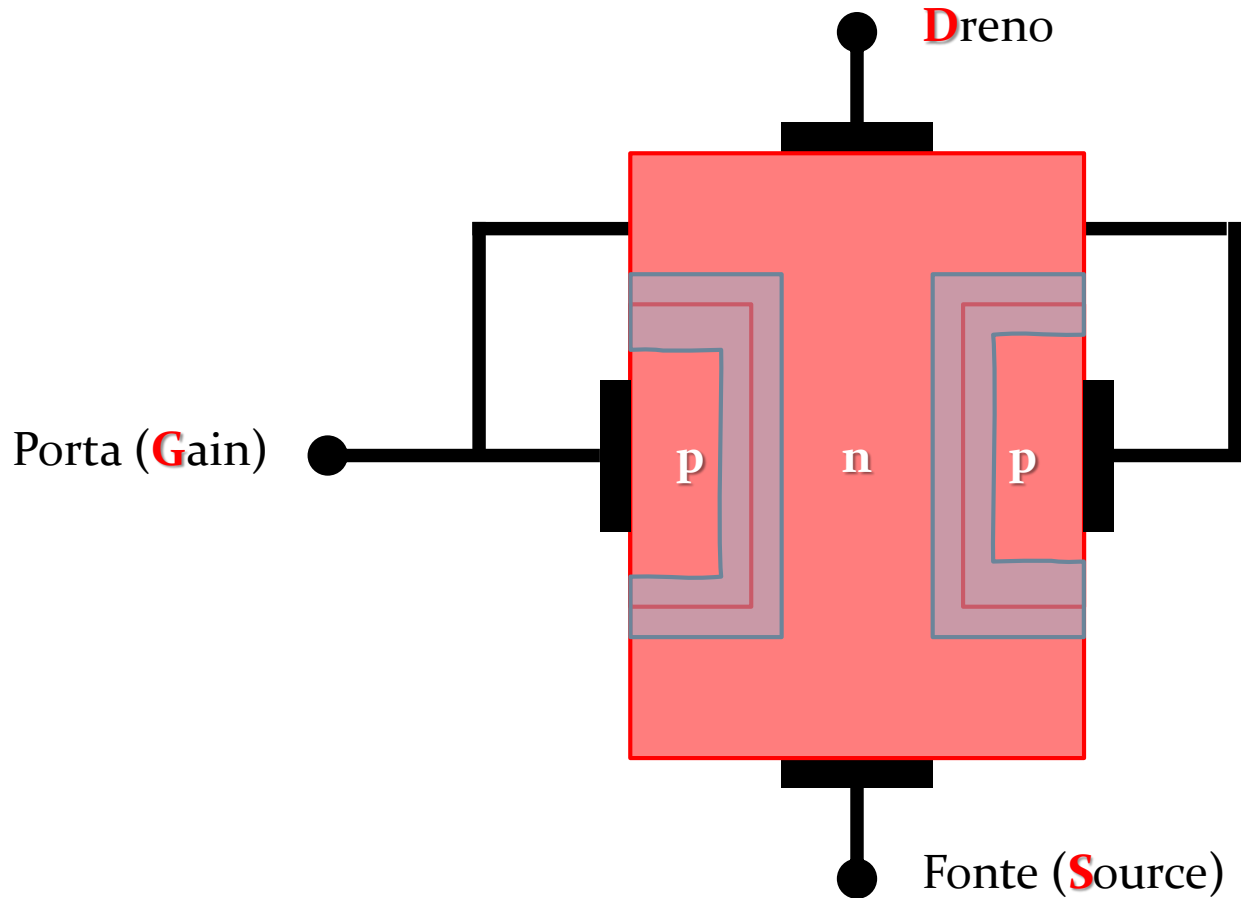
- Elemento de três terminais
- Dispositivo controlado por **tensão**
 - No BJT, o controle do dispositivo é feito por corrente na base
- Controle induzido por **campo elétrico**
 - Daí o nome “efeito de campo”
- Melhor estabilidade em relação ao BJT
- Pior sensibilidade ao sinal de entrada em relação ao BJT
 - Trade-off de engenheiro!

FET

- Tipos
 - JFET
 - Transistor de junção (J)
 - MOSFET por depleção
 - MOSFET por intensificação
 - Metal-óxido-semicondutor (MOS)
 - Facilidade para integração em CI

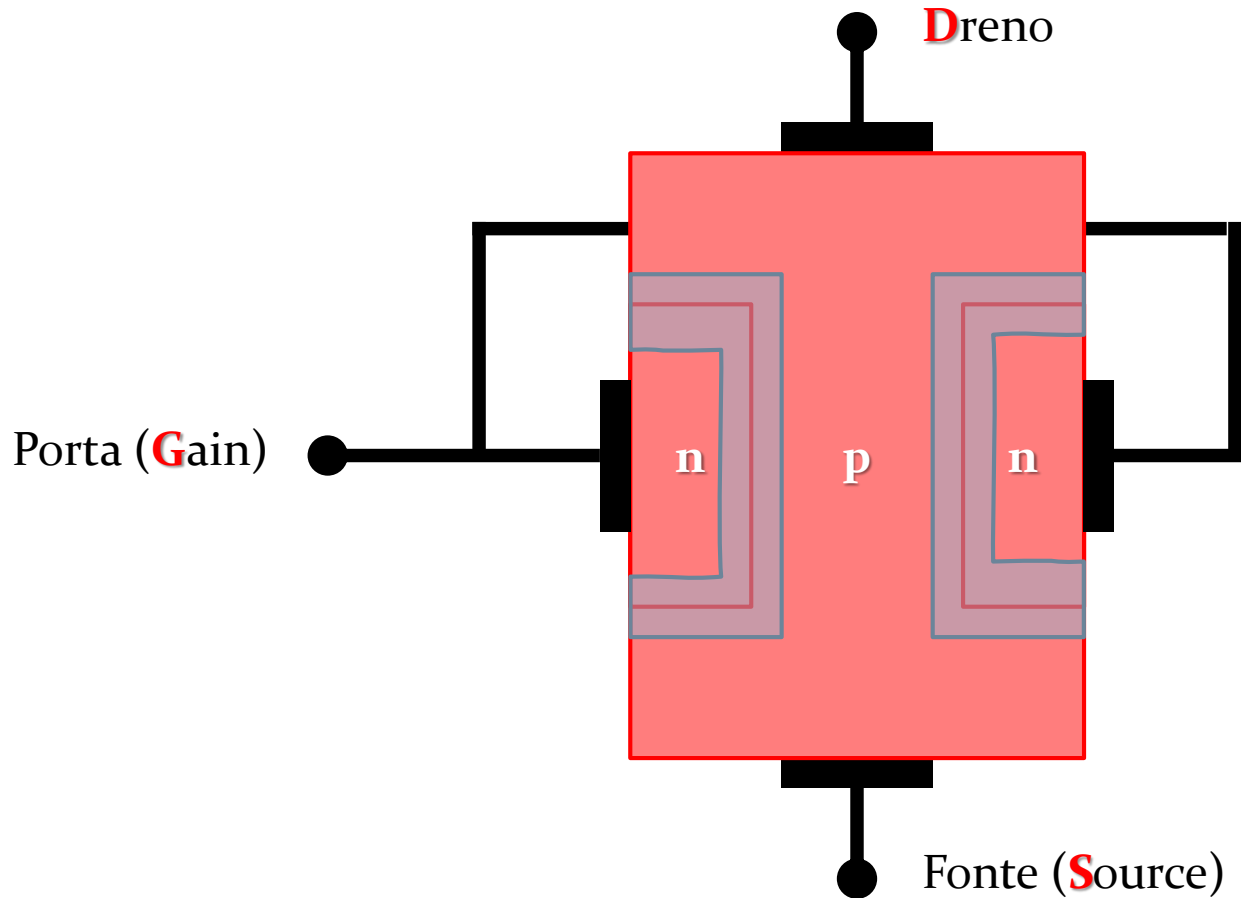
FET

□ Construção (JFET canal n)



FET

□ Construção (JFET canal p)

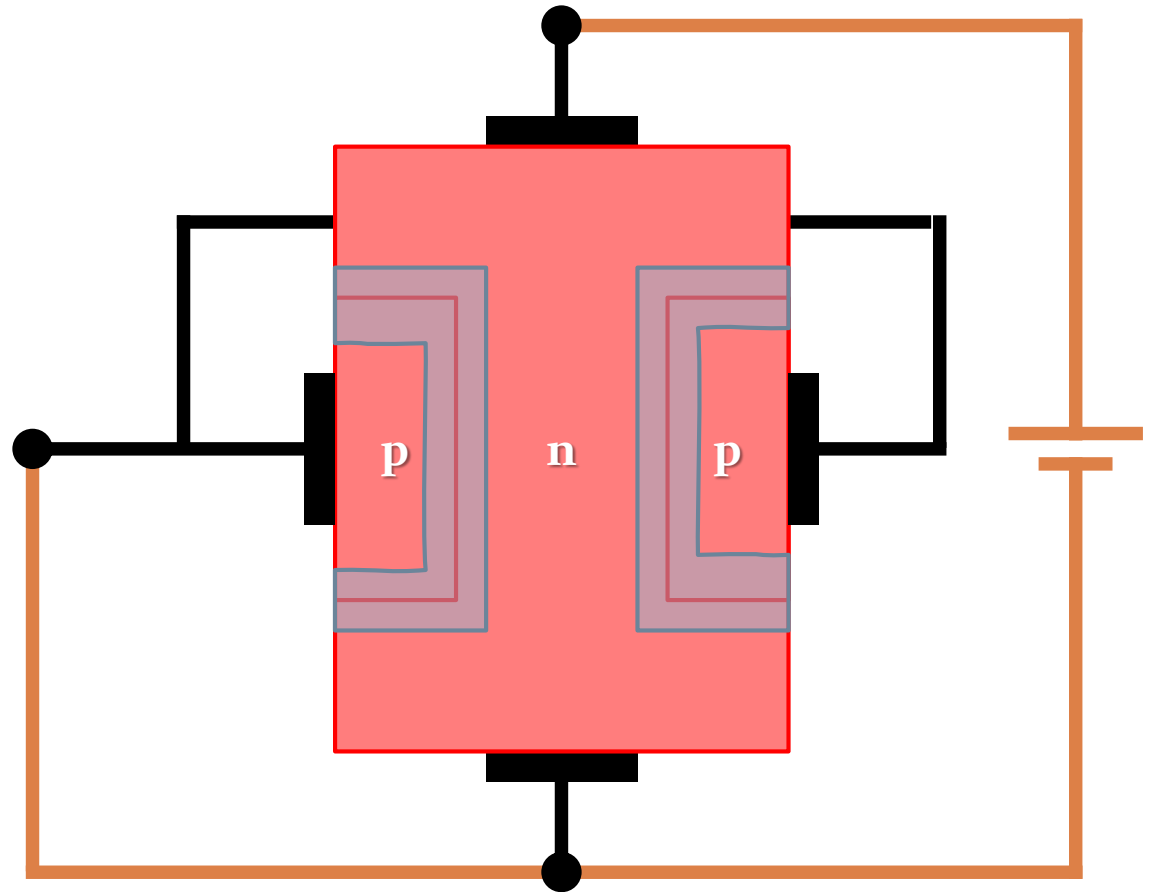


FET

- Construção
 - ▣ Região de depleção
 - Formada pela junção dos materiais p e n
 - Fenômeno idêntico ao dos diodos
 - ▣ DDPs importantes:
 - V_{DS}
 - Tensão entre dreno e fonte
 - V_{GS}
 - Tensão aplicada nas portas e fonte
 - Atente para conexão entre ambas as portas

