

LOM3206 – ELETRÔNICA

AULA 5

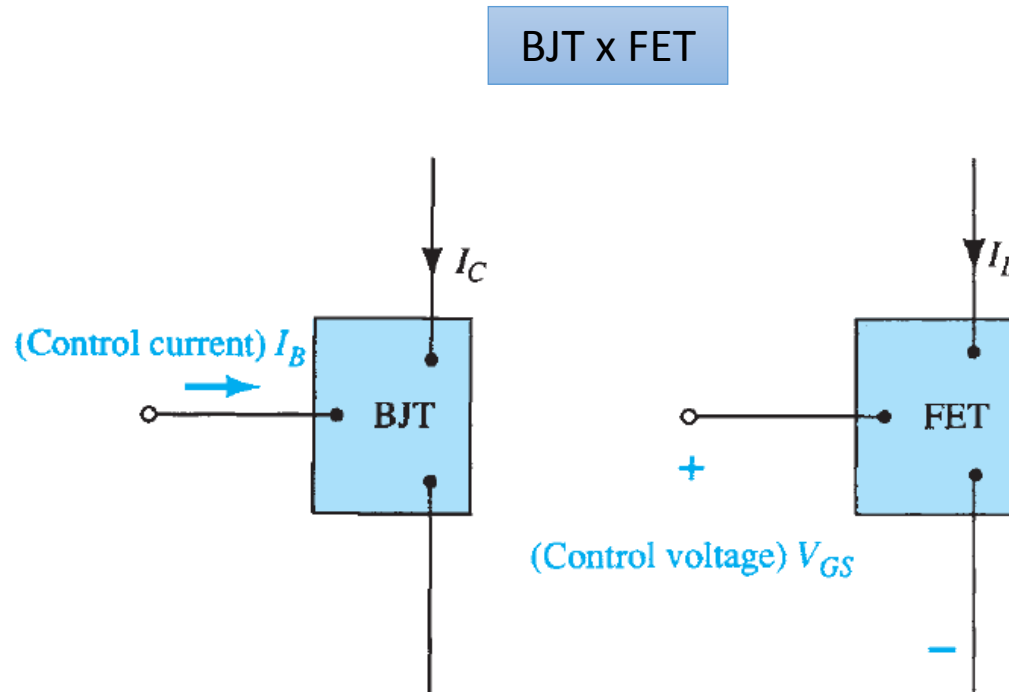
Prof. Dr. Emerson G. Melo

- ❑ Transistores de Efeito de Campo (FET);
- ❑ Transistor de Junção por Efeito de Campo (JFET);
- ❑ MOSFET (Depleção);
- ❑ MOSFET (Enriquecimento).

Transistores de Efeito de Campo (FET)

□ Dispositivo que permite controlar a corrente que flui entre dois terminais (Dreno e Fonte) através de uma tensão aplicada a um terceiro terminal (Porta).

- Fonte de corrente controlada por corrente;
- Menores impedâncias de entrada;
- Maior amplificação (ganho) de tensão;



- Fonte de corrente controlada por tensão;
- Altas impedâncias de entrada ($> M\Omega$);
- Maior estabilidade quanto a variações de temperatura;
- Mais adequados para produção de circuitos integrados;
- Mais sensíveis a energia estática.

Transistores de Efeito de Campo (FET)

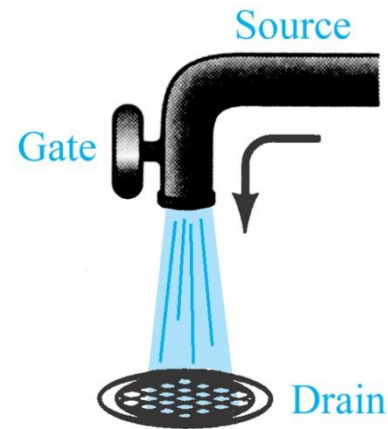
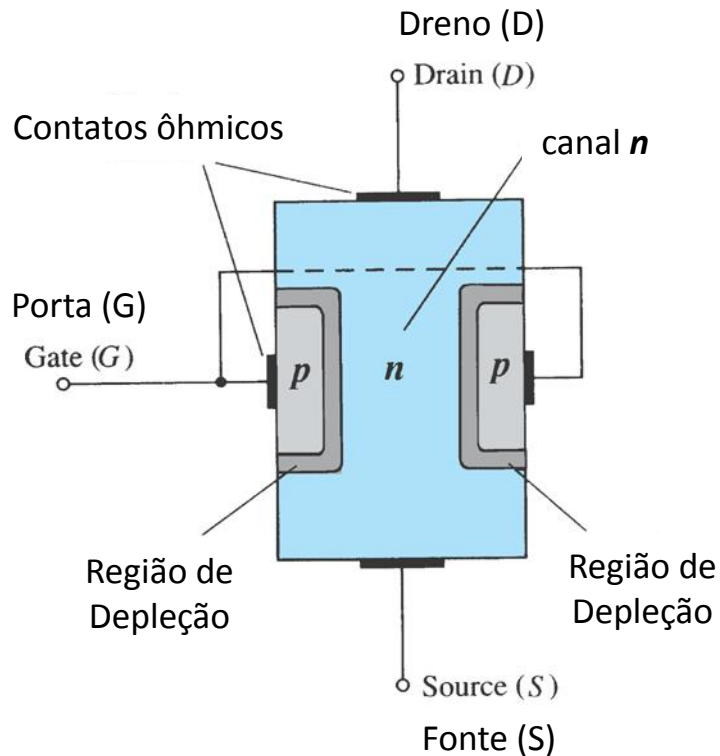
❑ Dois tipos principais de construção:

- ❑ Transistor de Junção por Efeito de Campo (JFET).
- ❑ Transistor de Efeito de Campo Metal-Óxido-Semicondutor (MOSFET)
 - ❑ MOSFET tipo Depleção.
 - ❑ MOSFET tipo Enriquecimento.

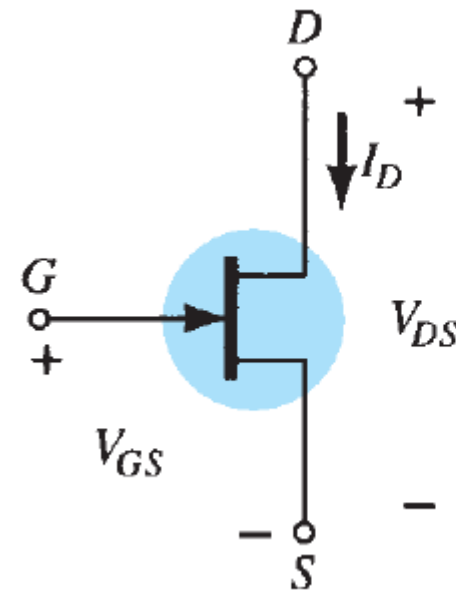
❑ Cada construção possui duas variantes: canal n e canal p ;

Transistor de Junção por Efeito de Campo (JFET)

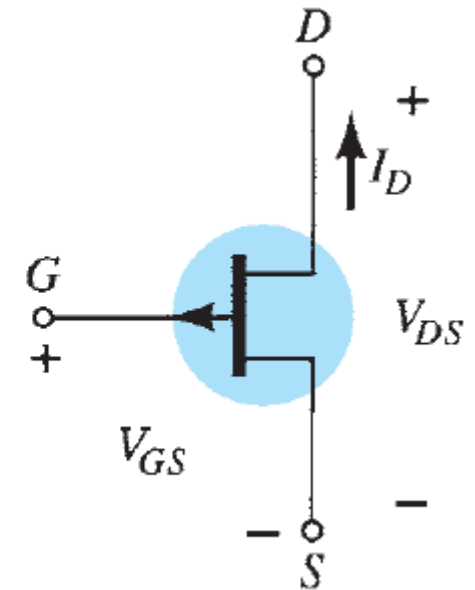
- ❑ O terminal de Porta (G) controla o fluxo de elétrons que flui da Fonte (S) para o Dreno (D);



