



Transistores de Efeito de campo FET - field-effect transistor

Prof. Alceu André Badin

Introdução

FETs *versus* TBJs

- **Similaridades:**

Amplificadores.

Dispositivo para controle de corrente.

Circuitos para casamento de impedância

- **Diferenças:**

FETs são dispositivos controlados por tensão. TBJs são dispositivos controlados por corrente.

FETs têm maior impedância de entrada. TBJs têm ganho mais alto.

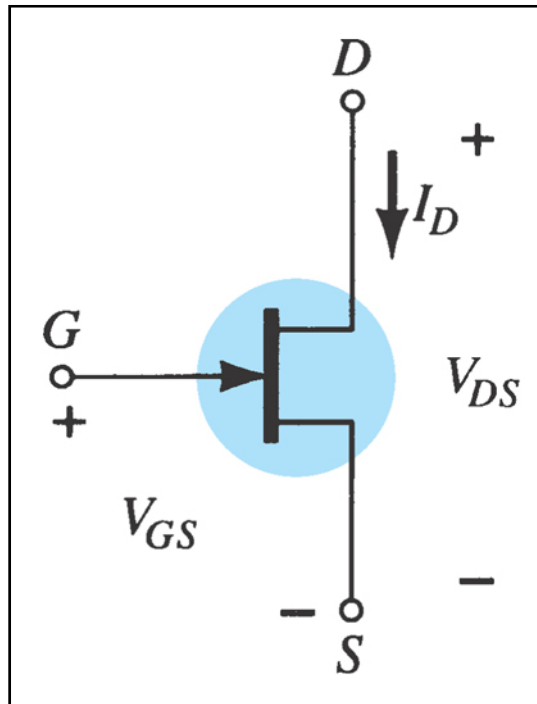
FETs pouco sensíveis a variações de temperatura – mais adequados para circuitos integrados.



Tipos de FET

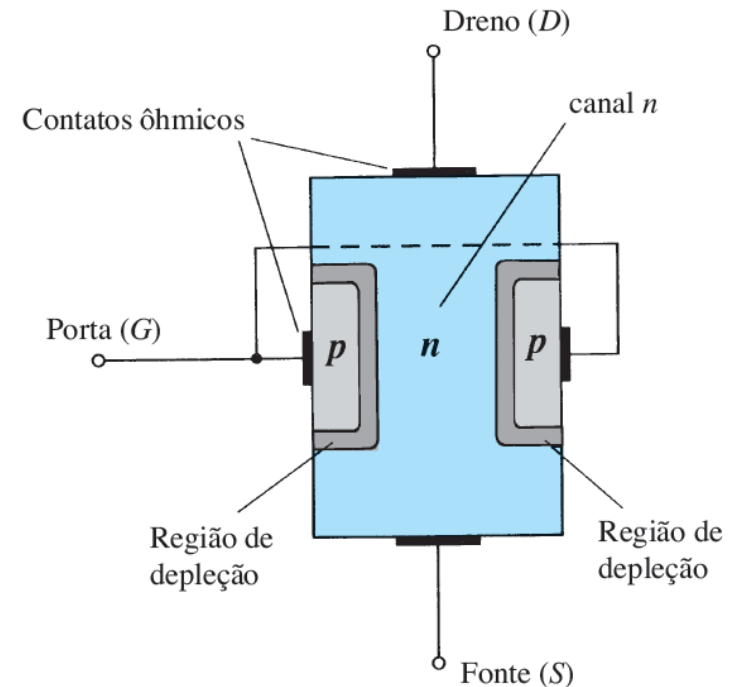
- **JFET:** Junção FET.
- **MOSFET:** Transistores de efeito de campo metal-óxido-semicondutor.
- **D-MOSFET:** MOSFET tipo depleção.
- **E-MOSFET:** MOSFET tipo intensificação.

Símbolos do JFET para o canal n



Construção do JFET

- Há dois tipos de JFETs:
 - de canal n
 - de canal p
- *O canal n é o mais amplamente usado dos dois.*
- **JFETs têm três terminais:**
O **dreno (D)** e a **fonte (S, do inglês *source*)** são conectados pelo canal n
- O **porta (G, do inglês *gate*)** é conectado por material do tipo p .