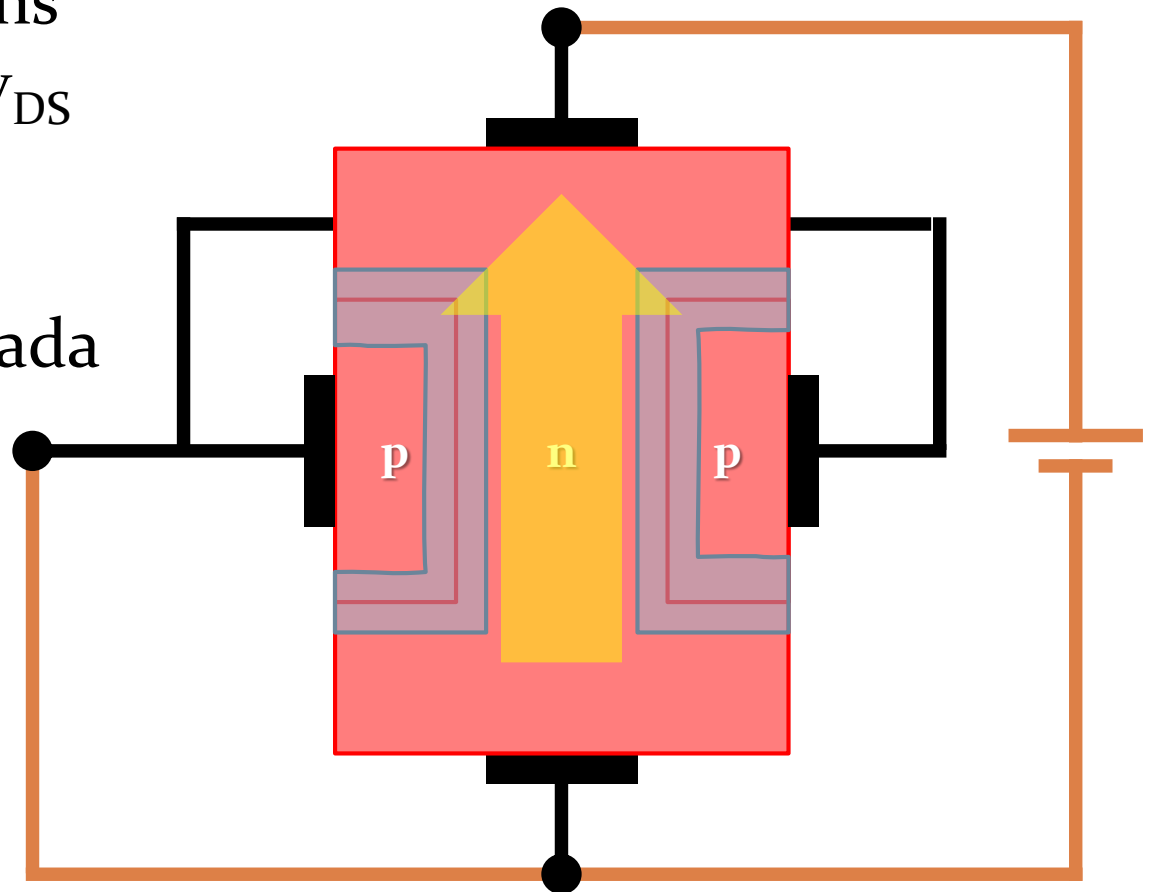
FET

□ $V_{GS} = 0, V_{DS} > 0$



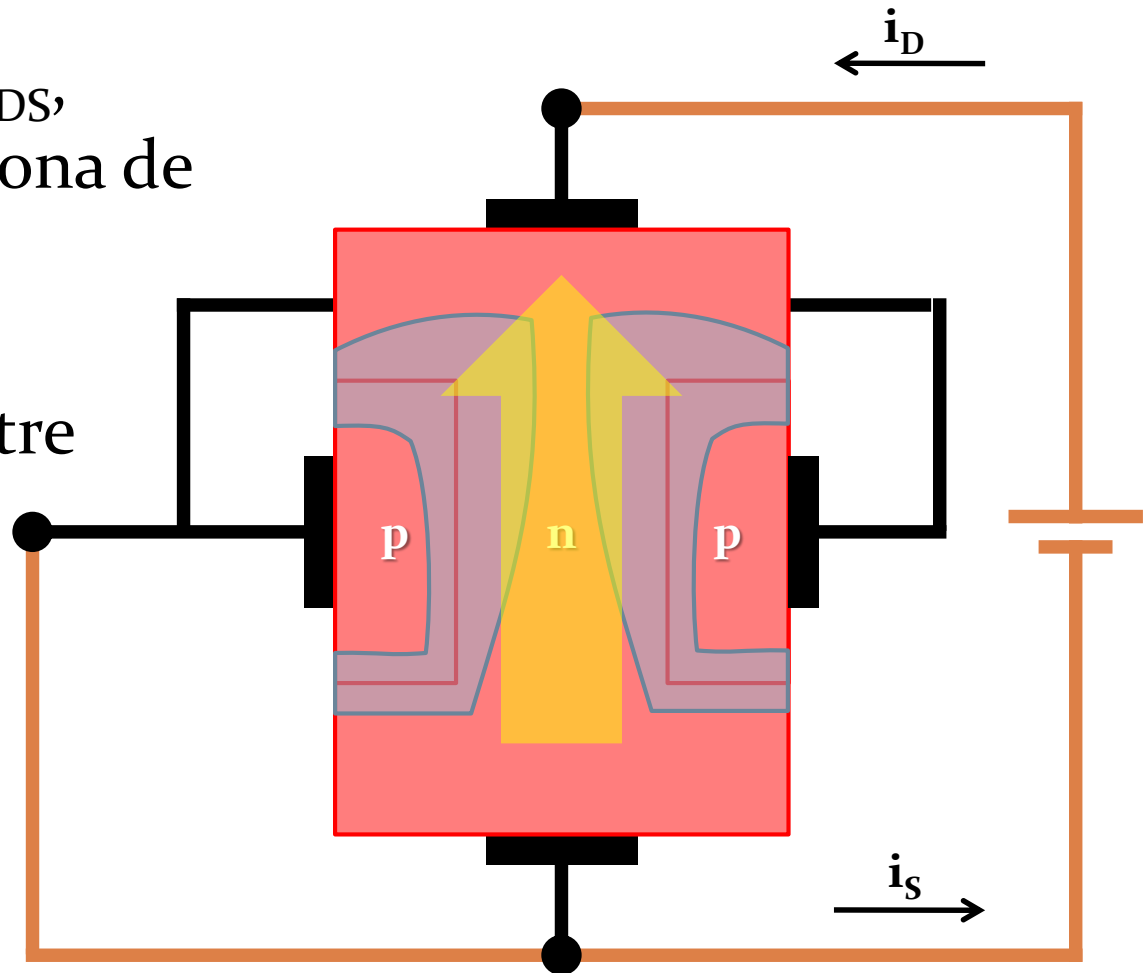
FET

- $V_{GS} = 0, V_{DS} > 0$
 - ▣ Fluxo de elétrons induzidos por v_{DS}
 - sentido real da corrente
 - ▣ **Alteração** forçada da zona de depleção



FET

- $V_{GS} = 0, V_{DS} > 0$
 - ▣ Aumentando v_{DS} , aumenta-se a zona de depleção.
 - ▣ Existe limite? E a corrente entre os nós D e S?



FET

- $V_{GS} = 0, V_{DS} > 0$
 - ▣ Por que a zona de depleção aumenta?

FET

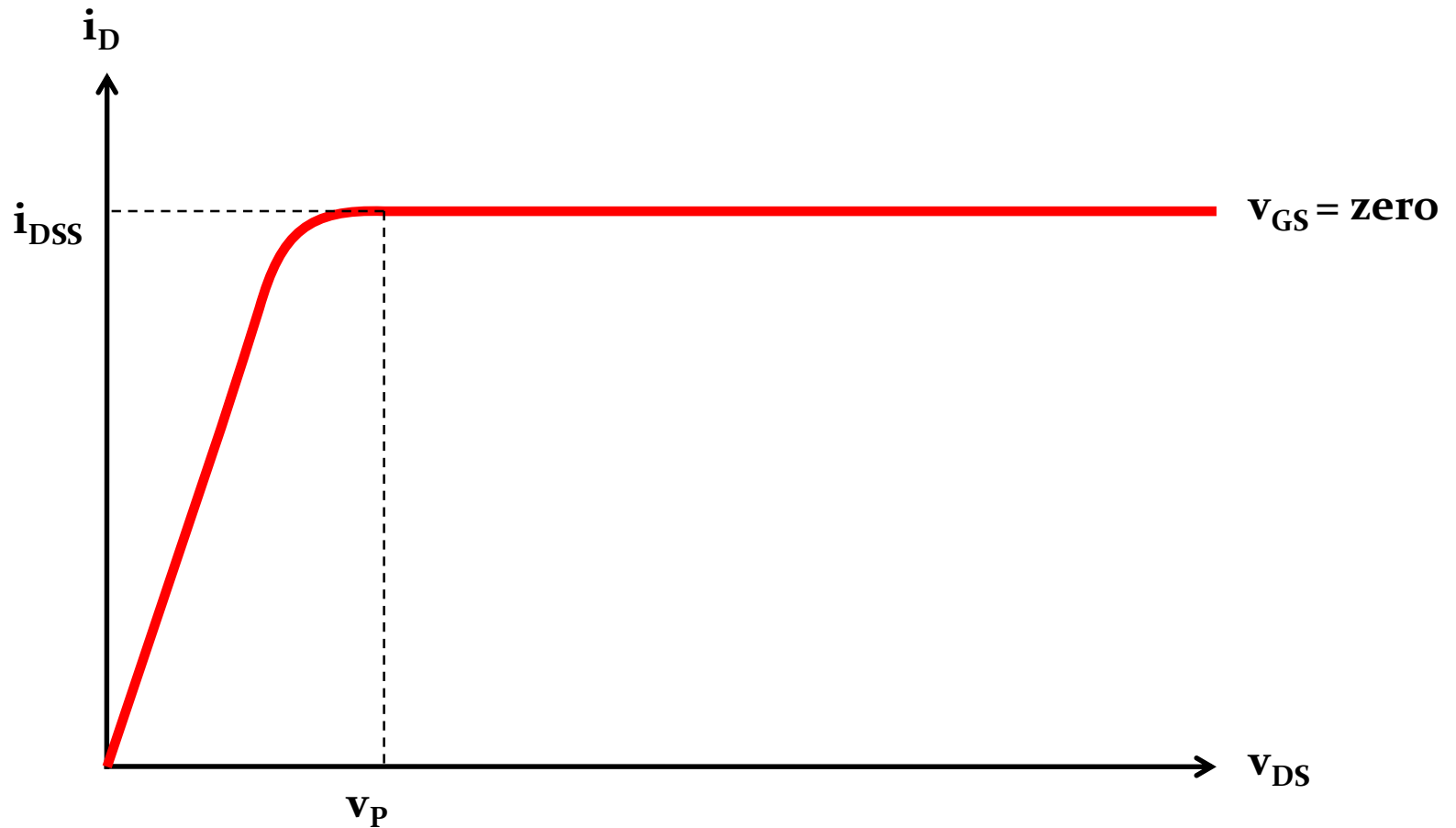
- $V_{GS} = 0, V_{DS} > 0$
 - ▣ Por que a zona de depleção aumenta?
 - Elétrons externos “**cobrem**” as lacunas do material n
 - Tensão da fonte v_{DS}
 - Cobertura propaga-se no sentido real da corrente
 - ▣ Existem regiões de depleção maiores e menores ao longo do FET
 - Orientação **depende** do **sentido real da corrente**
 - Induzidas pelo fluxo de elétrons da fonte externa
 - Distribuição uniforme de resistência “R” no FET

FET

- $V_{GS} = 0, V_{DS} > 0$
 - ▣ Aumento de v_{DS} induz uma resistência no JFET
 - ▣ $i_D = i_S$
 - JFET não altera densidade de fluxo de corrente ($v_G=0$)
 - $i_D = v_{DS} / \text{“R”}$
 - ▣ No limite ($v_{DS} = v_P$)
 - JFET limita densidade de fluxo de corrente ($\text{“R”} = \infty$)
 - Corrente é limitada a $i_D = i_{DSS}$
 - Corrente de **saturação**
 - Corrente do dreno quando porta está em curto
 - Não há estrangulamento de corrente!

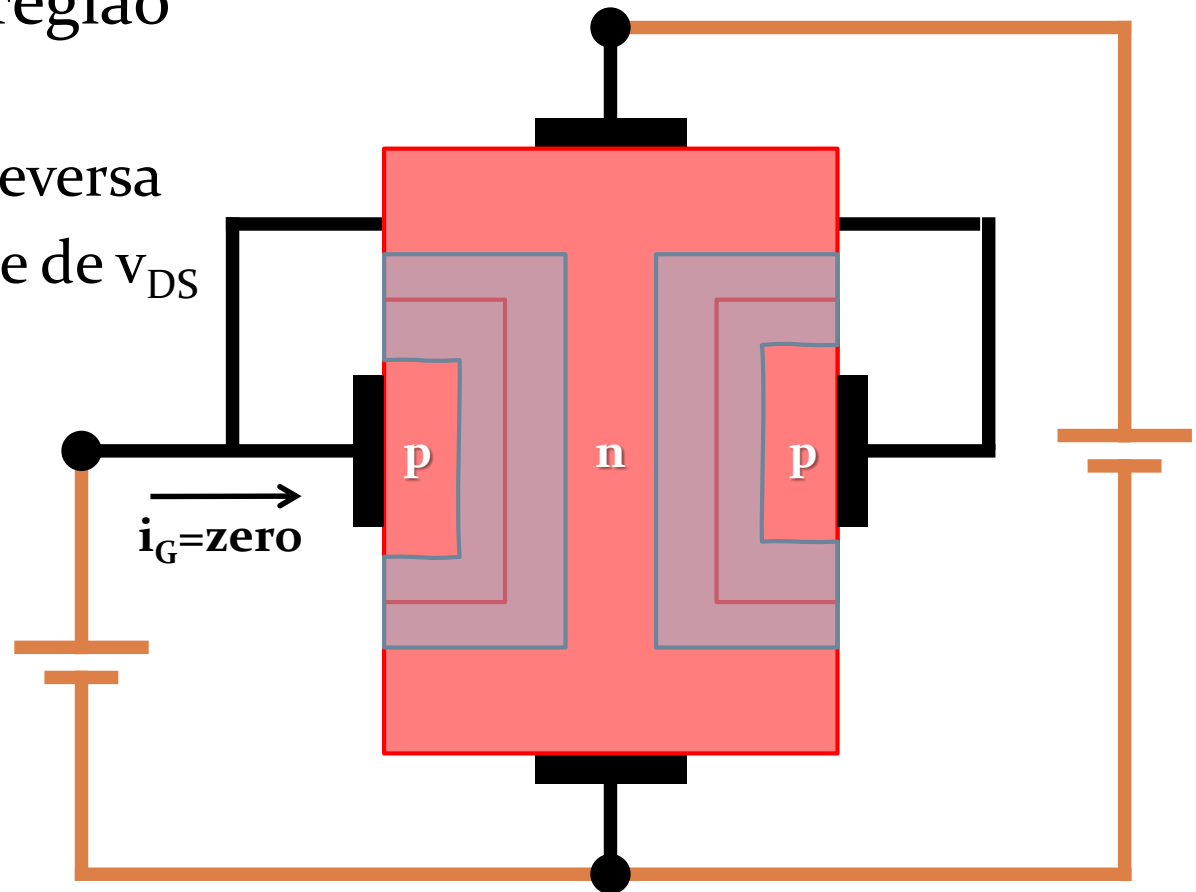
FET

- Curva $i_D \times v_{DS}$



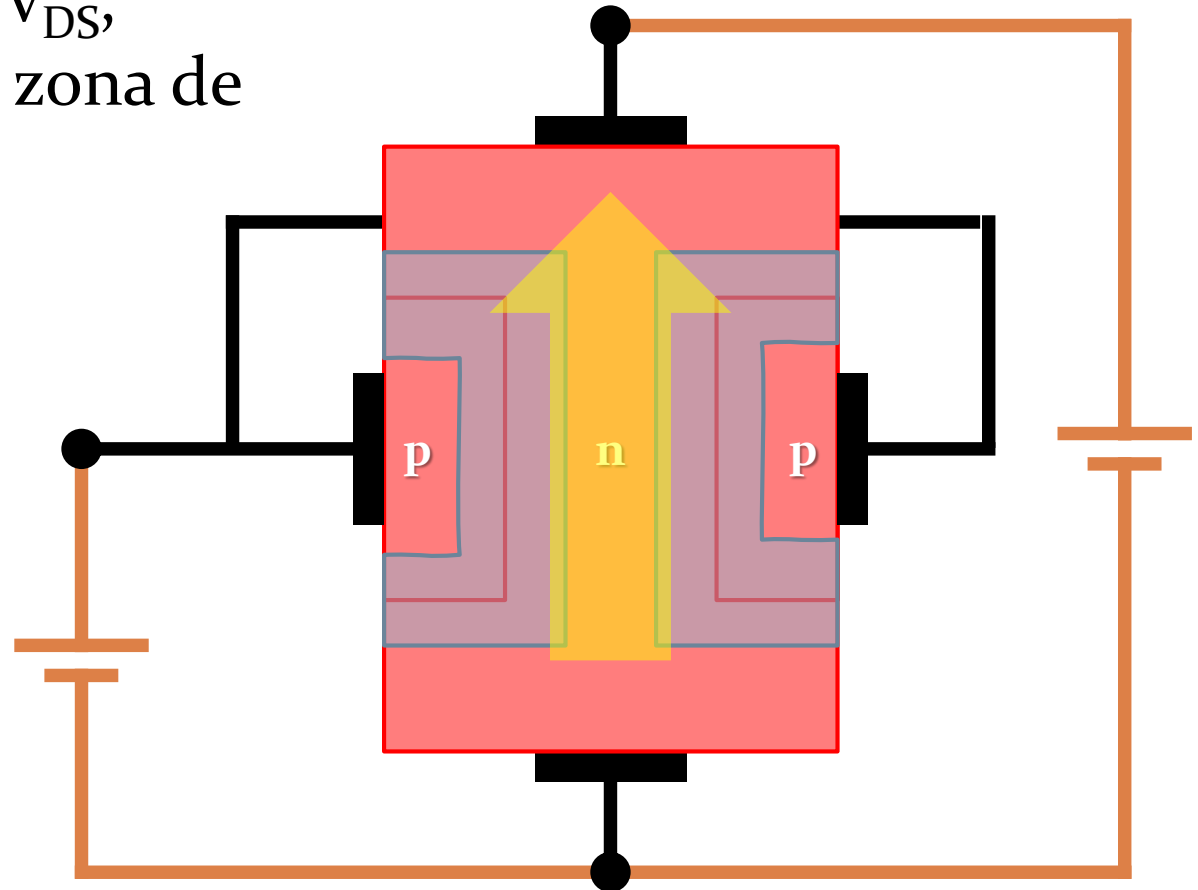
FET

- $V_{GS} < 0, V_{DS} > 0$ (JFET canal n)
 - ▣ V_{DS} aumenta região de depleção
 - Polarização reversa
 - Independente de v_{DS}