JFET canal n

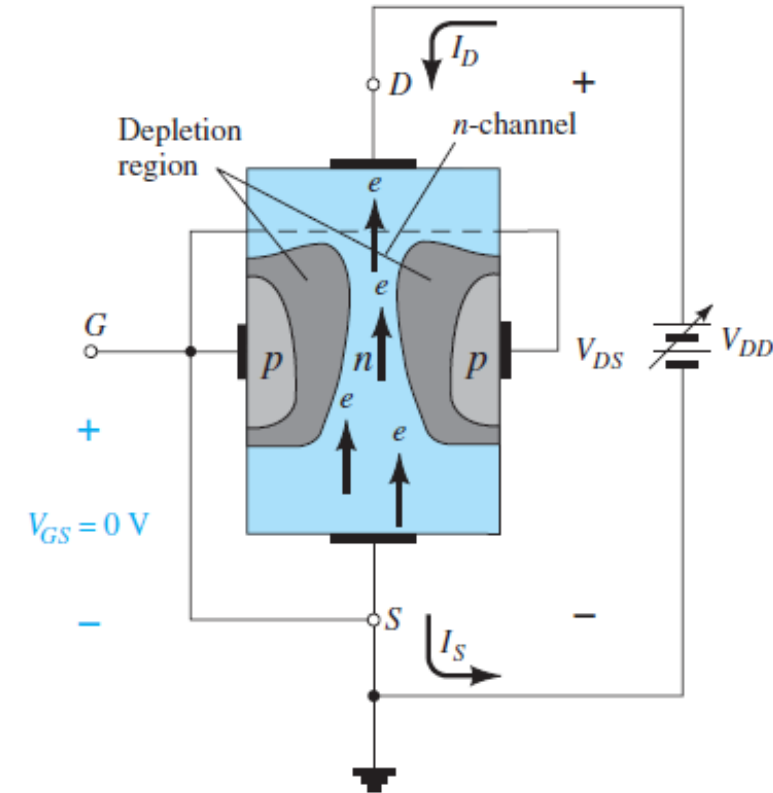


JFET Canal p

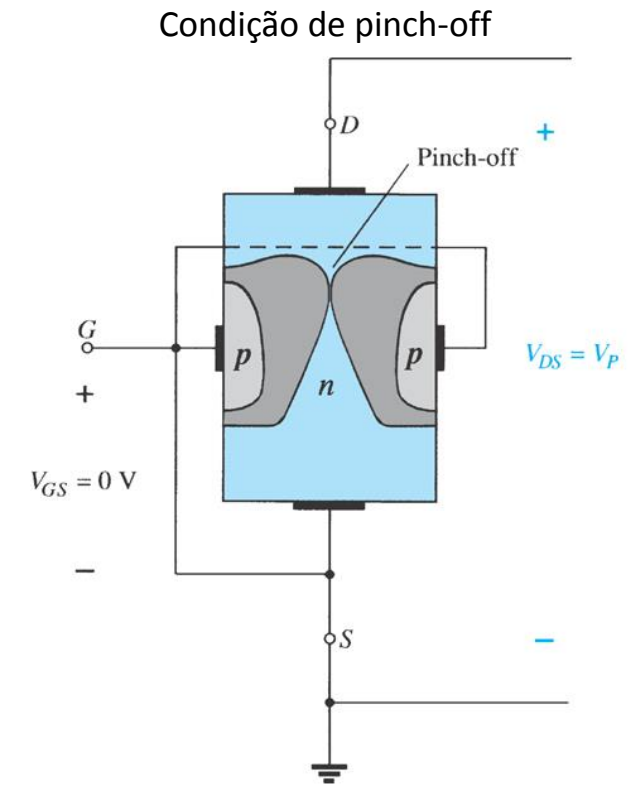
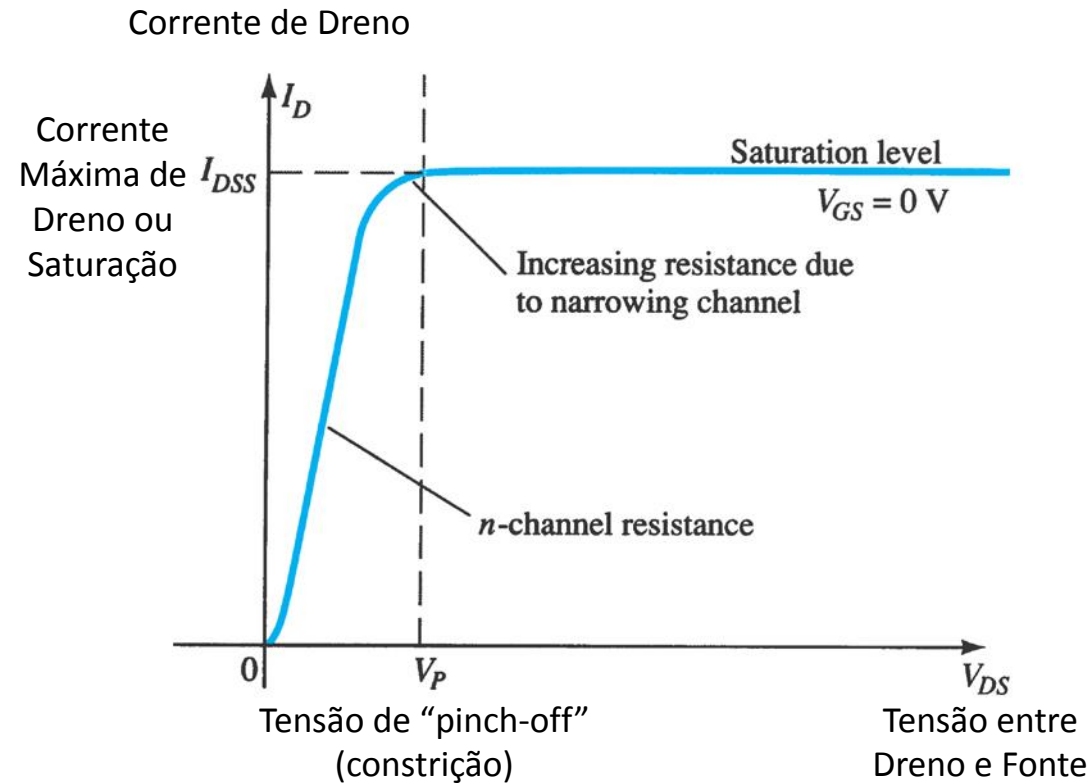


Transistor de Junção por Efeito de Campo (JFET)

❑ Características de operação: $V_{GS} = 0V$ e $V_{DS} > 0V$;



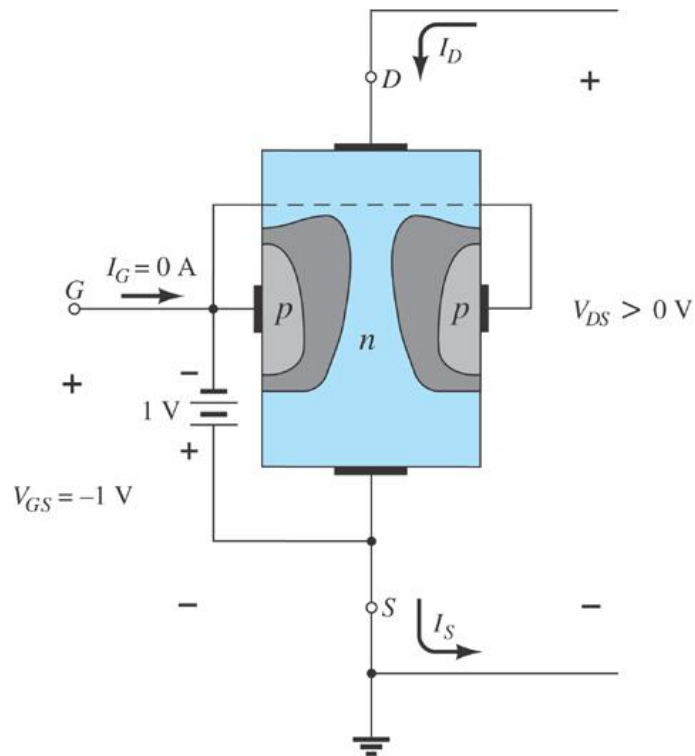
$$I_{GS} \cong 0A$$



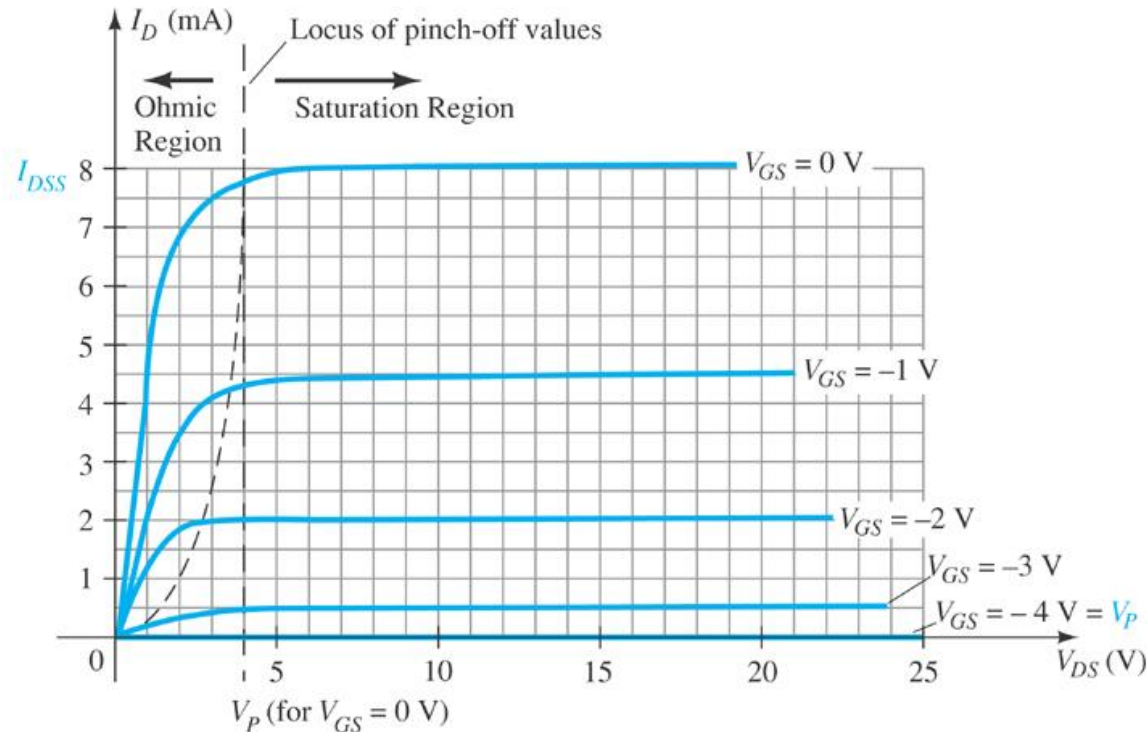
A corrente de dreno permanece estável (saturação) e não aumenta mais com o aumento de V_{DS} .

Transistor de Junção por Efeito de Campo (JFET)

❑ Características de operação: $V_{GS} < 0V$ e $V_{DS} > 0V$;



Tensão negativa aplicada à Porta.



Com V_{GS} mais negativo a condição de pinch-off ocorre para valores menores de V_{DS}

Quando $V_{GS} = -V_P$ o dispositivo é desligado, ou seja, $I_D = 0A$. Essa tensão é chamada de $V_{GS(off)}$. Na maioria das folhas de dados V_P é designado por $V_{GS(off)}$.