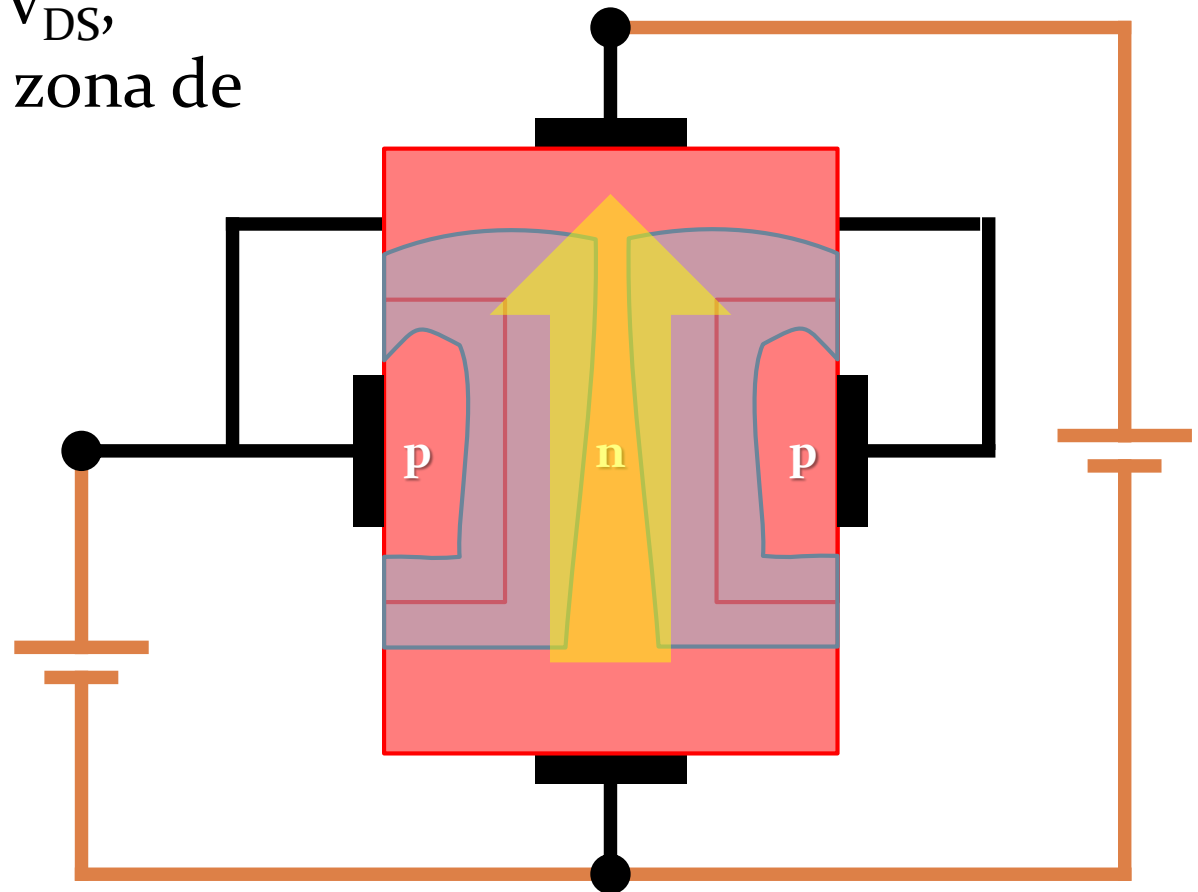
FET

- $V_{GS} < 0$, $V_{DS} > 0$ (JFET canal n)
 - ▣ Aumentando v_{DS} , aumenta-se a zona de depleção



FET

- $V_{GS} < 0$, $V_{DS} > 0$ (JFET canal n)
 - ▣ Aumentando v_{DS} , aumenta-se a zona de depleção

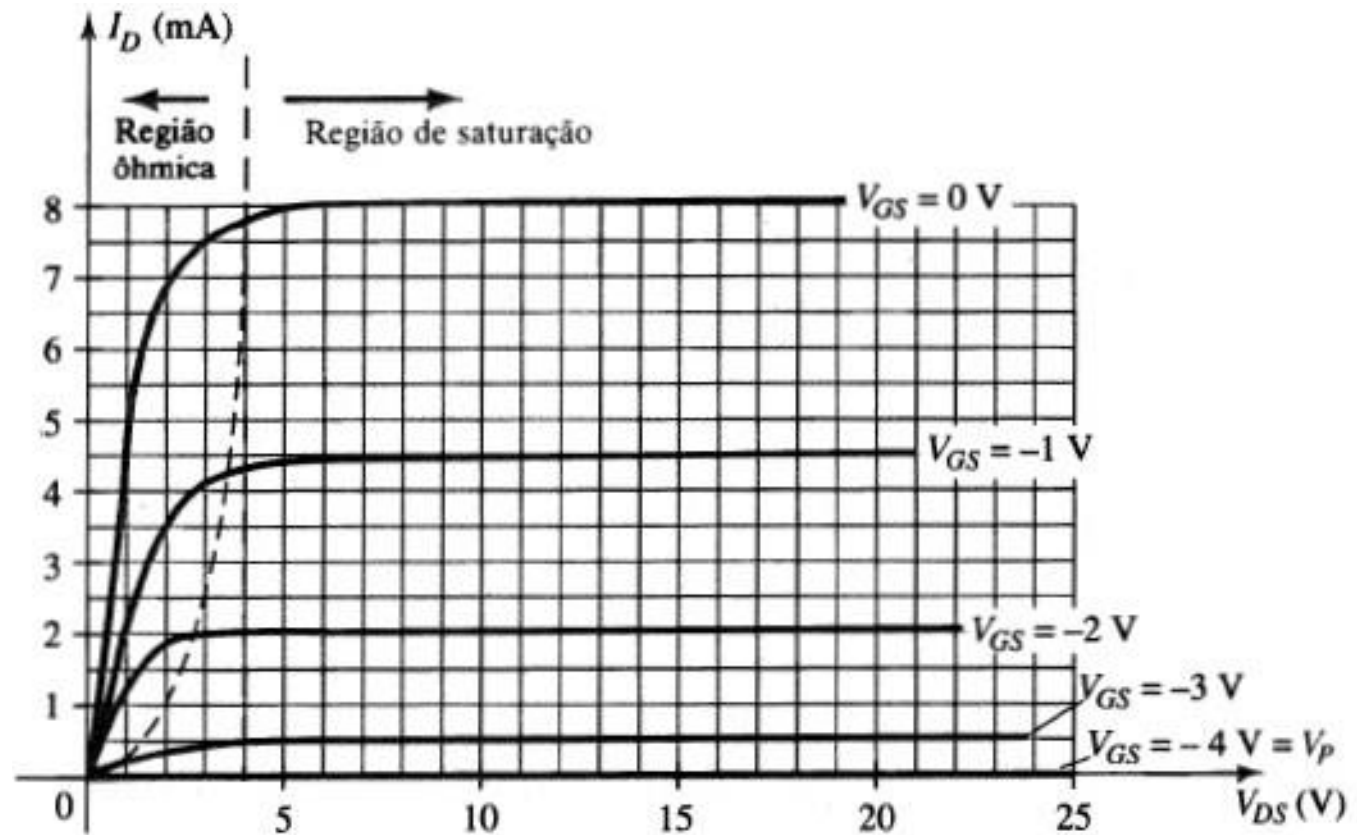


FET

- $V_{GS} < 0, V_{DS} > 0$ (JFET canal n)
 - ▣ Reduzindo v_{GS}
 - Aumentamos zona de depleção nas junções p-n
 - Para $v_{DS} = \text{zero}$
 - Reduzimos v_p
 - Reduzimos i_{DSS}

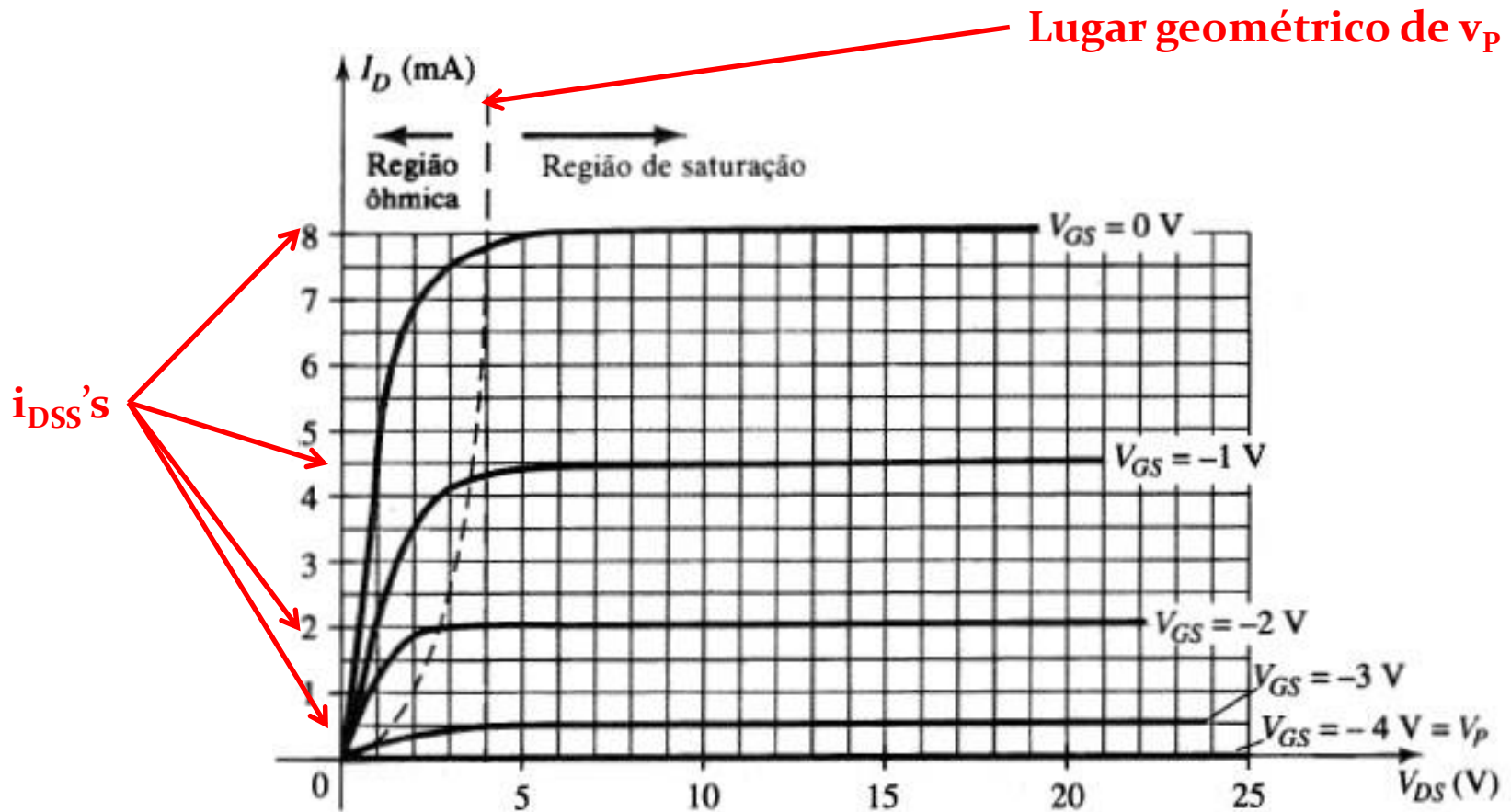
FET

- Curva $i_D \times v_{DS}$ (JFET canal n)



FET

□ Curva $i_D \times v_{DS}$ (JFET canal n)

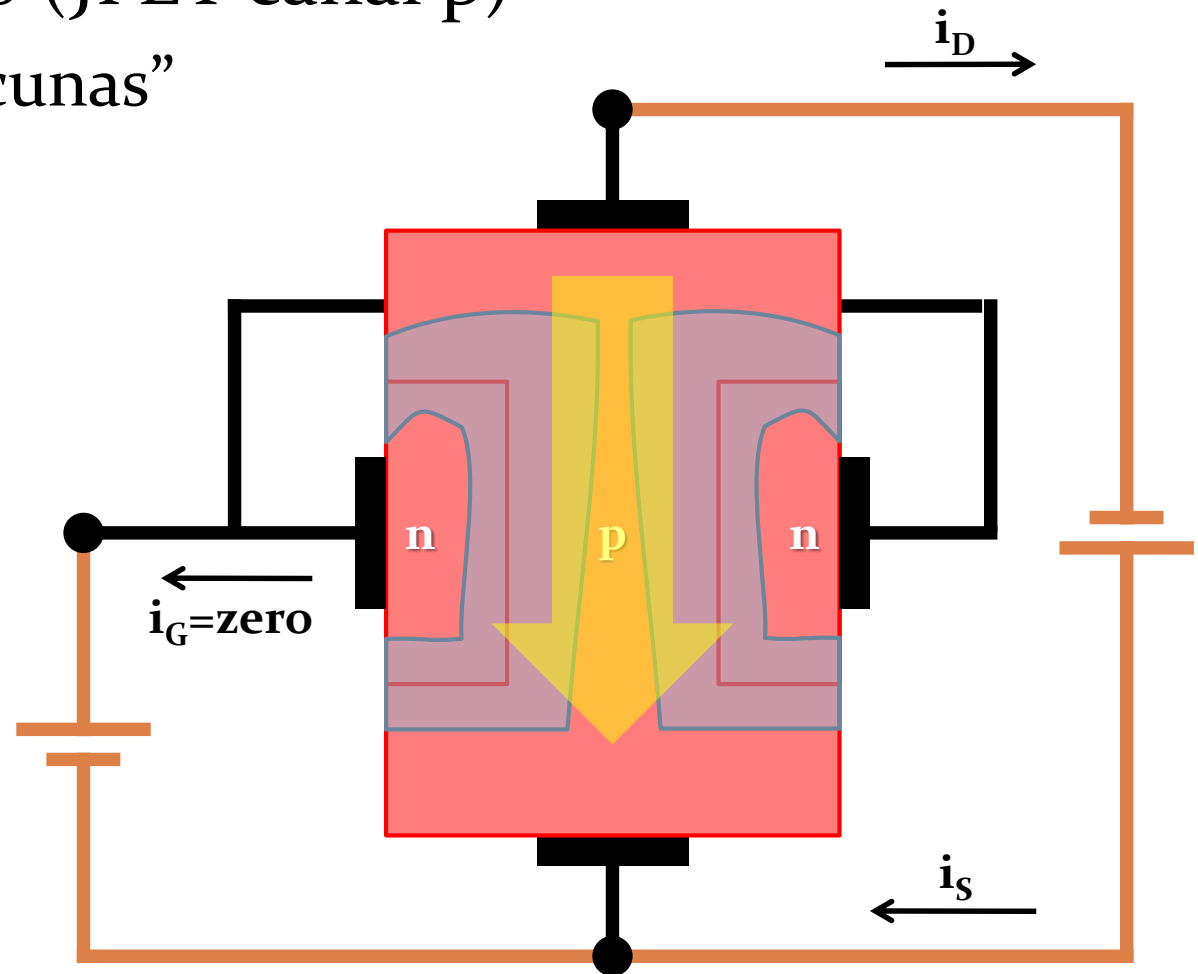


FET

- $V_{GS} < 0, V_{DS} > 0$ (JFET canal n)
 - Quando $V_{GS} = V_{GS-off} = V_P$
 - $i_{DSS} = \text{zero}$
 - FET está desligado
 - À direita do lugar geométrico de v_p
 - Região de saturação do FET
 - FET como **fonte de corrente!**
 - À esquerda do lugar geométrico de v_p
 - Região de amplificação/operação do FET
 - “ $v_{out}(t) = G v_{in}(t)$ ”

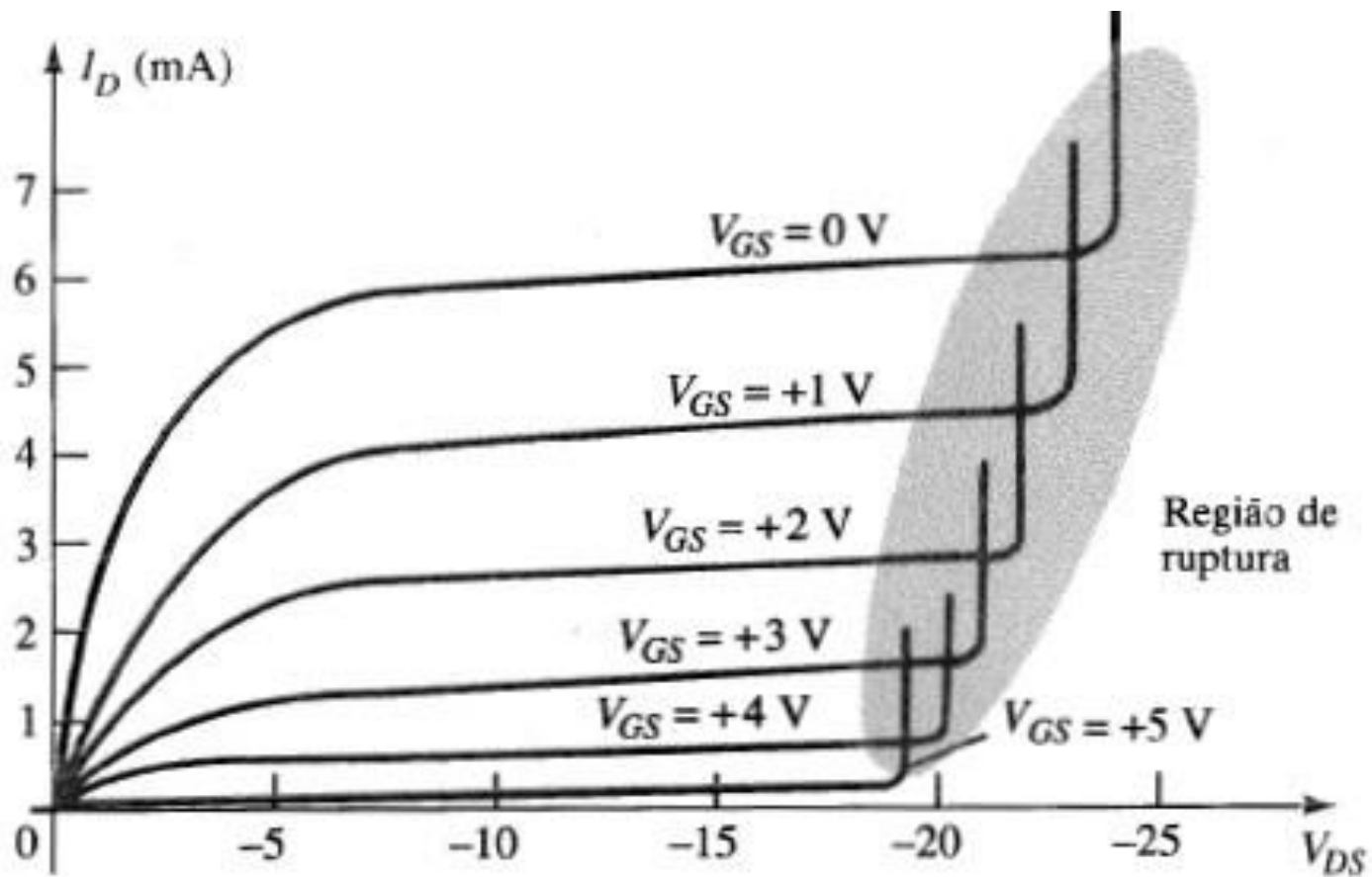
FET

- $V_{GS} > 0$, $V_{DS} > 0$ (JFET canal p)
 - ▣ Fluxo das “lacunas”



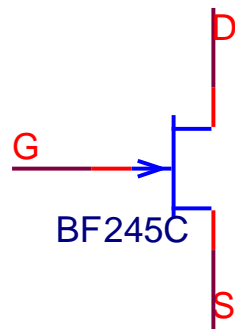
FET

- Curva $i_D \times v_{DS}$ (JFET canal p)

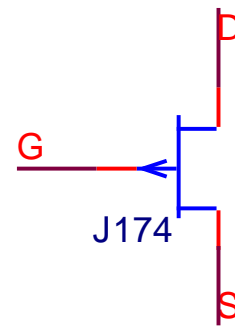


FET

□ Símbolos para JFET



Material N



Material P

FET

Comportamentos do JFET

$V_{GG} = \text{zero}$

$i_D = i_{DSS}$ se $v_{DD} > |V_P|$

$|V_{GG}| \geq |V_P|$

$i_D = \text{zero}$

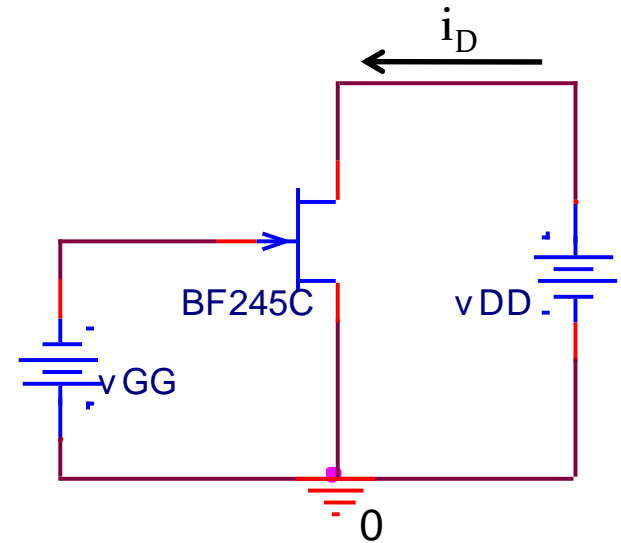
■ Independente de v_{DD}

■ Situação de corte na saída

$|V_P| \geq |V_{GG}| \geq \text{zero}$

$0 \leq i_D \leq i_{DSS}$

Importante para o circuito atual: $V_{GG} = -V_{GS}$



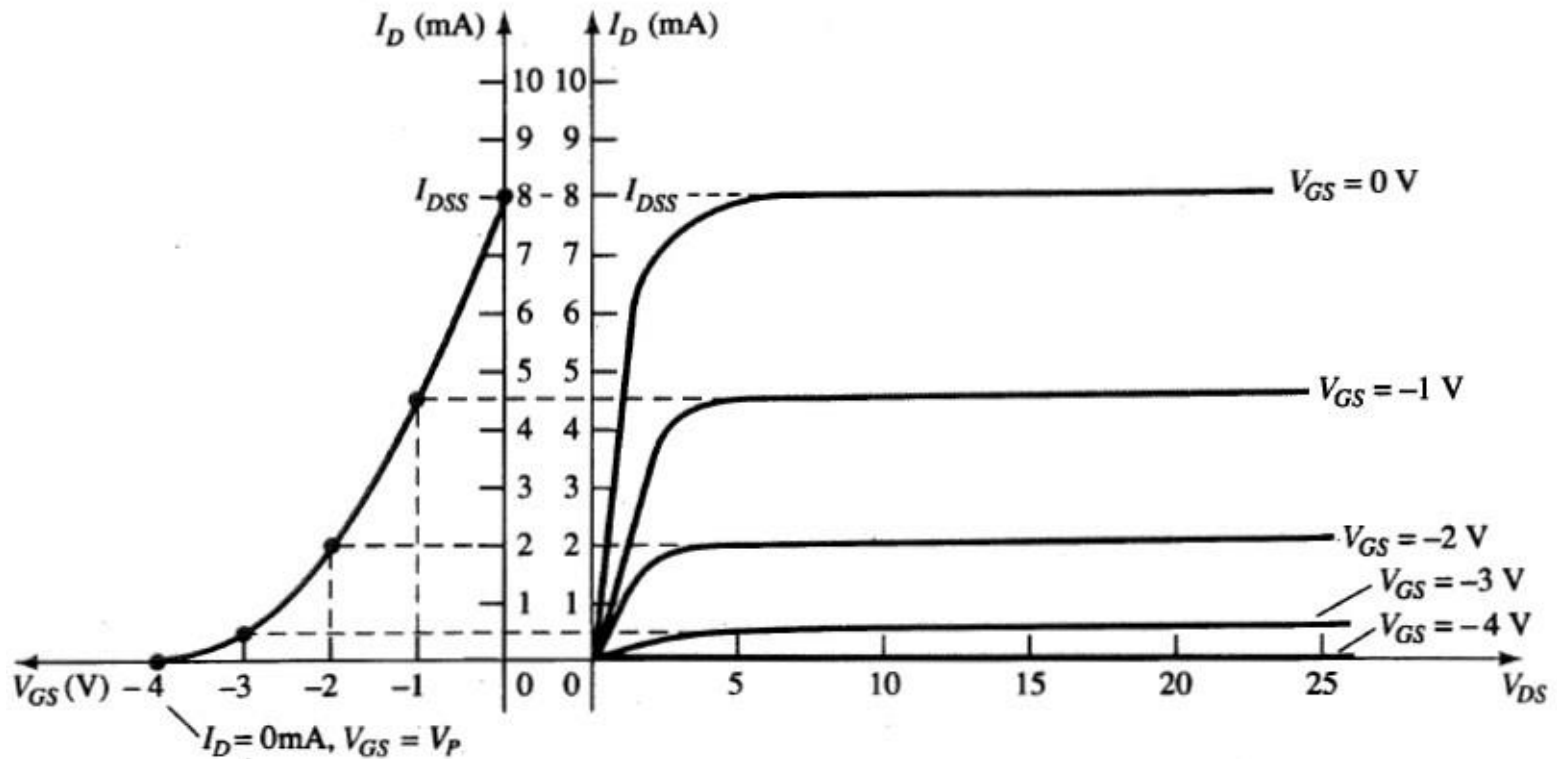
FET

- Comportamento do JFET
 - $i_D = i_{DSS} [1 - (v_{GS}/v_P)]^2$
 - $v_{GS} = v_P [1 - (i_D/i_{DSS})^{1/2}]$
 - i_{DSS} e v_P – dados do fabricante
 - Equações são as mesmas
 - Uso dependente da necessidade

FET

Comportamento do JFET

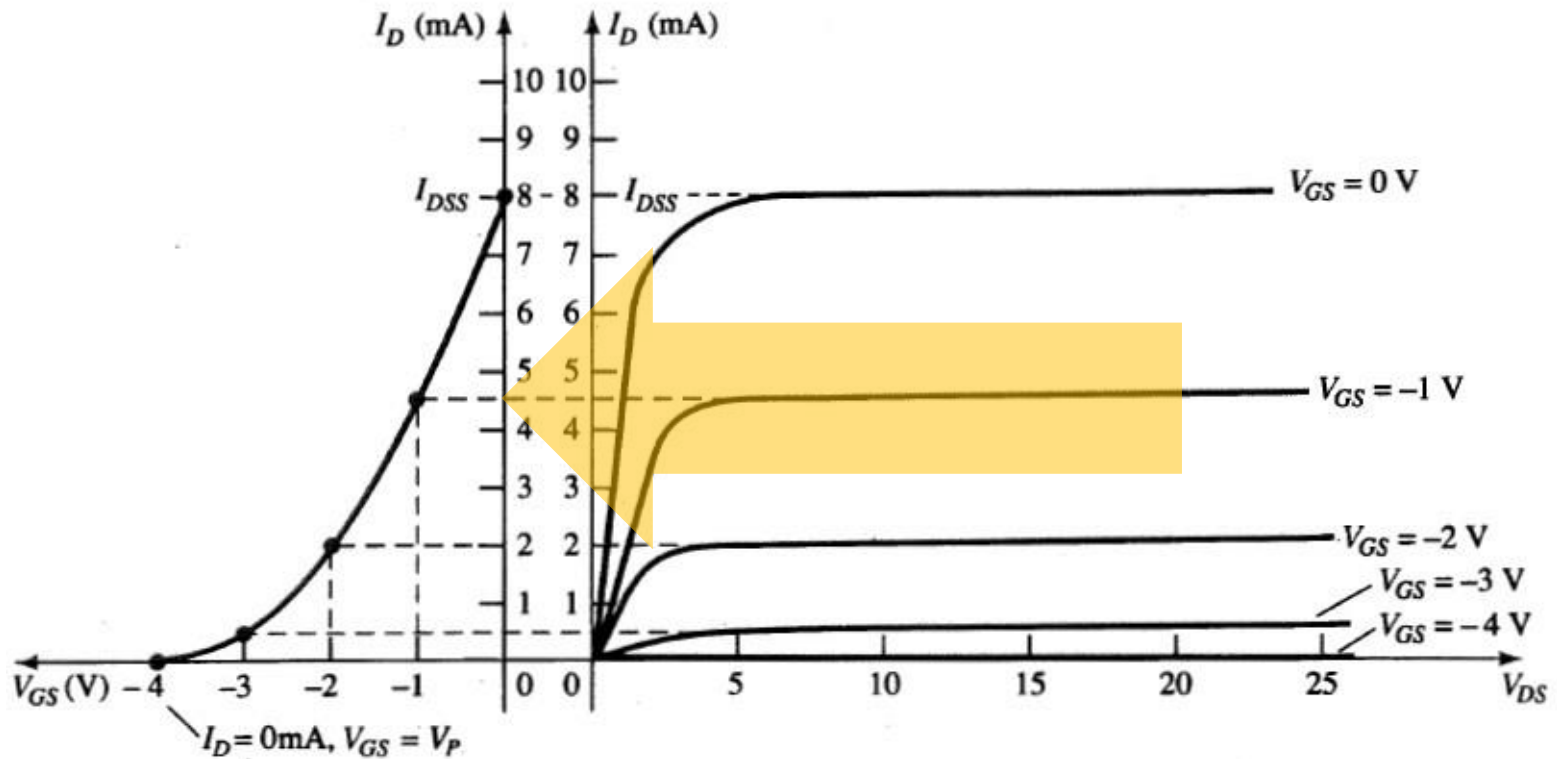
- Para obter $i_D \times v_{GS}$ a partir de $i_D \times v_{DS}$