JFET canal **n**

$V_P < 0$

JFET Canal **p**

$V_P > 0$

Transistor de Junção por Efeito de Campo (JFET)

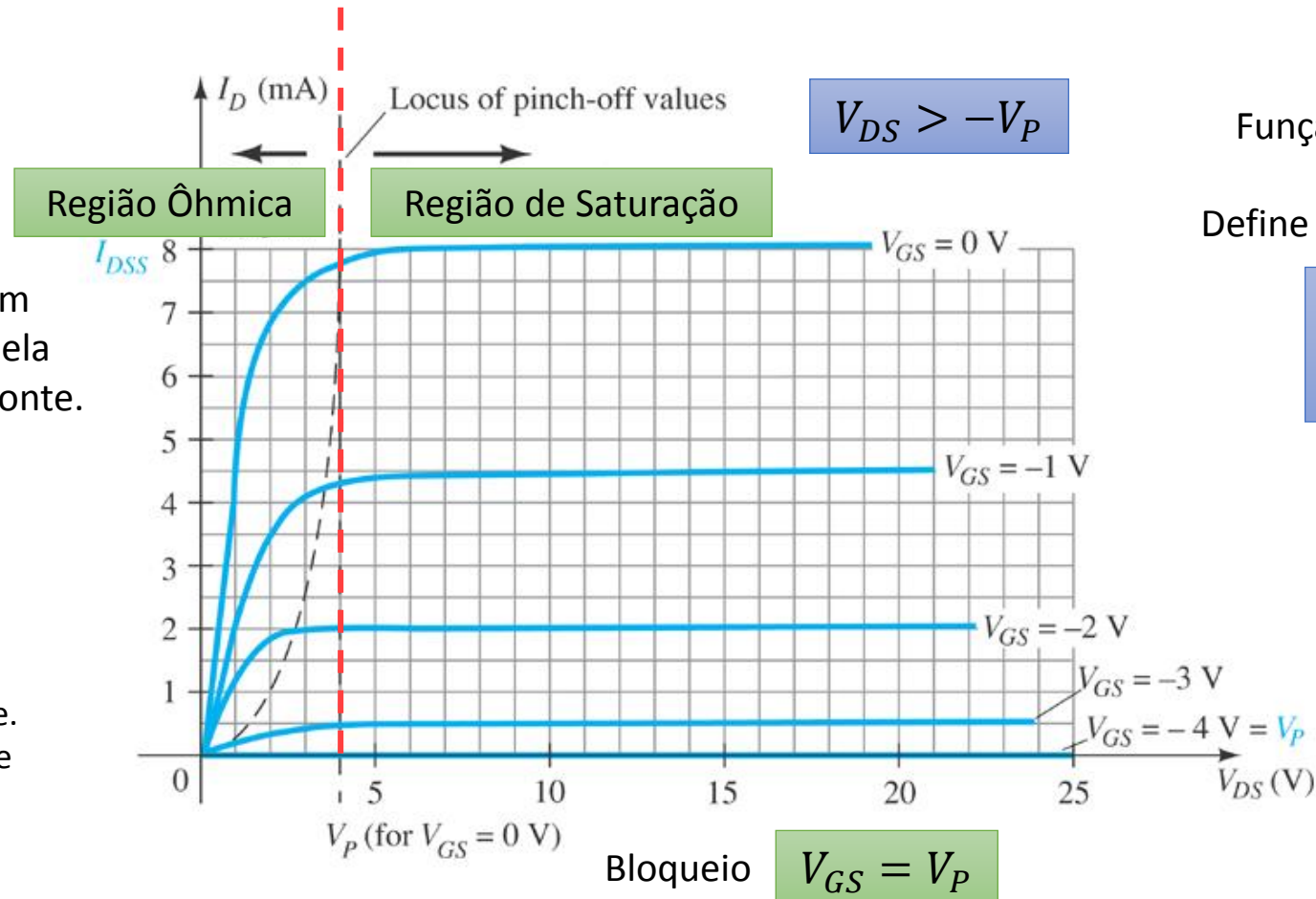
❑ Características de operação: $V_{GS} < 0V$ e $V_{DS} > 0V$;

$$V_{DS} < -V_P$$

O JFET se comporta como um resistor variável controlado pela tensão aplicada entre Porta e Fonte.

$$r_d = \frac{r_0}{\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2}$$

r_d - resistência entre Dreno e Fonte.
 r_0 - resistência entre Dreno e Fonte para $V_{GS} = 0V$.



Função de Transferência dada pela Equação de Shockley:
Define o valor de I_D em função de V_{GS} .

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$$

Transistor de Junção por Efeito de Campo (JFET)

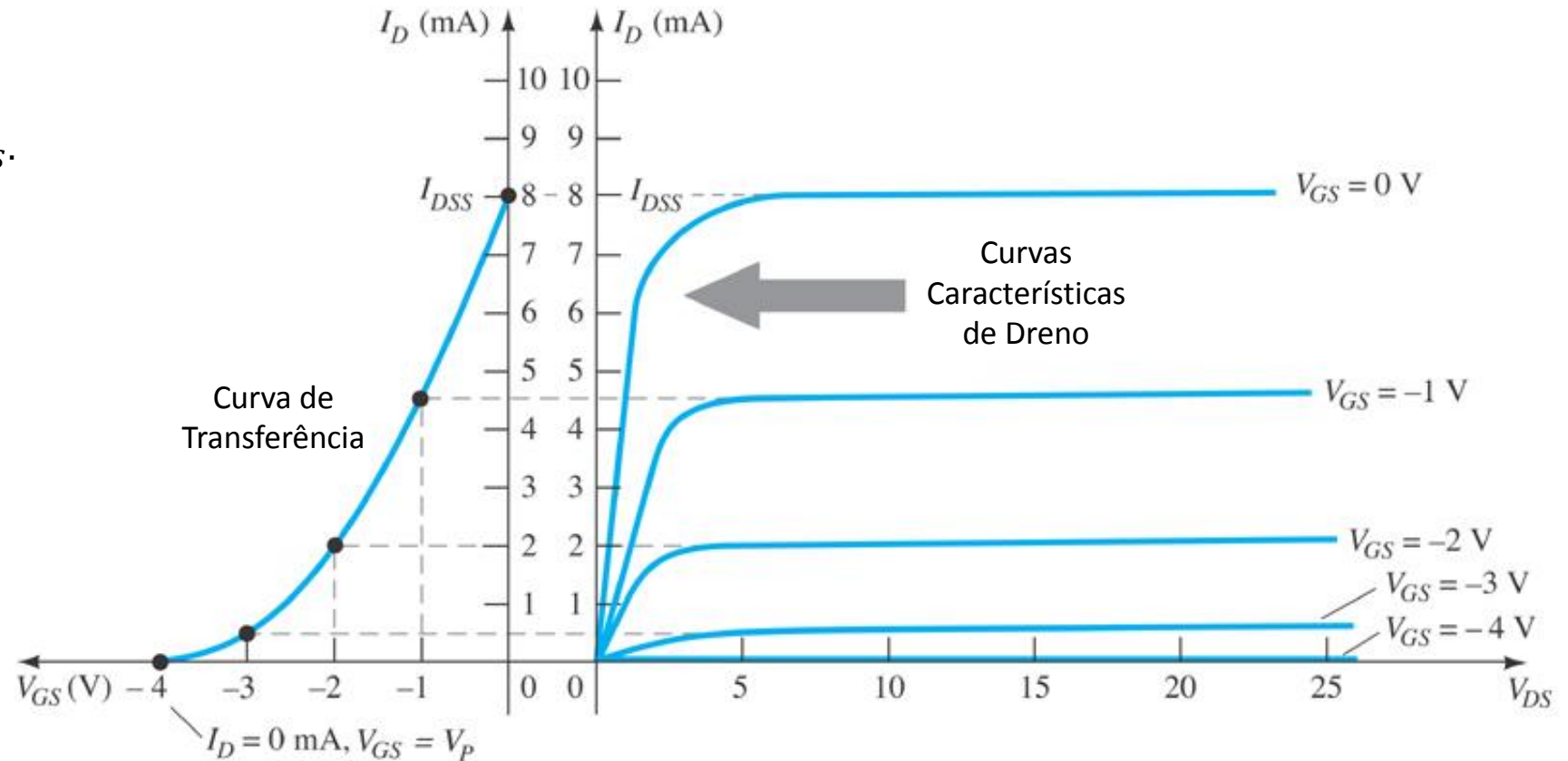
❑ Características de operação: $V_{GS} < 0V$ e $V_{DS} > 0V$;

Função de Transferência dada pela
Equação de Shockley:
Define o valor de I_D em função de V_{GS} .

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2$$

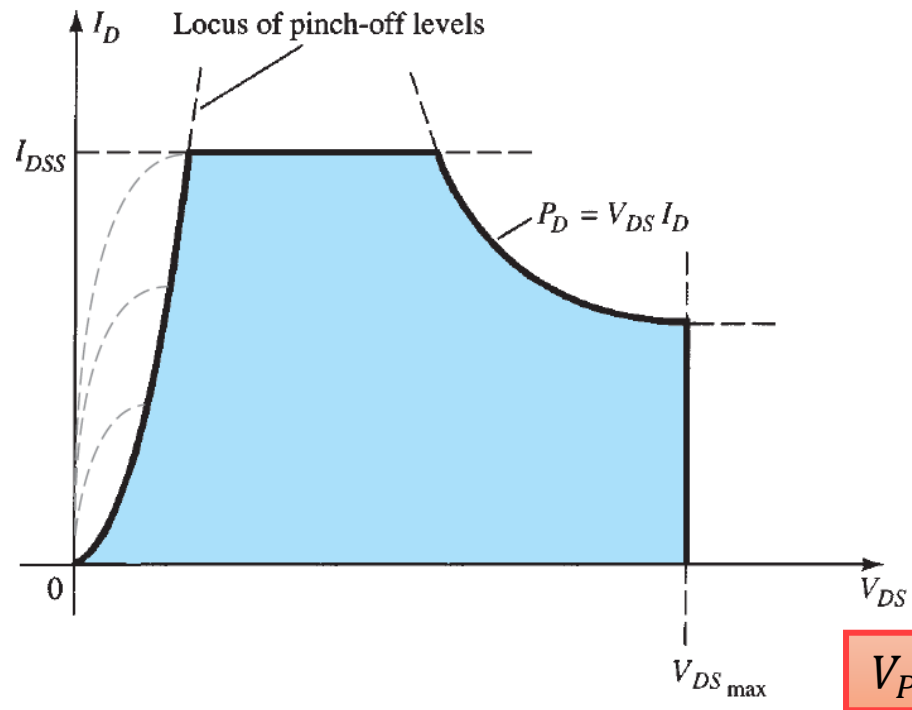
Relação útil para projetos:
 V_{GS} em função de I_D .

$$V_{GS} = V_P \left(1 - \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}} \right)$$



Transistor de Junção por Efeito de Campo (JFET)

Região de Operação (Saturação) e Folha de Dados.