FET

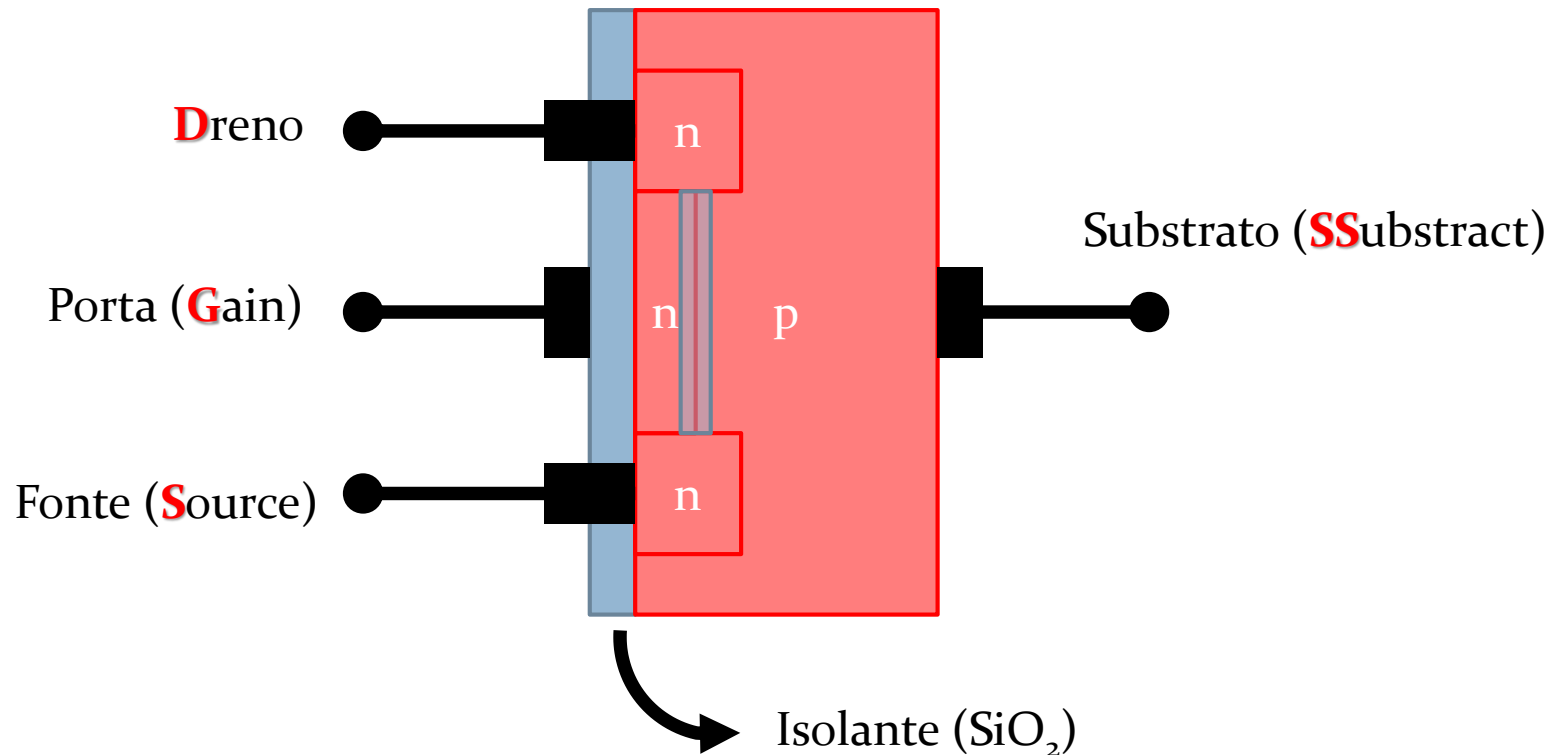
Comportamento do JFET

- Para obter $i_D \times v_{GS}$ a partir de $i_D \times v_{DS}$



FET

□ Construção (MOSFET depleção do tipo n)

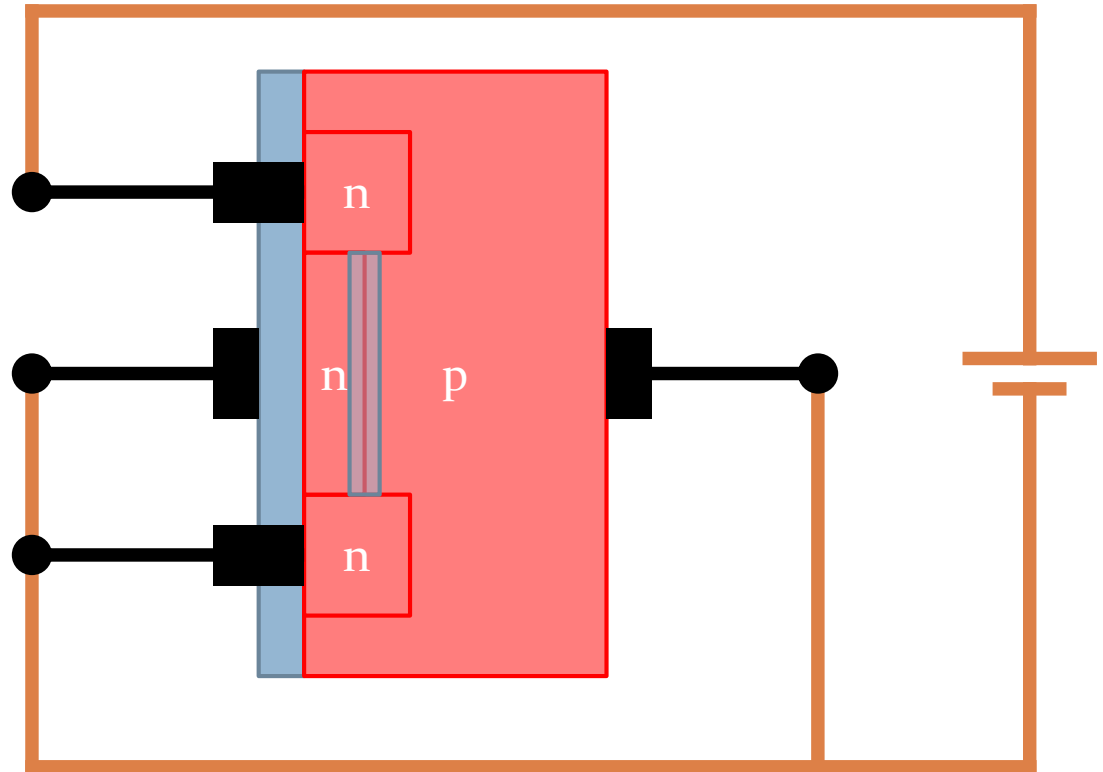


FET

- Construção (MOSFET depleção do tipo n)
 - Região isolante (SiO_2)
 - Daí o nome de “óxido”
 - O nome “metal” vêm dos contatos metálicos
 - “Corpo” formado de material p
 - “Canal” formado de material n
 - **Não há contato** entre porta (G) e canal

FET

- Construção (MOSFET depleção do tipo n)
 - $V_{DS} > 0$, $V_{GS} = 0$

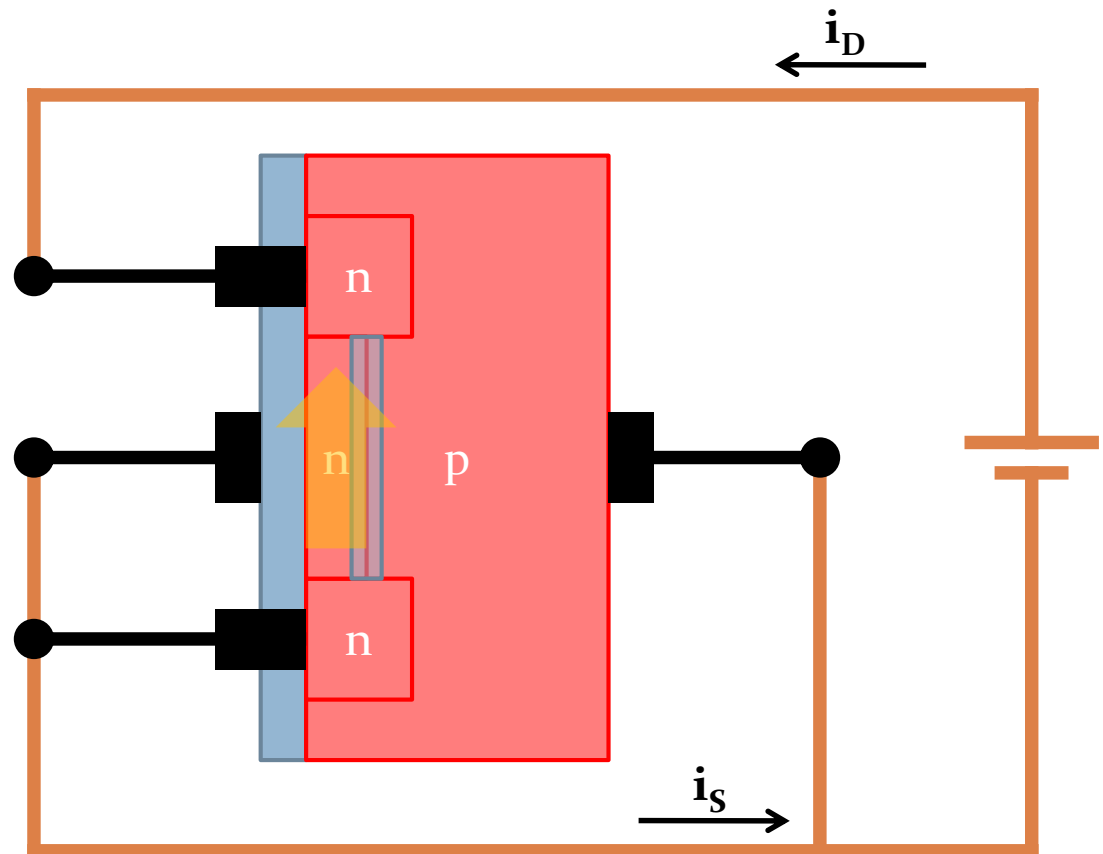


FET

□ Construção (MOSFET depleção do tipo n)

□ $V_{DS} > 0, V_{GS} = 0$

- Corrente flui pelo canal de material n
- $i_D = i_S$
- Pode atingir i_{DSS}
 - Como no JFET

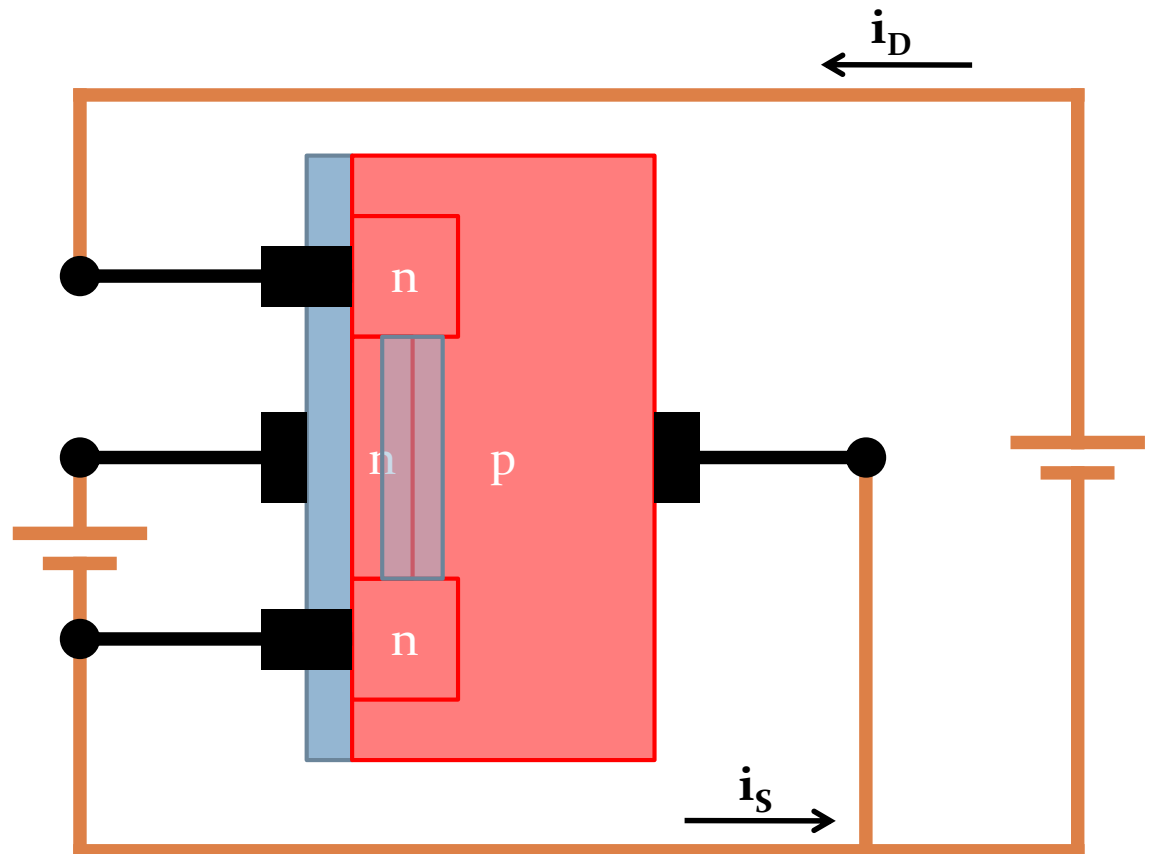


FET

□ Construção (MOSFET depleção do tipo n)

□ $V_{DS} > 0, V_{GS} < 0$

- Redução da corrente no canal.