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Units
V_{DS}	Drain-Source Voltage	25	V
V_{DG}	Drain-Gate Voltage	25	V
V_{GS}	Gate-Source Voltage	-25	V
I_{GF}	Forward Gate Current	10	mA
T_j, T_{stg}	Operating and Storage Junction Temperature Range	-55 to +150	°C

OFF CHARACTERISTICS

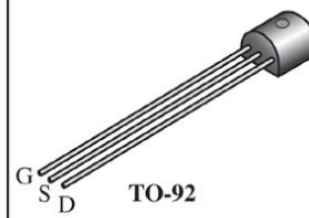
$V_{(BR)GSS}$	Gate-Source Breakdown Voltage	$I_G = 10 \mu A, V_{DS} = 0$	-25			V
I_{GSS}	Gate Reverse Current	$V_{GS} = -15 V, V_{DS} = 0$ $V_{GS} = -15 V, V_{DS} = 0, T_A = 100^\circ C$			-1.0 -200	nA nA
$V_{GS(off)}$	Gate-Source Cutoff Voltage	$V_{DS} = 15 V, I_D = 10 nA$	5457	-0.5		-6.0 V
V_{GS}	Gate-Source Voltage	$V_{DS} = 15 V, I_D = 100 \mu A$	5457		-2.5	V

ON CHARACTERISTICS

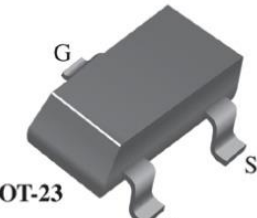
I_{DSS}	Zero-Gate Voltage Drain Current	$V_{DS} = 15 V, V_{GS} = 0$	5457	1.0	3.0	5.0	mA
-----------	---------------------------------	-----------------------------	------	-----	-----	-----	----

FAIRCHILD
SEMICONDUCTOR™

2N5457 **MMBF5457**



TO-92



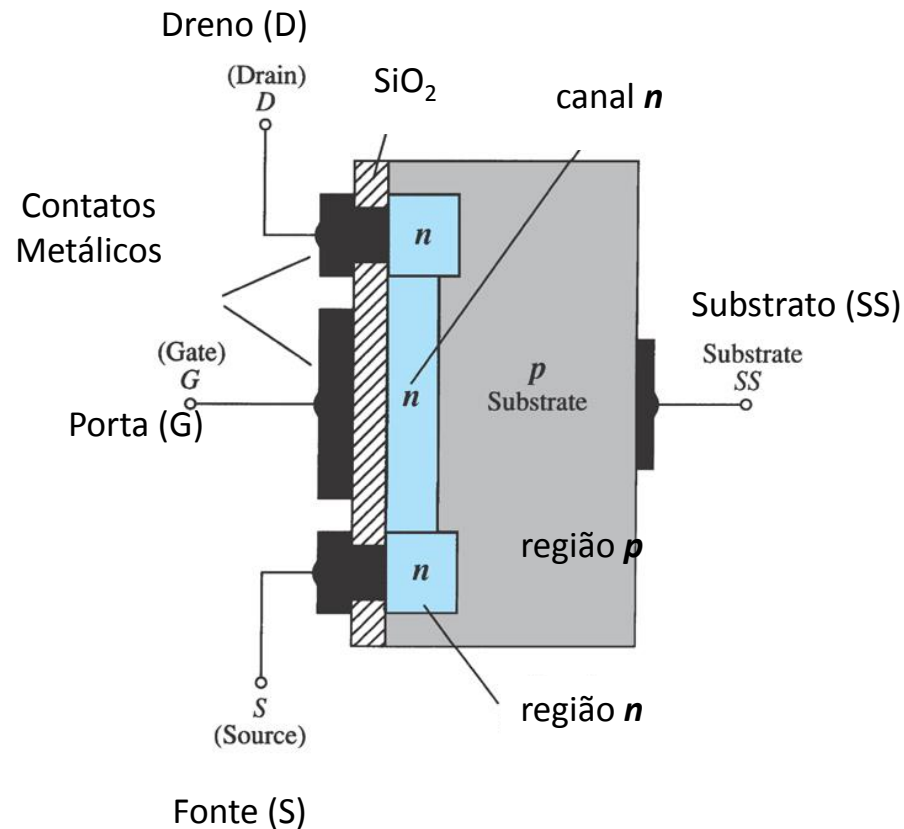
SOT-23

NOTE: Source & Drain are interchangeable

N-Channel General Purpose Amplifier
This device is a low-level audio amplifier and switching transistor, and can be used for analog switching applications.

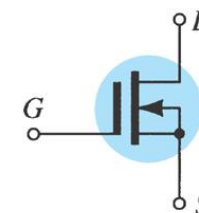
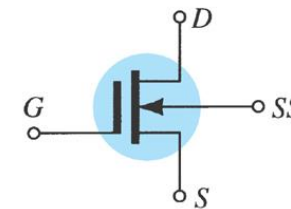
MOSFET (Depleção)

- ❑ O fluxo de elétrons que flui da Fonte (S) para o Dreno (D) é controlado através um campo elétrico estabelecido entre a Porta (G) e o Substrato (SS);
- ❑ A Porta é isolada através de um filme fino dielétrico.



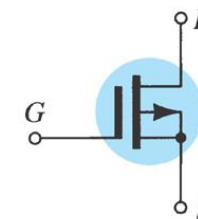
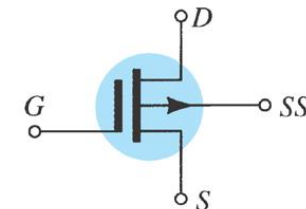
MOSFET (D)
canal n

n -channel



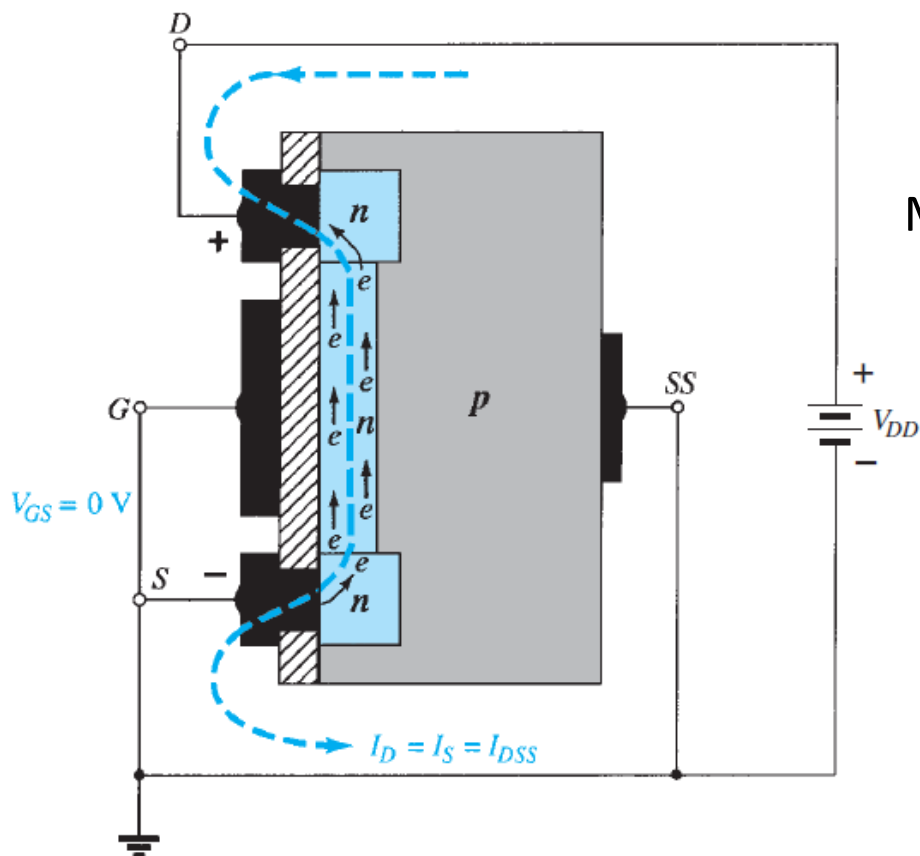
MOSFET (D)
canal p

p -channel

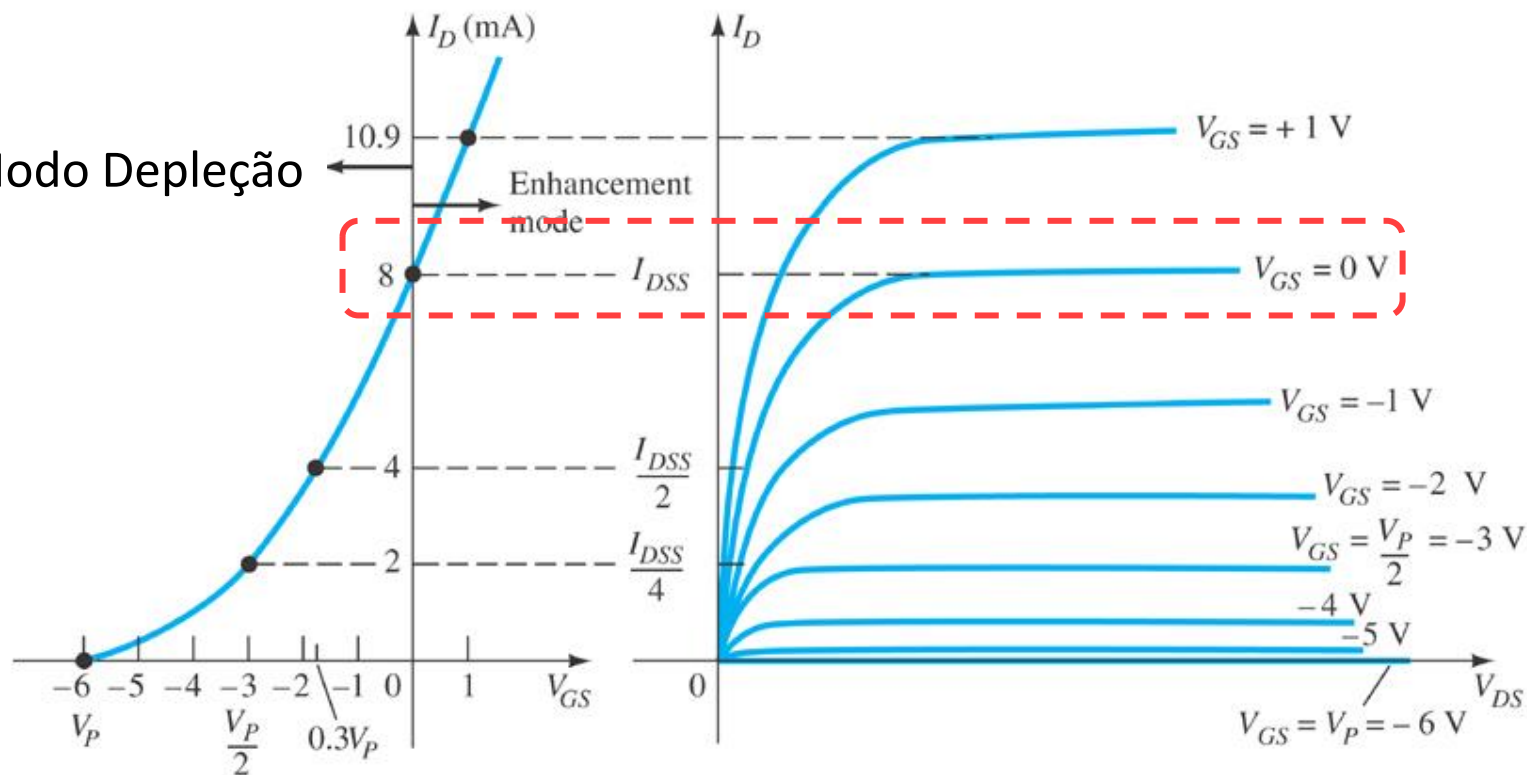


MOSFET (Depleção)

□ Para $V_{GS} = 0 \text{ V}$ temos $I_D = I_{DSS}$.

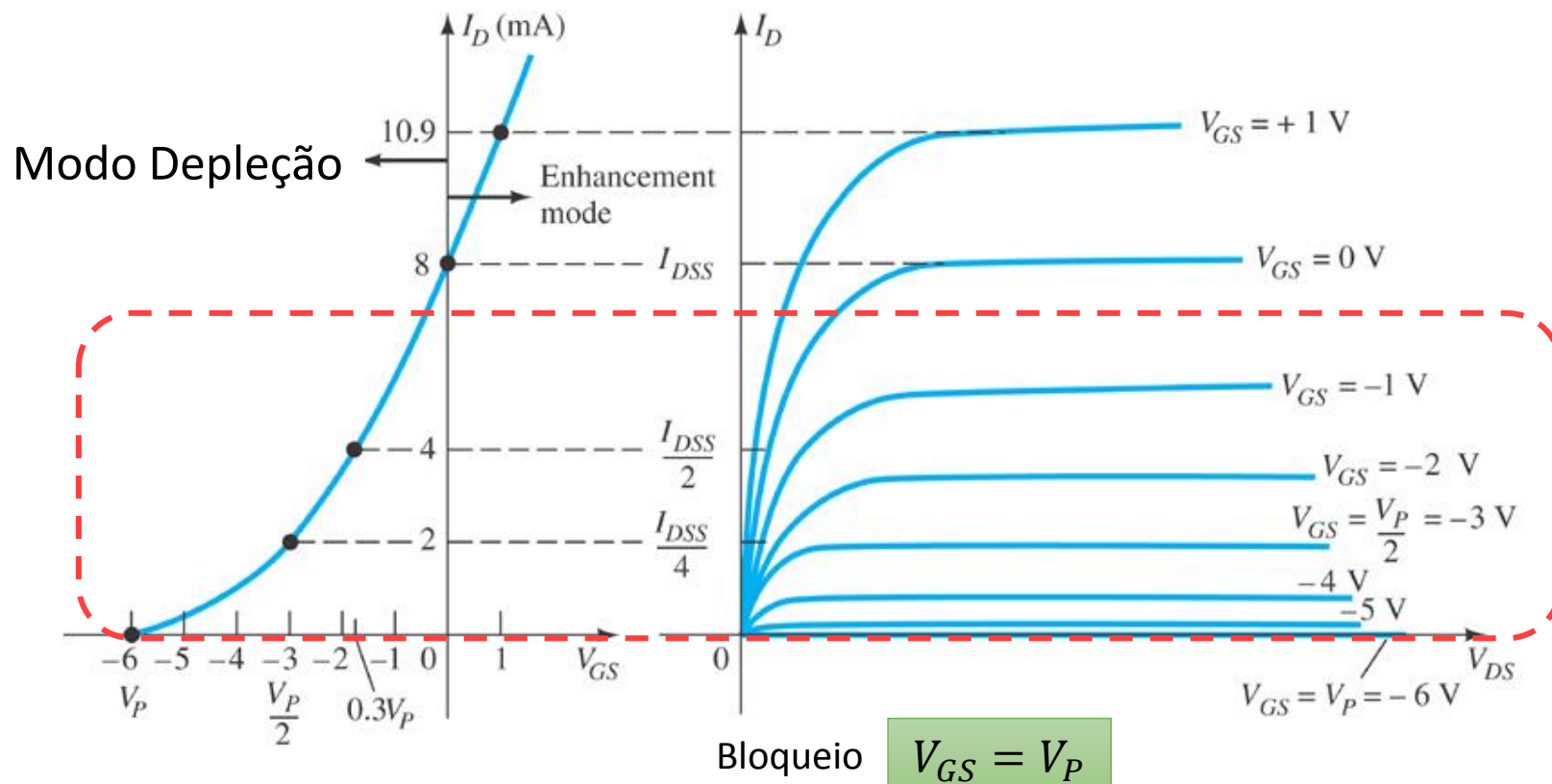
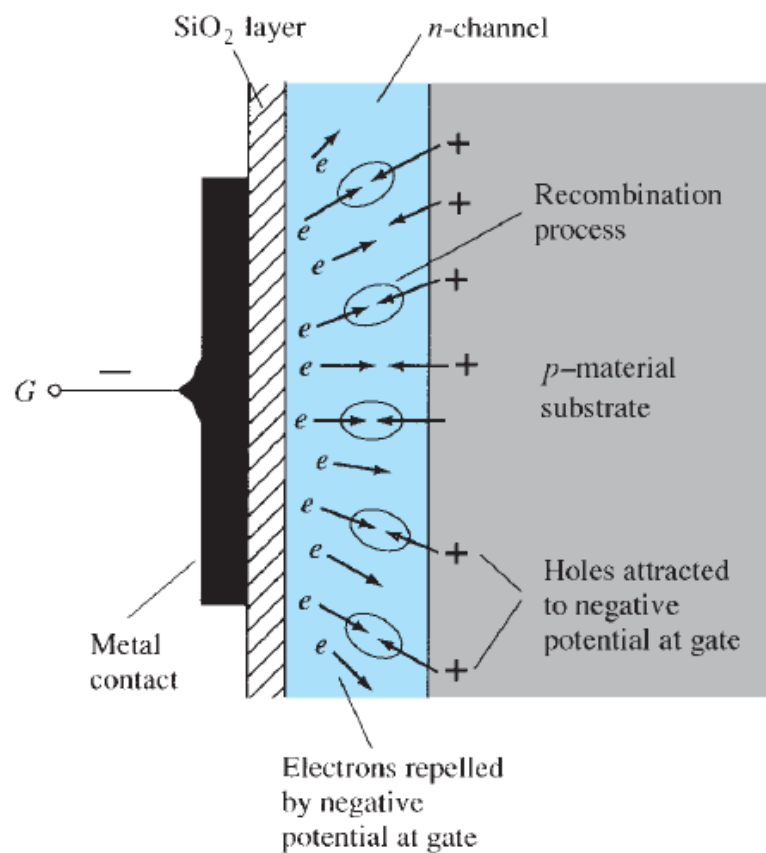