FET

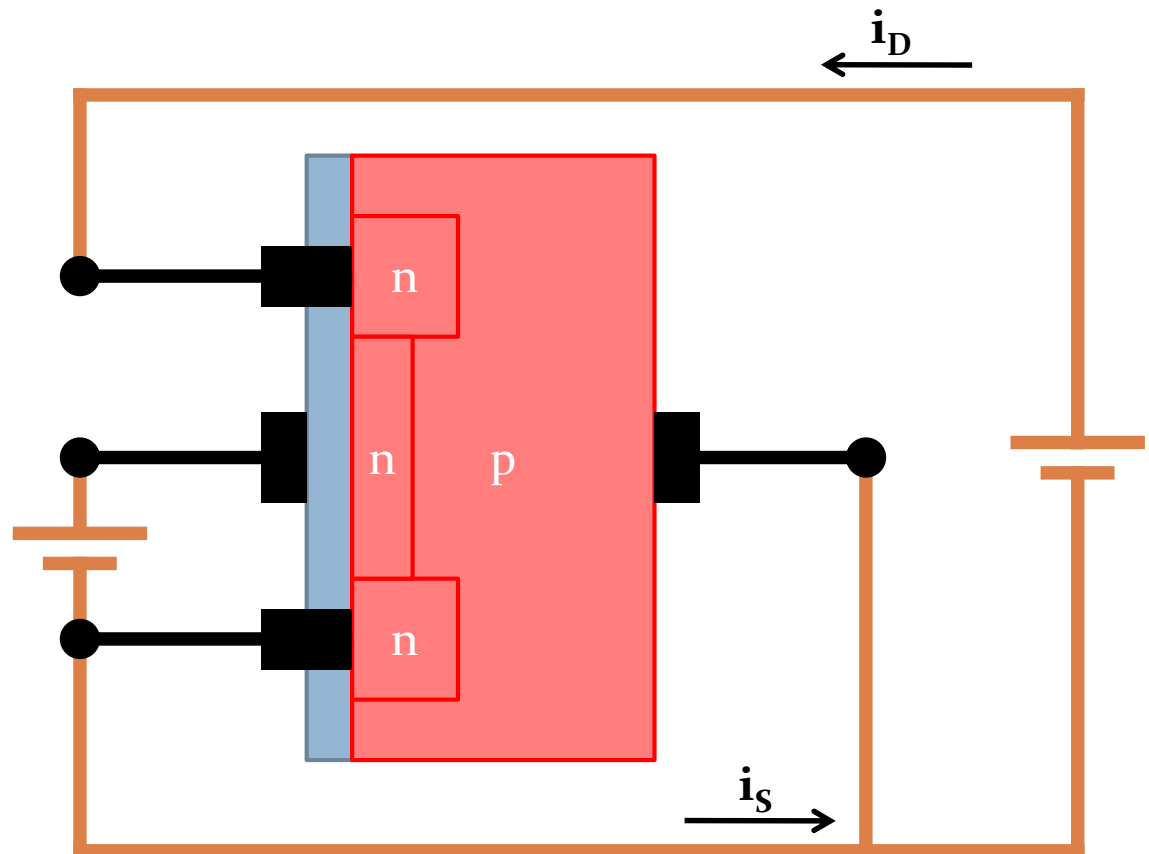
- Construção (MOSFET depleção do tipo n)
 - $V_{DS} > 0, V_{GS} < 0$
 - Tensão negativa na porta **induz** aumento de zona de depleção na região do canal
 - Efeito de campo
 - Importante: **não há contato** entre porta e canal
 - Redução da corrente de elétrons no canal
 - Corrente real, até o estrangulamento
 - Como no JFET

FET

□ Construção (MOSFET depleção do tipo n)

□ $V_{DS} > 0, V_{GS} > 0$

- Aumento da corrente no canal.



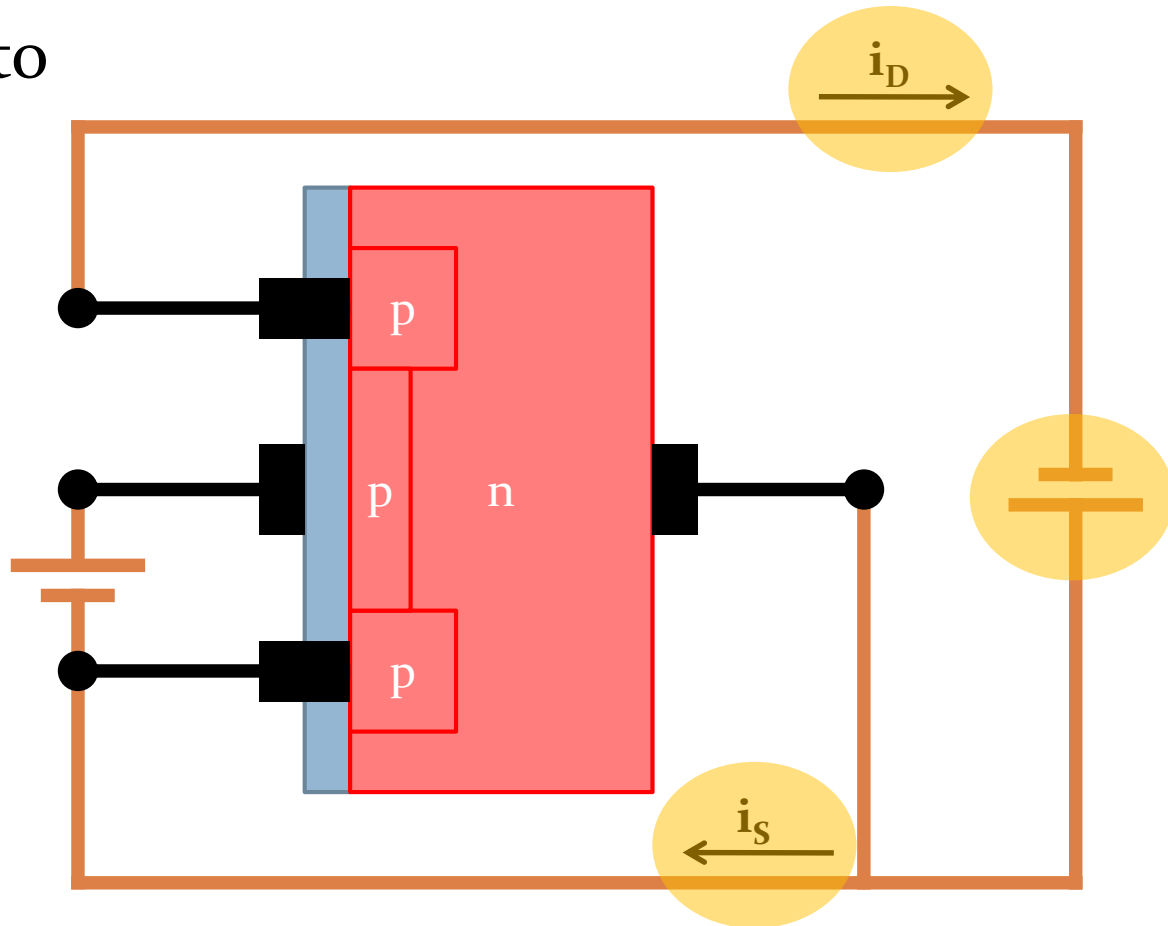
FET

- Construção (MOSFET depleção do tipo n)
 - $V_{DS} > 0, V_{GS} > 0$
 - Aumento da corrente de elétrons no canal
 - Elétrons adicionais são “roubados” dos portadores minoritários presentes no corpo – material p
 - Exige cuidado para não destruir o componente
 - $i_D > i_{DSS}$
 - Intensificação da corrente no canal

FET

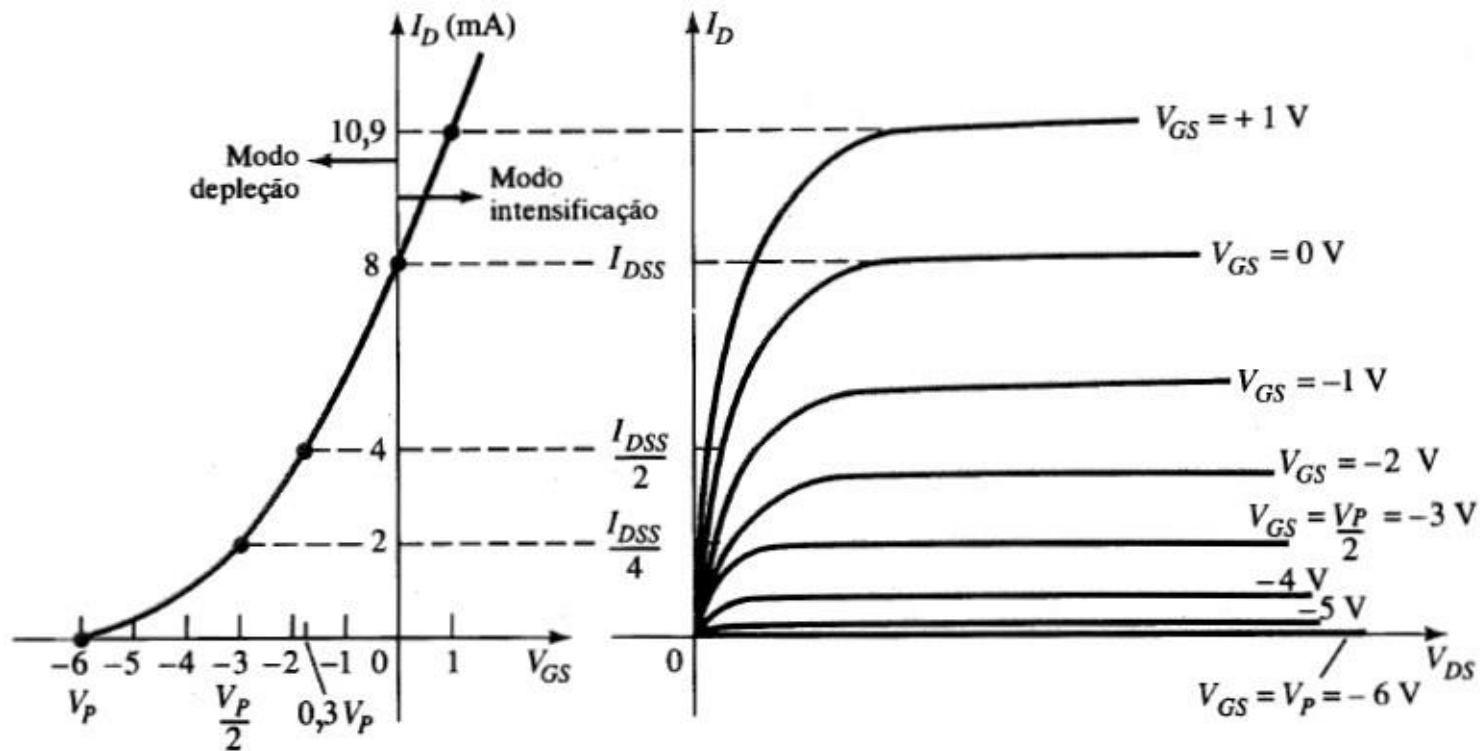
- Construção (MOSFET depleção do tipo p)

- Comportamento análogo ao MOSFET por depleção do tipo p



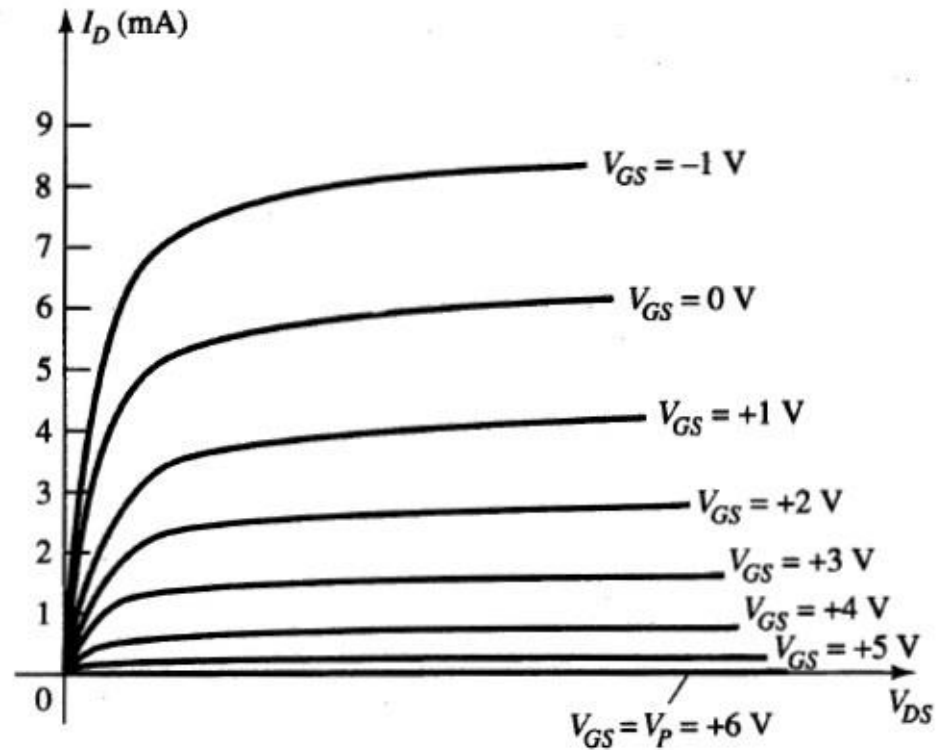
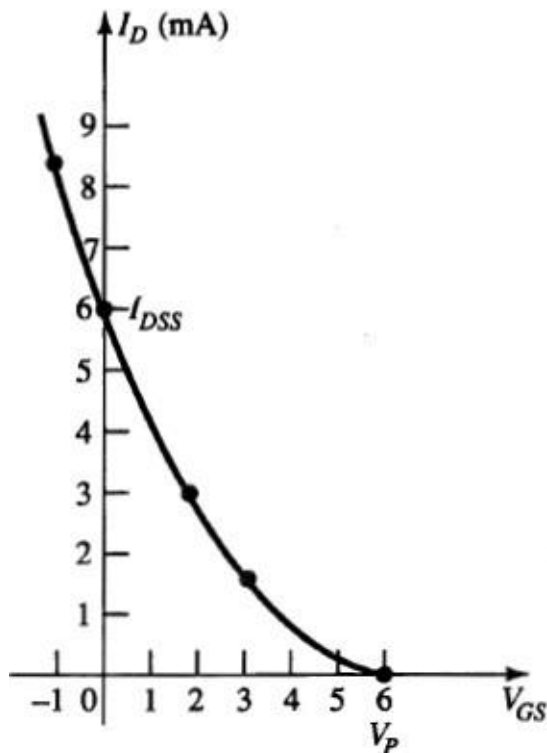
FET

- Comportamento (MOSFET depleção tipo n)



FET

- Comportamento (MOSFET depleção tipo p)

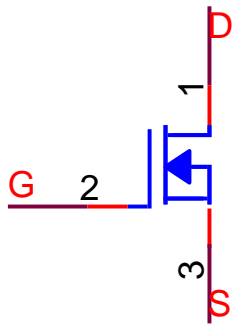


FET

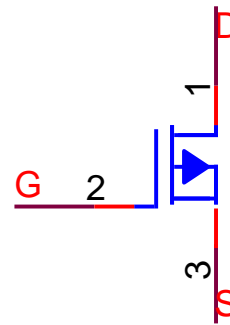
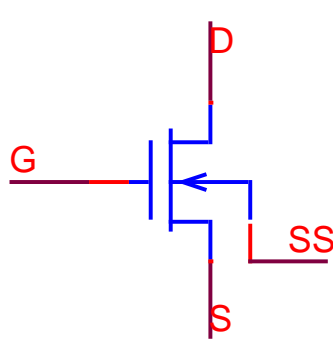
- Comportamento (MOSFET depleção)
 - Mesmas já vistas anteriormente
 - $i_D = i_{DSS} [1 - (v_{GS}/v_P)]^2$
 - $v_{GS} = v_P [1 - (i_D/i_{DSS})^{1/2}]$
 - i_{DSS} e v_P – dados do fabricante

FET

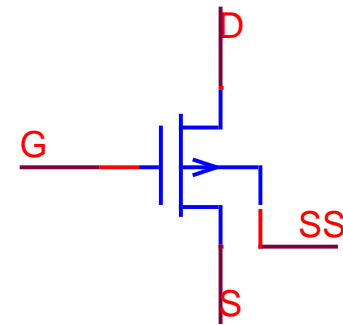
□ Símbolos para MOSFET por depleção



Material N



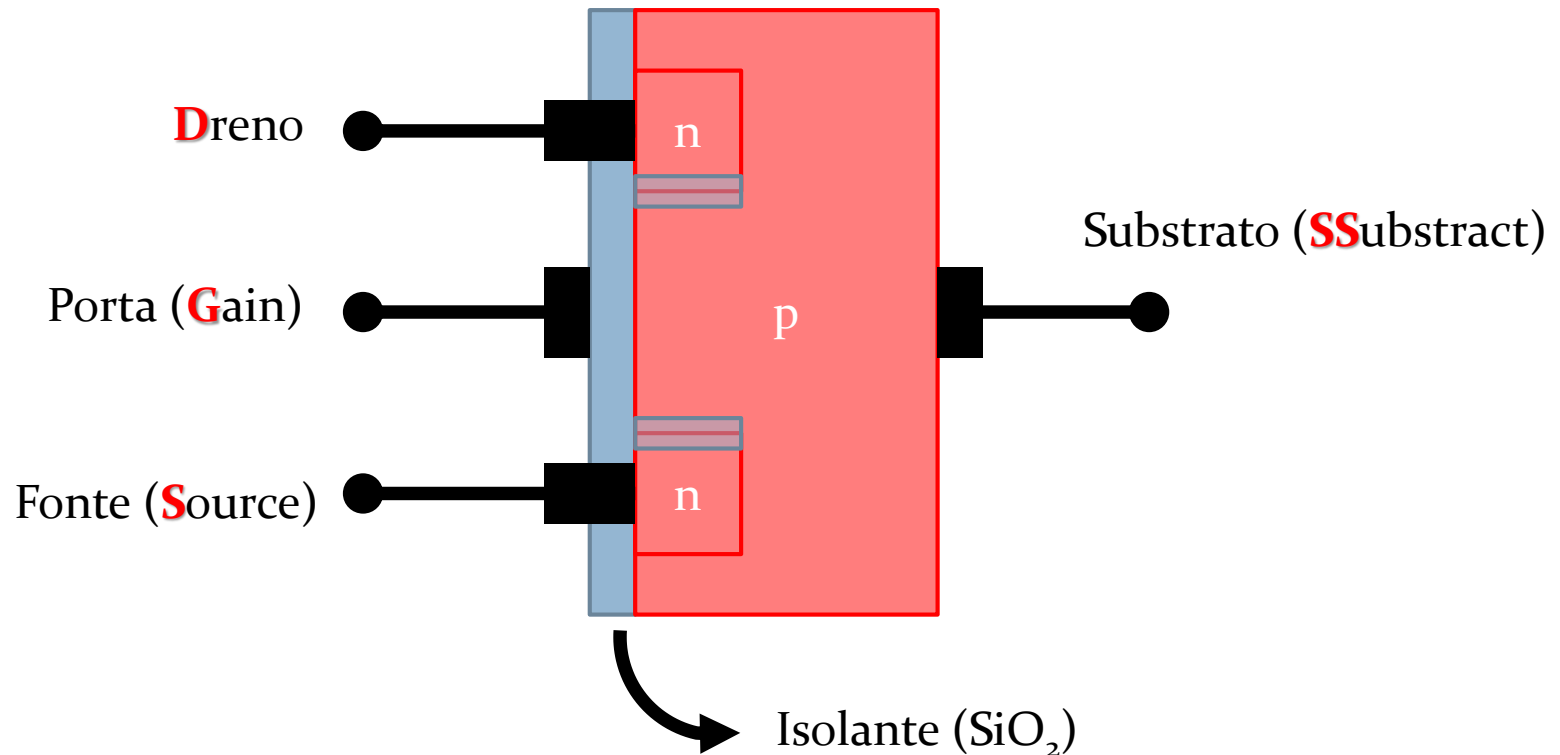
Material P



- Atente para a ligação do substrato com a fonte.

FET

- Construção (MOSFET por intensificação n)



FET

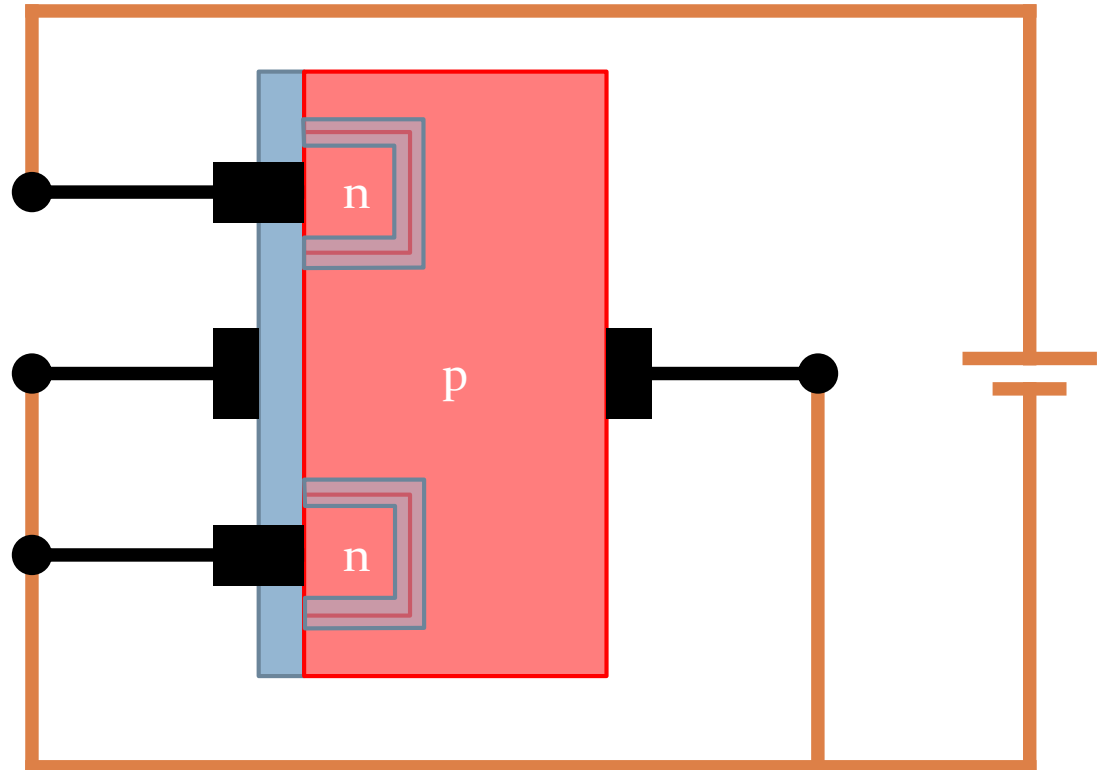
- Construção (MOSFET por intensificação n)
 - Região isolante (SiO_2)
 - Daí o nome de “óxido”
 - O nome “metal” vêm dos contatos metálicos
 - “Corpo” formado de material p
 - **Não há canal**
 - **Não há contato** entre porta (G) e o “corpo”

FET

□ Construção (MOSFET por intensificação n)

□ $V_{DS} > 0, V_{GS} = 0$

- Não há corrente fluindo através do dreno e da fonte.
- Polarização reversa impede duplamente tal corrente.

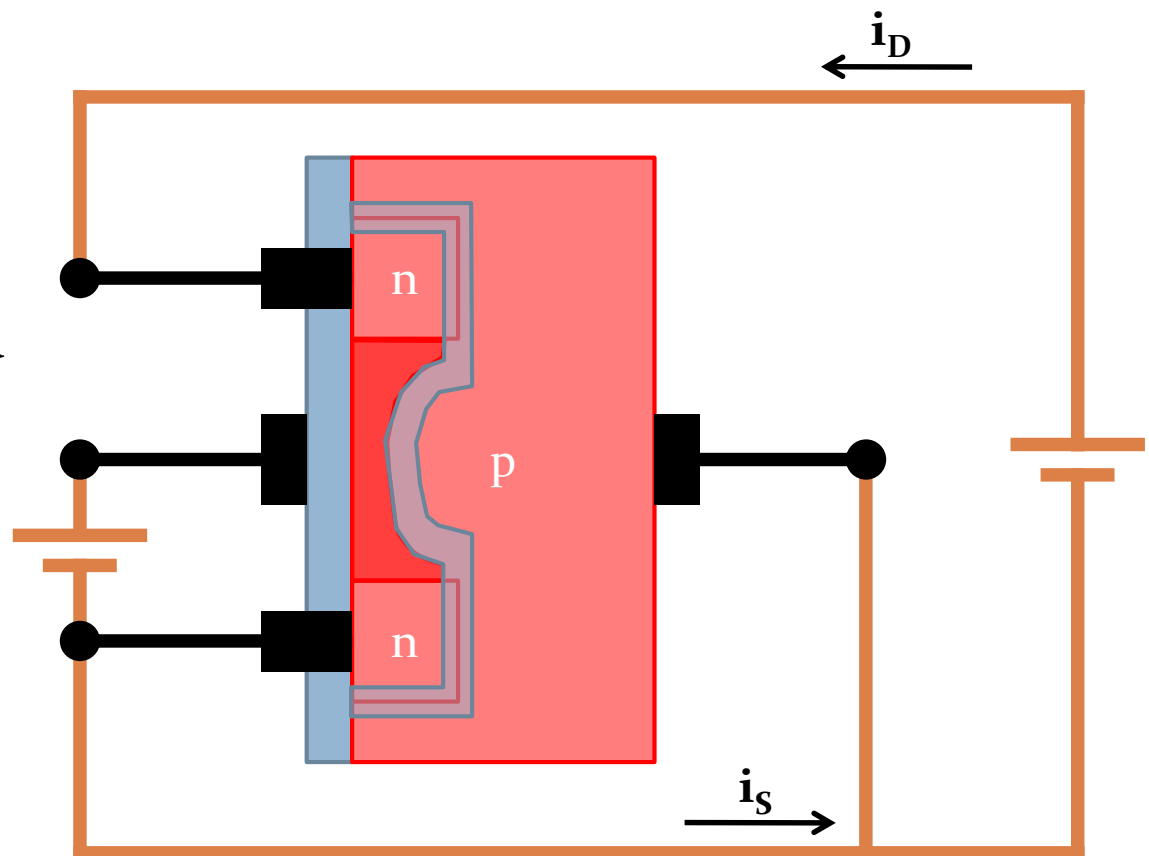


FET

□ Construção (MOSFET por intensificação n)

□ $V_{DS} > 0, V_{GS} > 0$

- Indução de caminho de elétrons na região da porta



FET

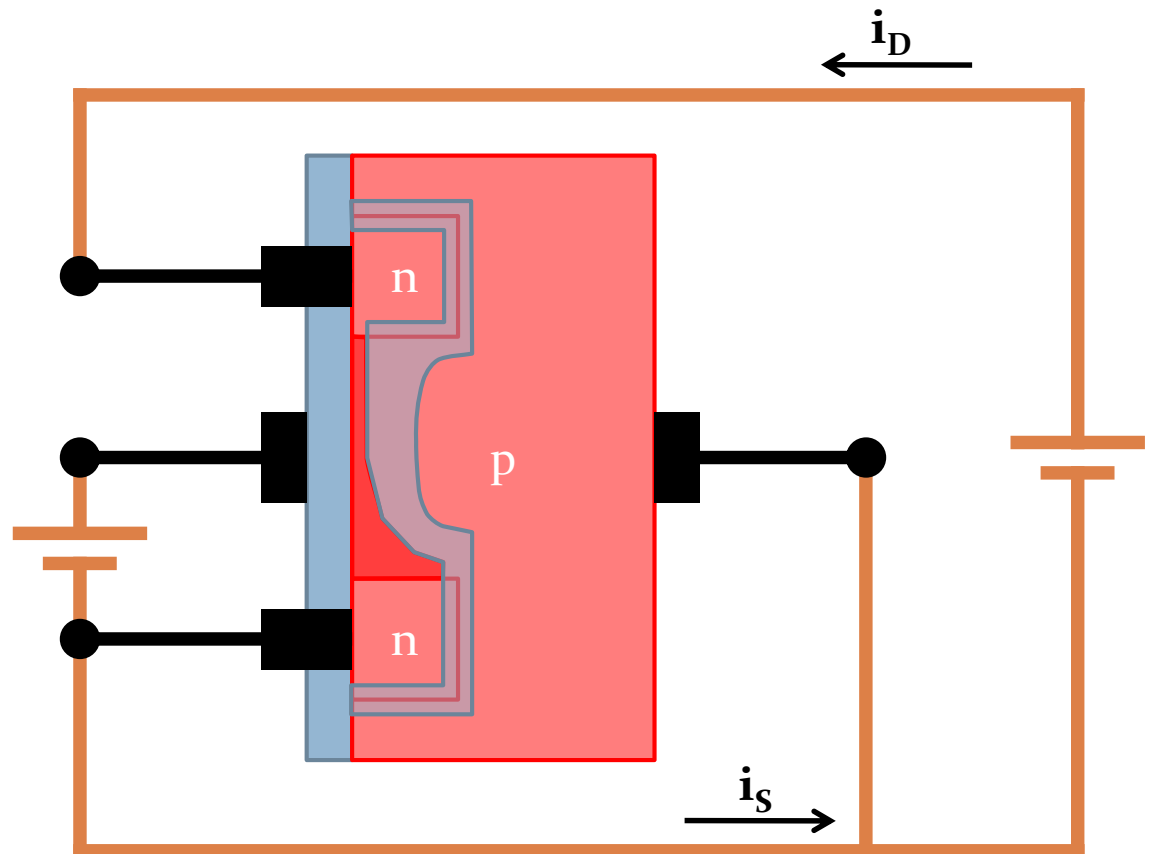
- Construção (MOSFET por intensificação n)
 - Potencial v_{GS} repele “lacunas” do corpo
 - Aquelas próximas do isolante SiO_2
 - Indução de zona de depleção nessa região
 - Potencial v_{GS} atrai elétrons do corpo
 - Elétrons de material p = portadores minoritários
 - Formação de caminho/canal
 - Agora há um condutor para circulação de corrente
 - v_{GS} controla “vazão” do canal induzido
 - $v_{GS} > v_T$ (tensão de limiar) para haver corrente