Modo Depleção



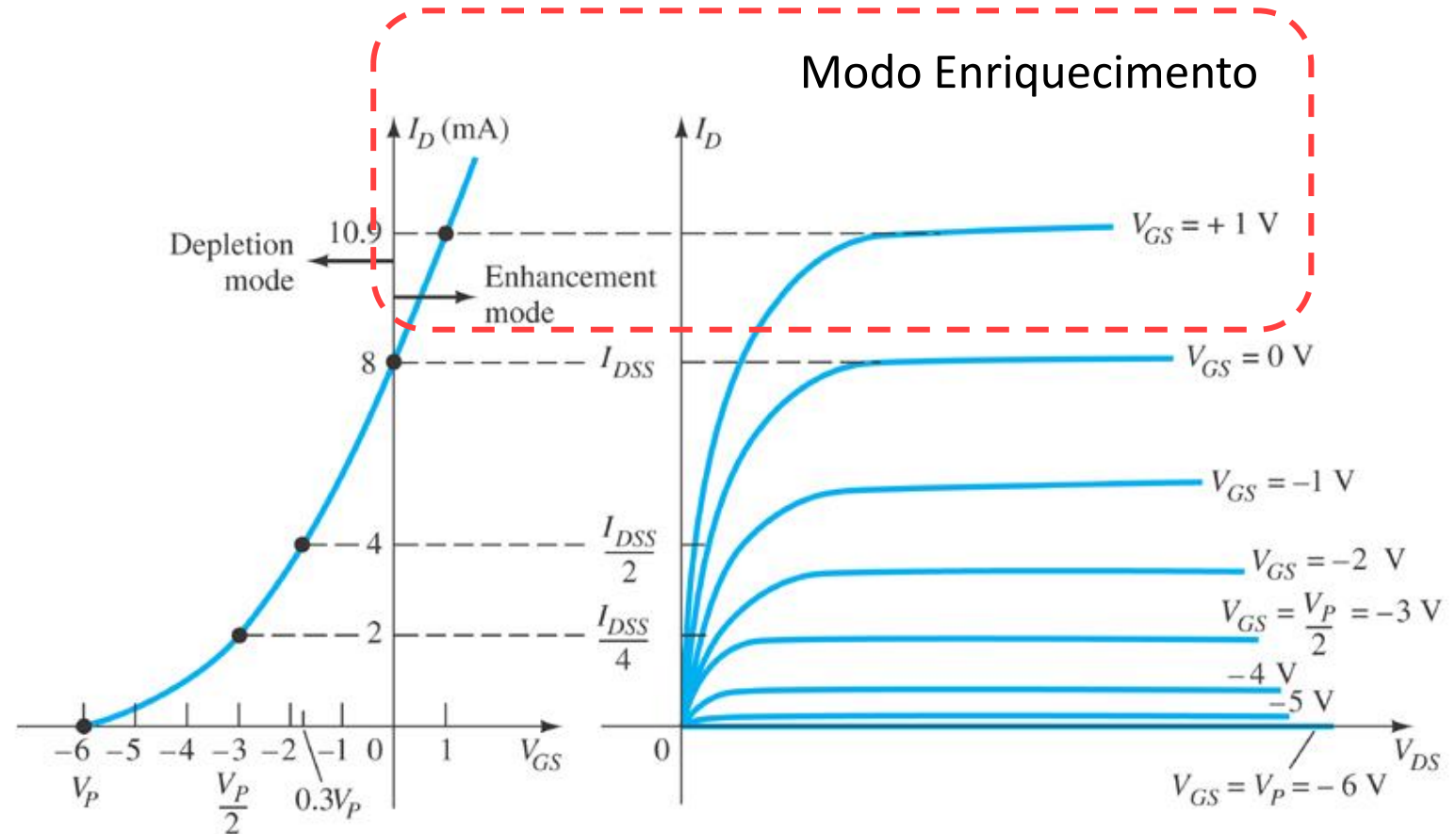
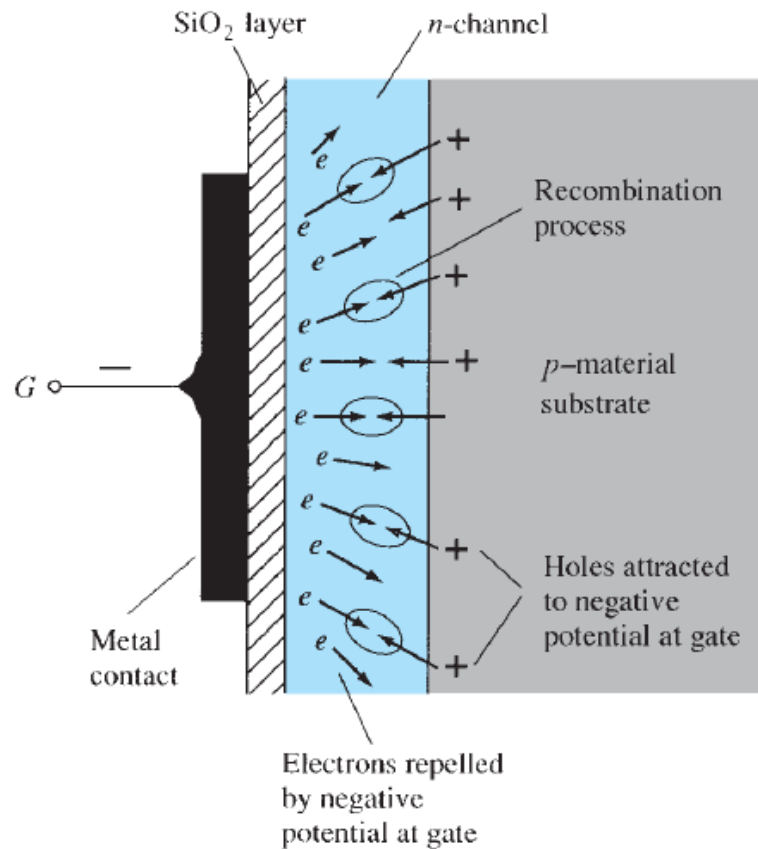
MOSFET (Depleção)

□ Para $V_{GS} < 0$ V temos $I_D < I_{DSS}$.



MOSFET (Depleção)

□ Para $V_{GS} > 0 \text{ V}$ temos $I_D > I_{DSS}$.



MOSFET (Depleção)

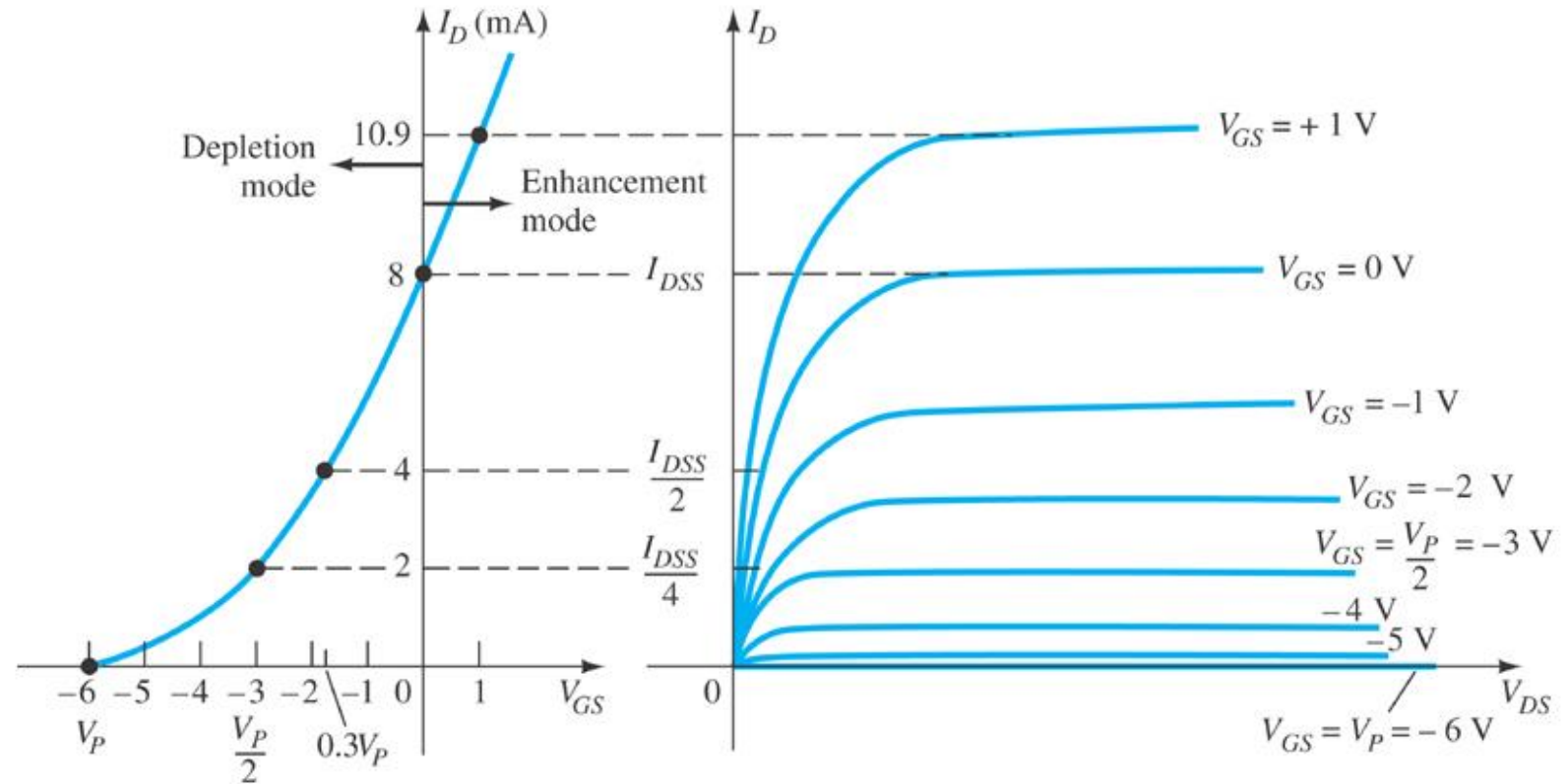
Equação de Shockley pode ser aplicada ao MOSFET tipo Depleção.

Função de Transferência dada pela
Equação de Shockley:
Define o valor de I_D em função de V_{GS} .

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2$$

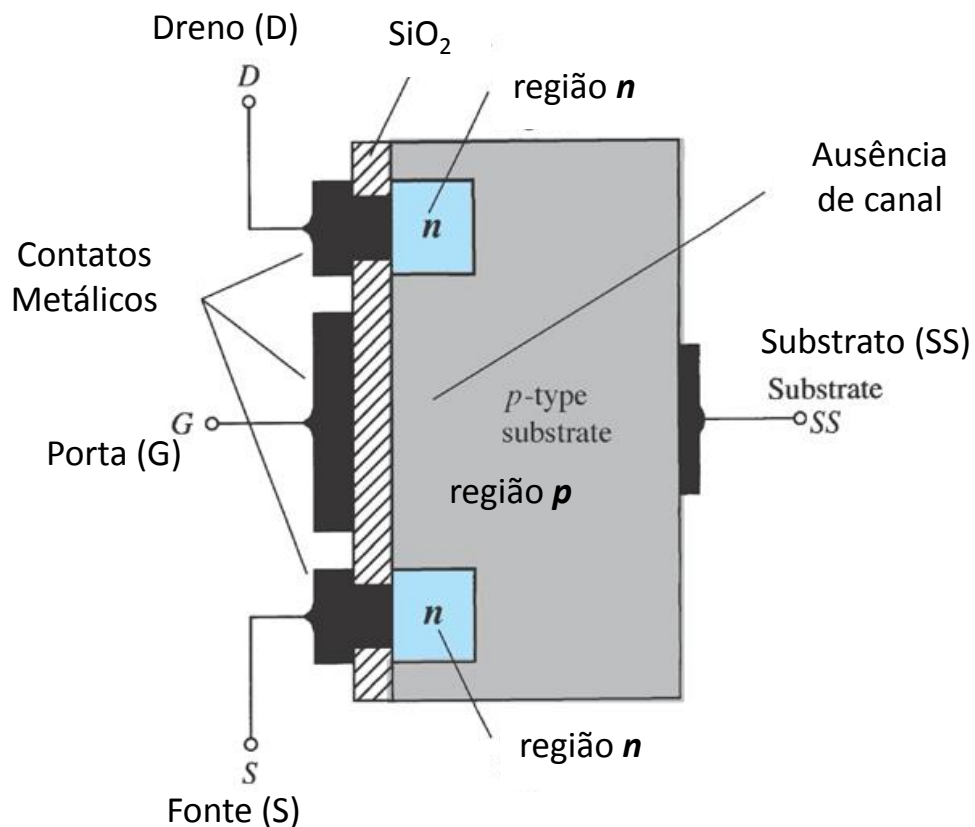
Relação útil para projetos:
 V_{GS} em função de I_D .

$$V_{GS} = V_P \left(1 - \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}} \right)$$



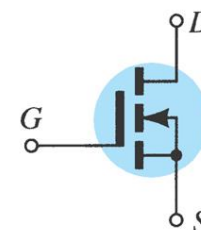
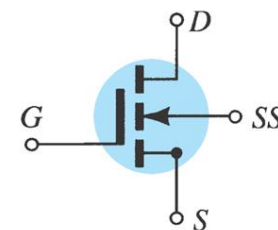
MOSFET (Enriquecimento)

- ❑ O fluxo de elétrons que flui da Fonte (S) para o Dreno (D) é controlado através um campo elétrico estabelecido entre a Porta (G) e o Substrato (SS);
- ❑ Não é realizada a dopagem da região do canal.



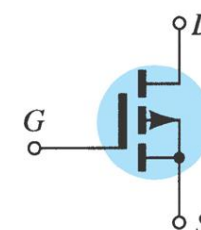
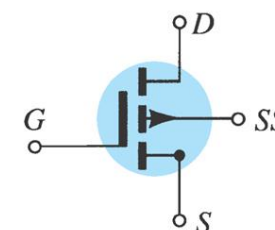
MOSFET (E)
canal *n*

n-channel



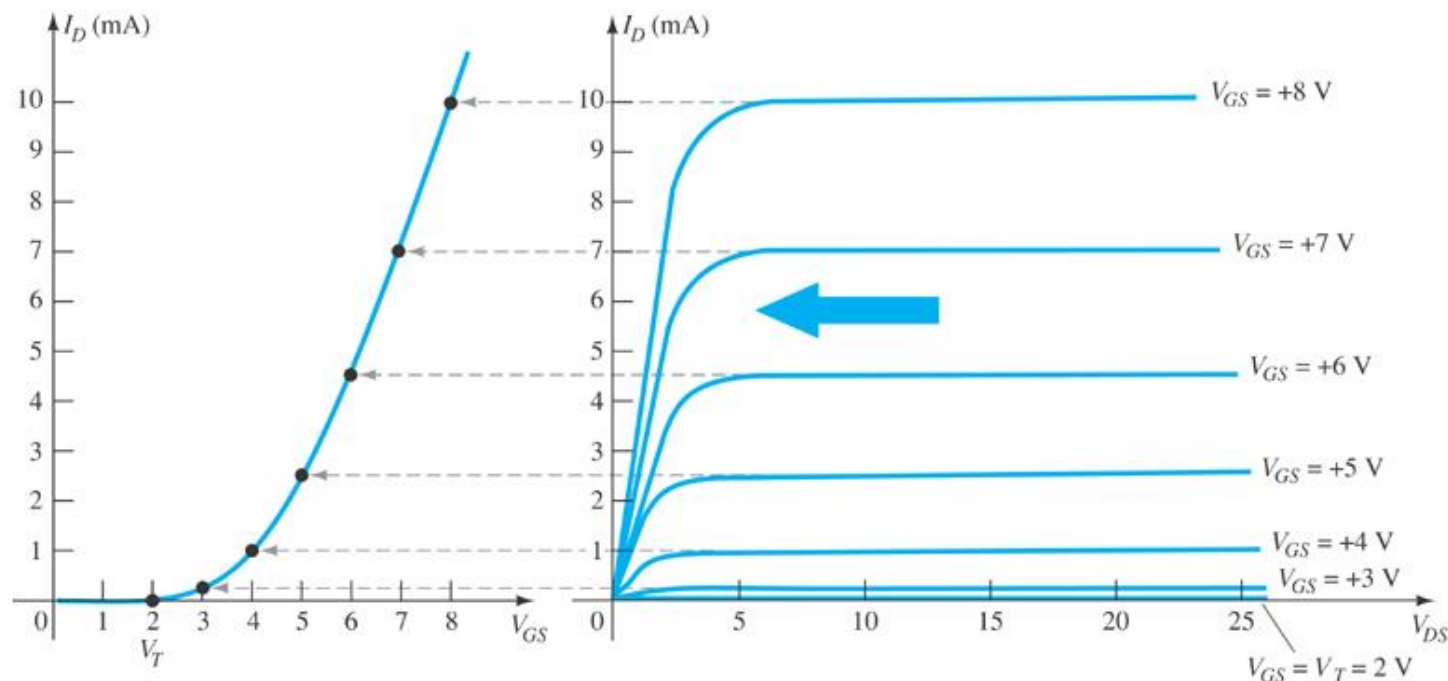
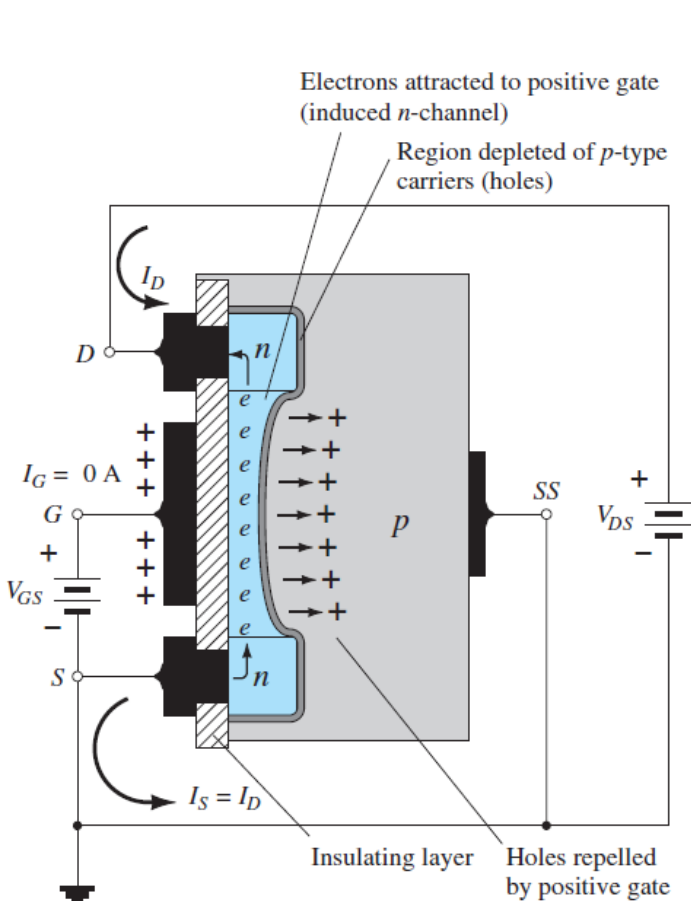
MOSFET (E)
canal *p*

p-channel



MOSFET (Enriquecimento)

❑ O MOSFET(E) opera apenas no modo Enriquecimento;



I_D permanece constante mesmo com o aumento de V_{DS} devido à condição de pinch-off.

Quando a tensão V_{GS} é maior que a Tensão de Limiar (V_T) flui corrente elétrica (I_D) através de D e S.

MOSFET(E) canal **n**

$V_{GS} > 0$

MOSFET(E) Canal **p**

$V_{GS} < 0$

MOSFET (Enriquecimento)

❑ A equação de Shockley não se aplica.

V_{DSsat} - Nível de saturação de V_{DS}

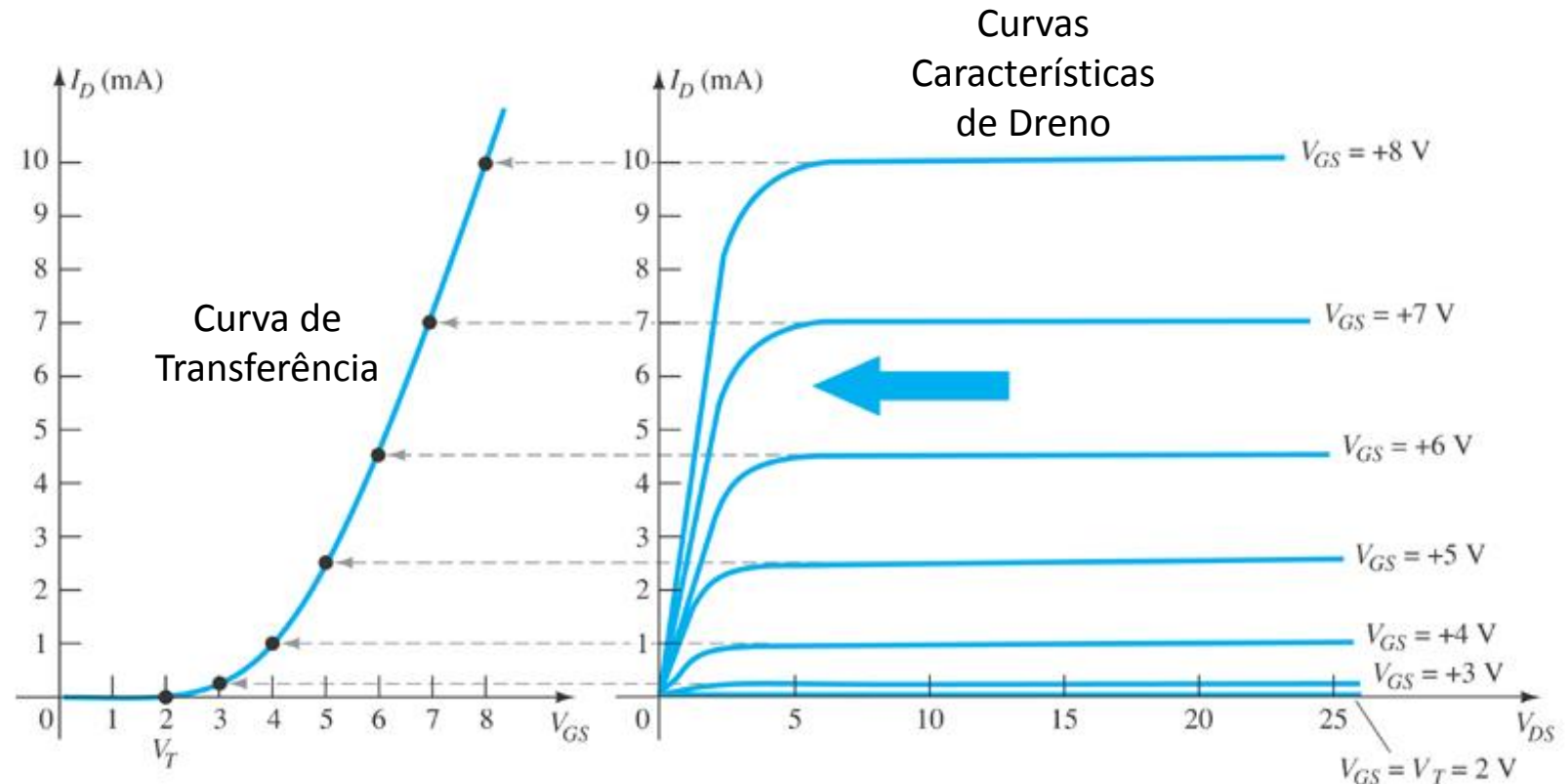
$$V_{DSsat} = V_{GS} - V_T$$

Função de Transferência

$$I_D = k(V_{GS} - V_T)^2$$

k - Constante que engloba características de construção

$$k = \frac{I_{D(ON)}}{(V_{GS(ON)} - V_T)^2}$$



MOSFET (Enriquecimento)