FET

□ Construção (MOSFET por intensificação n)

□ $V_{DS} > 0, V_{GS} > 0$

- Aumento de V_{DS} reduz corrente no canal virtual

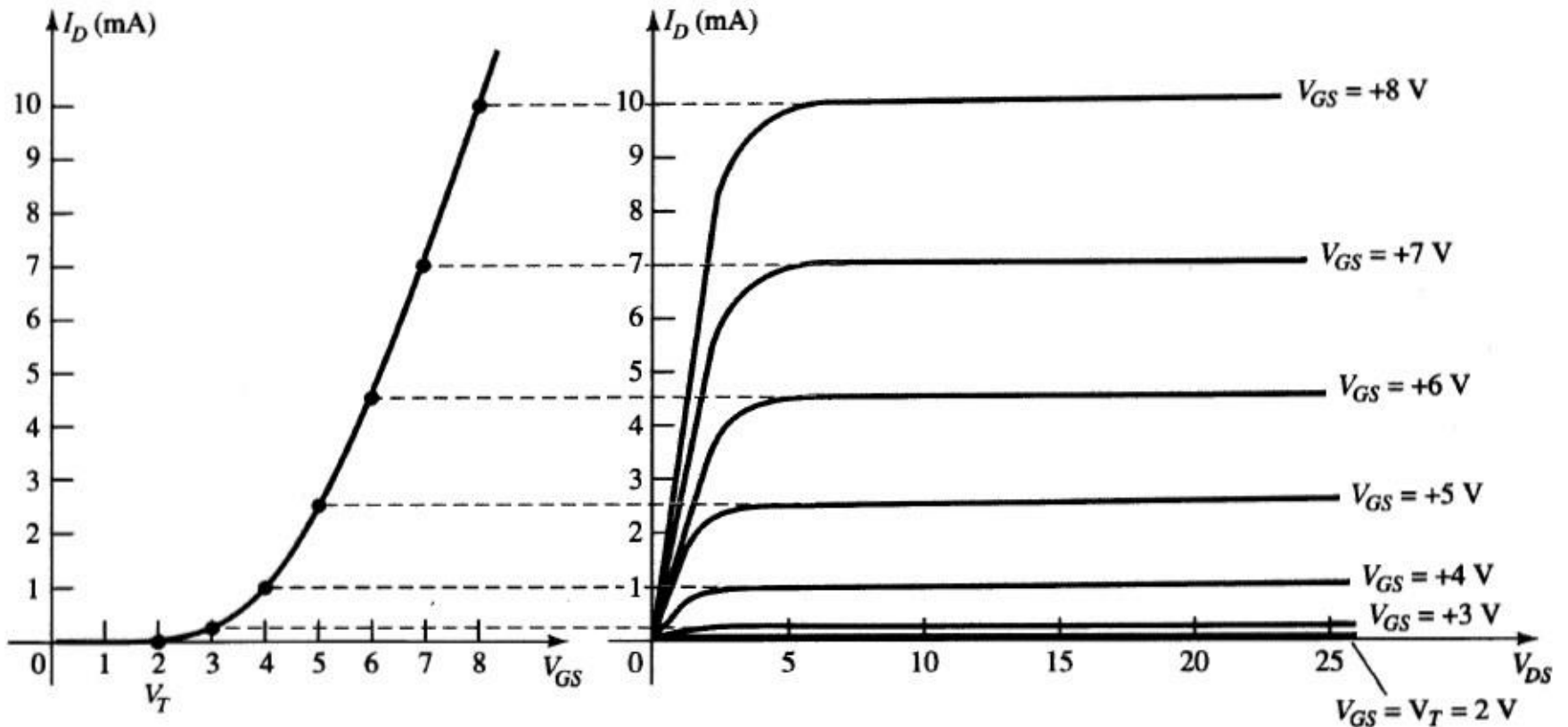


FET

- Construção (MOSFET por intensificação n)
 - ▣ Aumento da tensão v_{DS} gera **saturação**
 - Efeito equivalente ao MOSFET depleção ou FET
 - Elétrons “externos” (da fonte v_{DS}) cobrem “lacunas” do substrato na vizinhança entre substrato/canal virtual
 - Substrato = “corpo”
 - Aumento de v_{DS} não afeta mais i_D
 - i_D é a corrente de saturação (equivalente ao i_{DSS})

FET

Comportamento (MOSFET intensificação n)



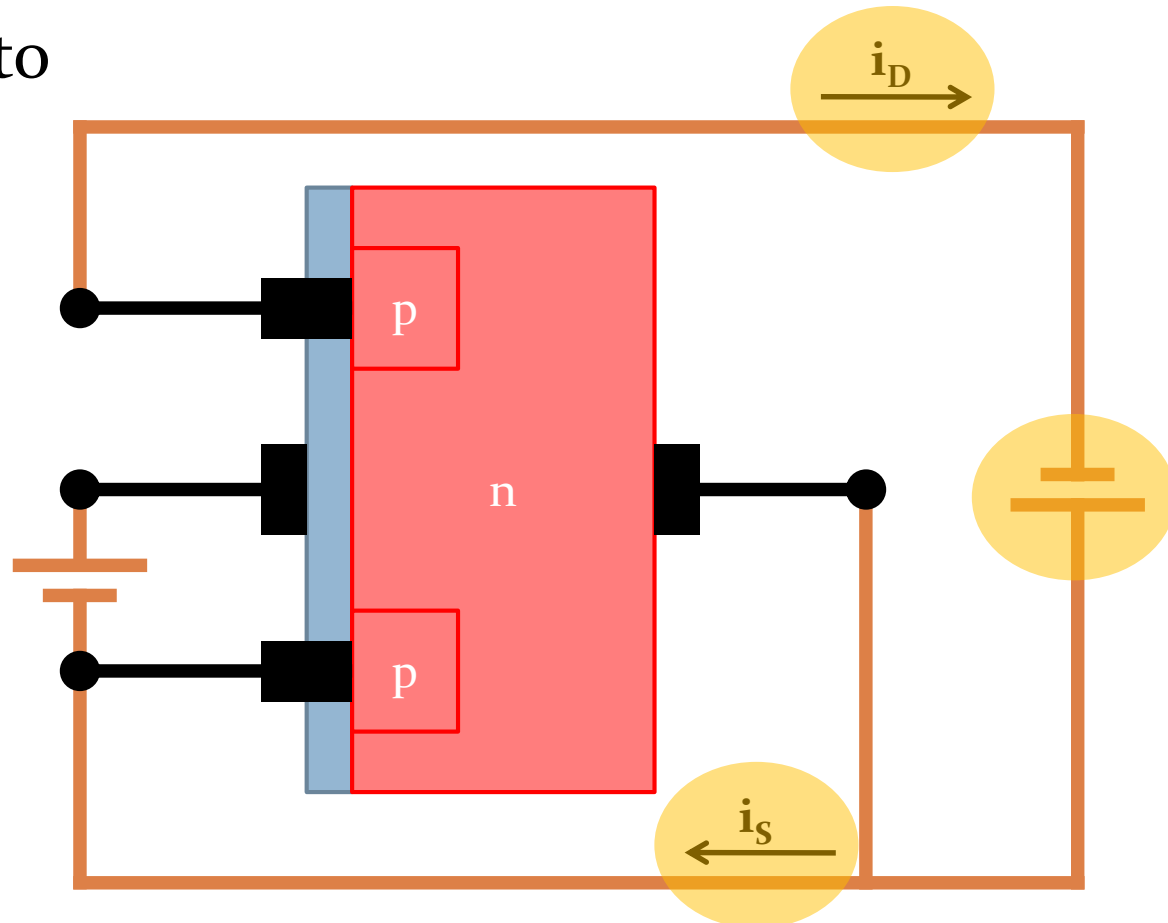
FET

- Comportamento (MOSFET intensificação n)
 - Comportamento não-linear
 - Difere dos FETs e MOSFETs mostrados anteriormente
 - $V_{DS-sat} = V_{GS} - V_T$
 - v_T é fornecido pelo fabricante
 - $i_D = k (v_{DS-sat})^2$
 - $i_D = k (v_{GS} - v_T)^2$
 - Para $v_{GS} > v_T$
 - k depende da construção:
 - $k = i_{D-on} / (v_{GS-on} - v_T)^2$

FET

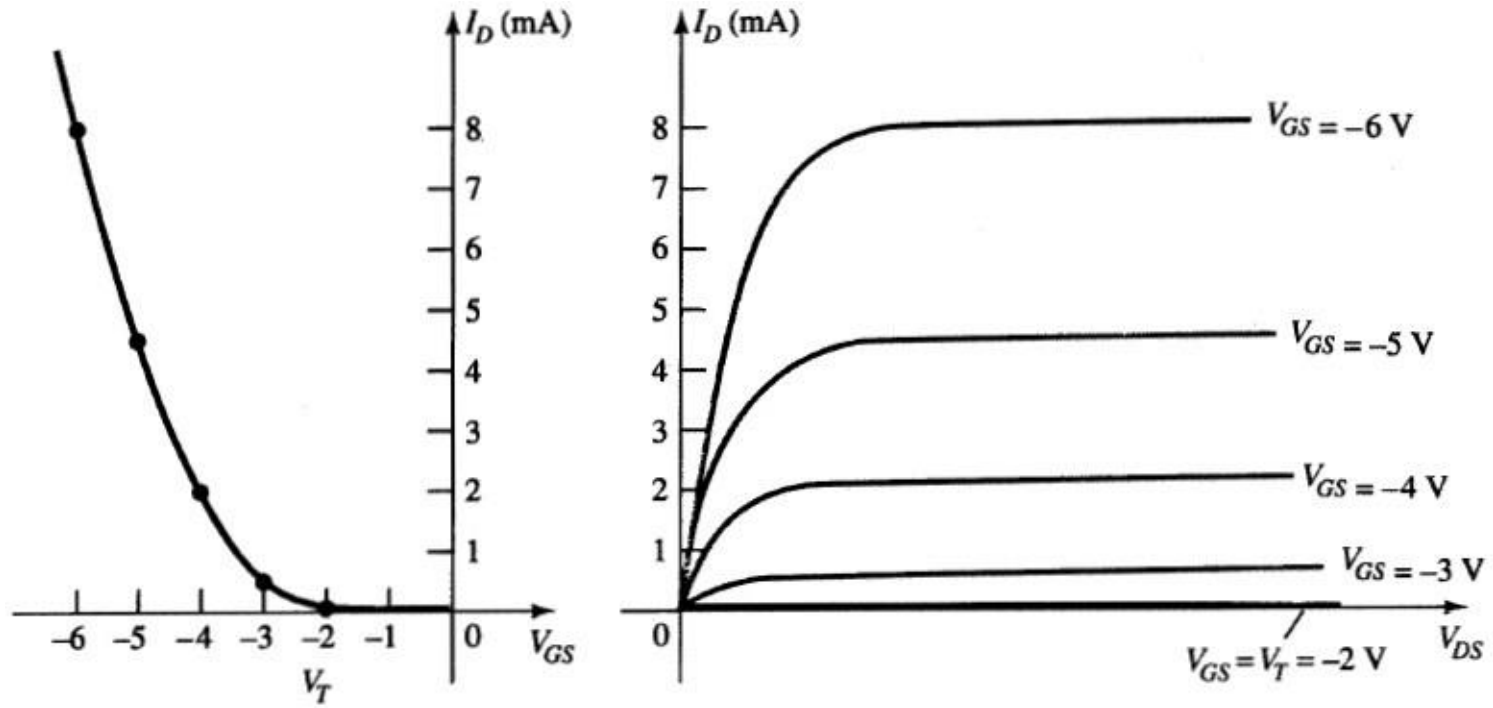
- Construção (MOSFET intensificação p)

- Comportamento análogo ao MOSFET por intensificação do tipo p



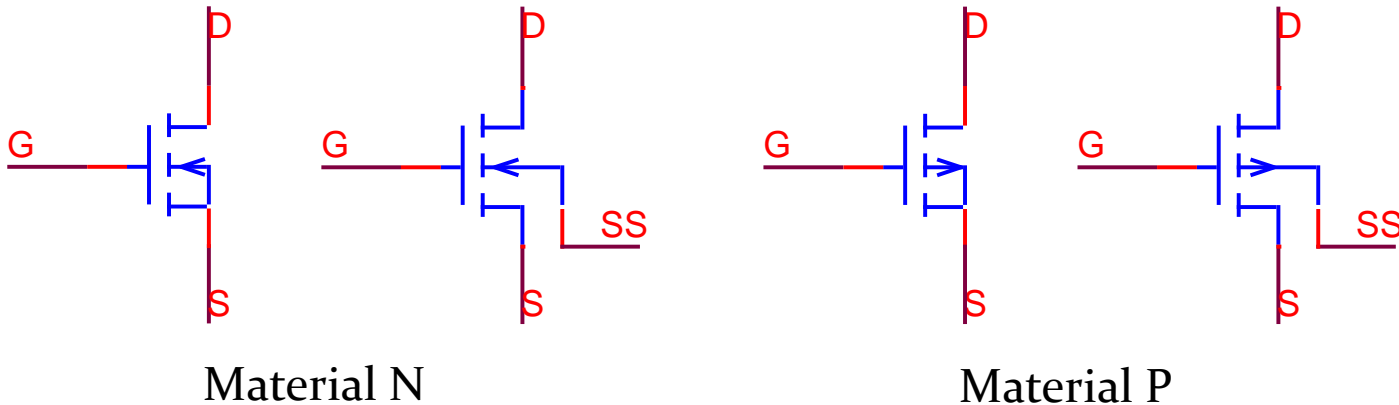
FET

- Comportamento (MOSFET intensificação p)



FET

□ Símbolos para MOSFET por intensificação



□ Atente para a ligação do substrato com a fonte.