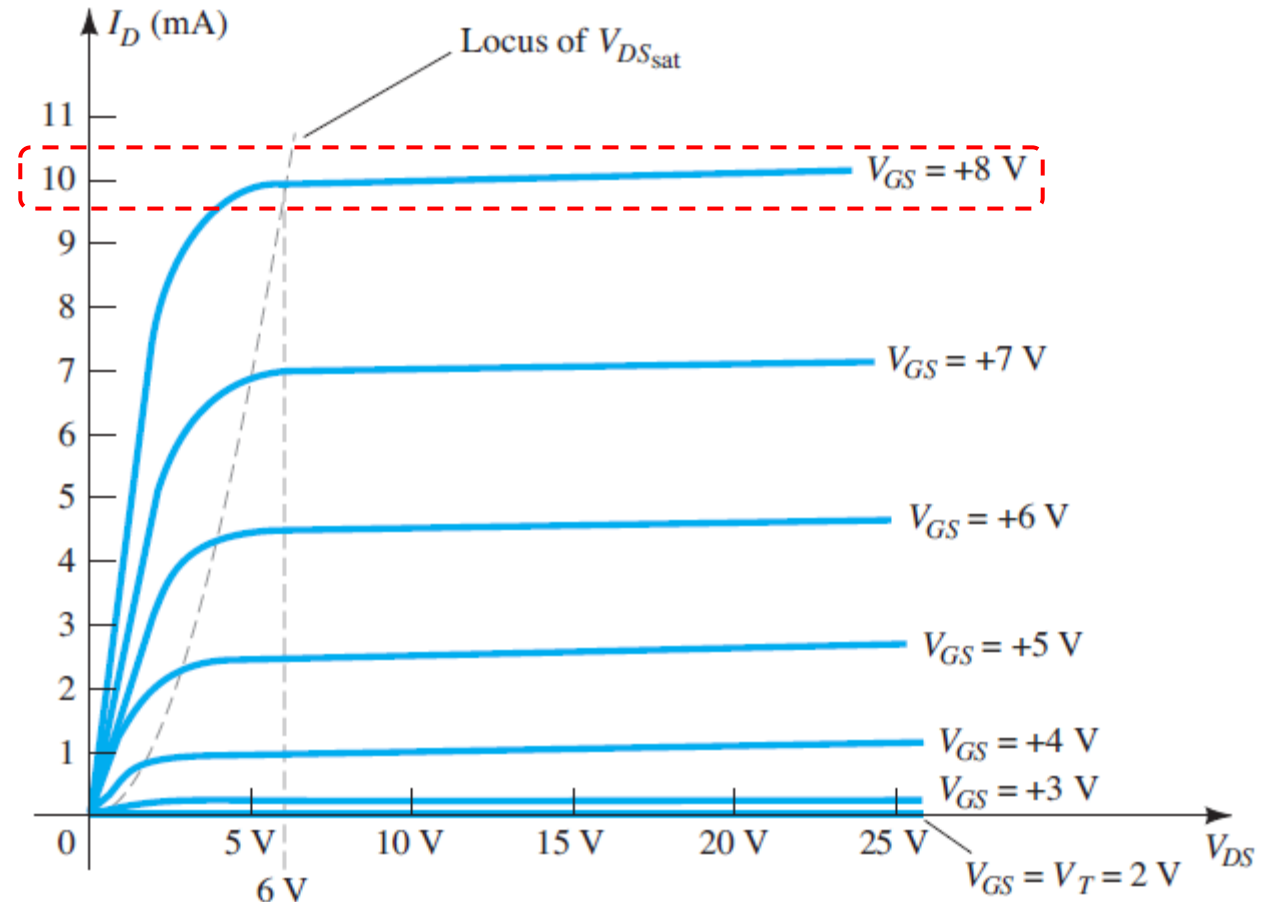
Com base na curva característica destacada abaixo, determinar o valor de V_{DSSat} e I_D para $V_{GS} = 4\text{ V}$.

$$V_{DSSat} = V_{GS} - V_T \quad V_{DSSat} = 8 - 2 = 6\text{ V}$$

$$I_D = k(V_{GS} - V_T)^2$$

$$k = \frac{I_{D(ON)}}{(V_{GS(ON)} - V_T)^2} \quad k = \frac{10\text{ mA}}{(8 - 2)^2} = 0,278 \times 10^{-3}\text{ A/V}^2$$

$$I_D = 0,278 \times 10^{-3}(4 - 2)^2 = 1,11\text{ mA}$$



MOSFET (Enriquecimento)

Folha de Dados.

MAXIMUM RATINGS

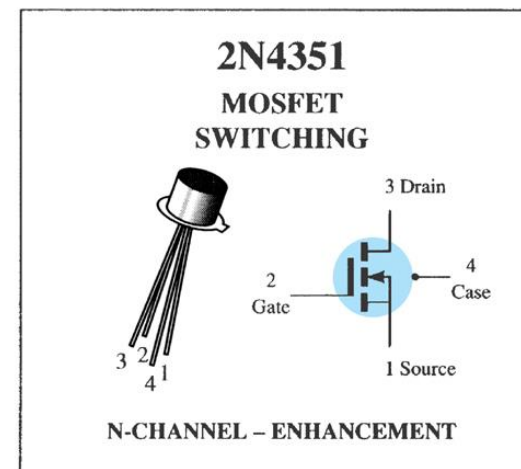
Rating	Symbol	Value	Unit
Drain-Source Voltage	V_{DS}	25	Vdc
Drain-Gate Voltage	V_{DG}	30	Vdc
Gate-Source Voltage*	V_{GS}	30	Vdc
Drain Current	I_D	30	mAdc
Total Device Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	300 1.7	mW mW/ $^\circ\text{C}$
Junction Temperature Range	T_J	175	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	T_{stg}	-65 to +175	$^\circ\text{C}$

* Transient potentials of ± 75 Volt will not cause gate-oxide failure.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted.)

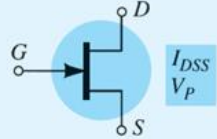
Characteristic	Symbol	Min	Max	Unit
OFF CHARACTERISTICS				
Drain-Source Breakdown Voltage ($I_D = 10\ \mu\text{A}$, $V_{GS} = 0$)	$V_{(BR)DSX}$	25	—	Vdc
Zero-Gate-Voltage Drain Current ($V_{DS} = 10\ \text{V}$, $V_{GS} = 0$) $T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = 150^\circ\text{C}$	I_{DSS}	— —	10 10	nAdc μAdc
Gate Reverse Current ($V_{GS} = \pm 15\ \text{Vdc}$, $V_{DS} = 0$)	I_{GSS}	—	± 10	pAdc
ON CHARACTERISTICS				
Gate Threshold Voltage ($V_{DS} = 10\ \text{V}$, $I_D = 10\ \mu\text{A}$)	$V_{GS(Th)}$	1.0	5	Vdc
Drain-Source On-Voltage ($I_D = 2.0\ \text{mA}$, $V_{GS} = 10\ \text{V}$)	$V_{DS(on)}$	—	1.0	V
On-State Drain Current ($V_{GS} = 10\ \text{V}$, $V_{DS} = 10\ \text{V}$)	$I_{D(on)}$	3.0	—	mAdc

V_T

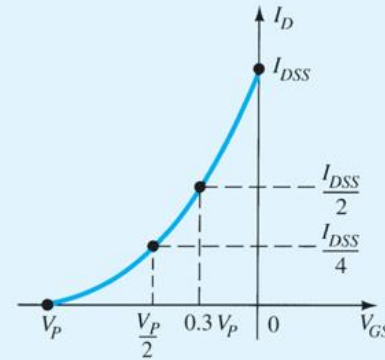


JFET

$$I_G = 0 \text{ A}, I_D = I_S$$

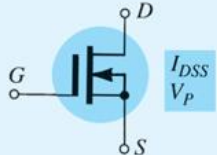


$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$$

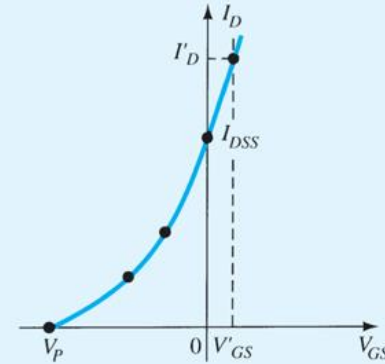


MOSFET(D)

$$I_G = 0 \text{ A}, I_D = I_S$$

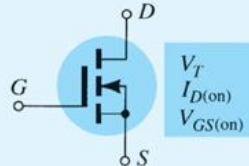


$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$$



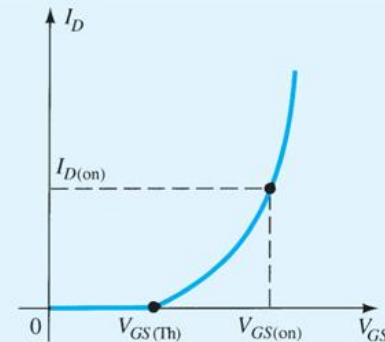
MOSFET(E)

$$I_G = 0 \text{ A}, I_D = I_S$$



$$I_D = k (V_{GS} - V_{GS(Th)})^2$$

$$k = \frac{I_{D(on)}}{(V_{GS(on)} - V_{GS(Th)})^2}$$



Referências Bibliográficas

- ❑ Boylestad, Robert L.; Nashelsky, Louis “Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos”, 6 ed., Rio de Janeiro, LTC (1998).
- ❑ Boylestad, Robert L.; Nashelsky, Louis “Electronic Devices and Circuit Theory”, 11 ed., Boston, Pearson (2013).