Características da operação JFET

- condições básicas de operação para um JFET:

$V_{GS} = 0 \text{ V}$, V_{DS} aumentando para um valor positivo

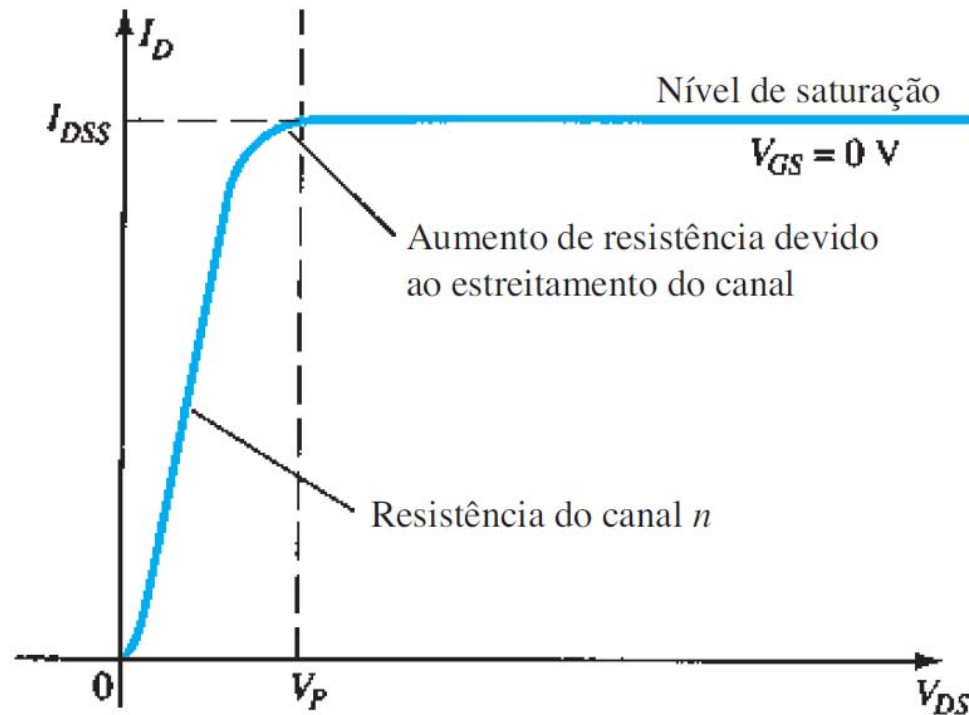
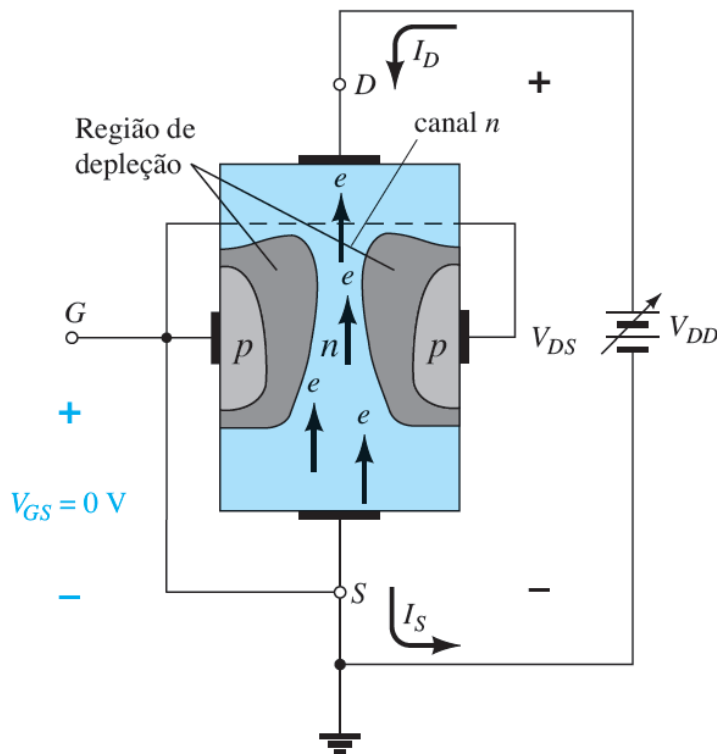
$V_{GS} < 0 \text{ V}$, V_{DS} em algum valor positivo

(Resistor controlado por tensão)



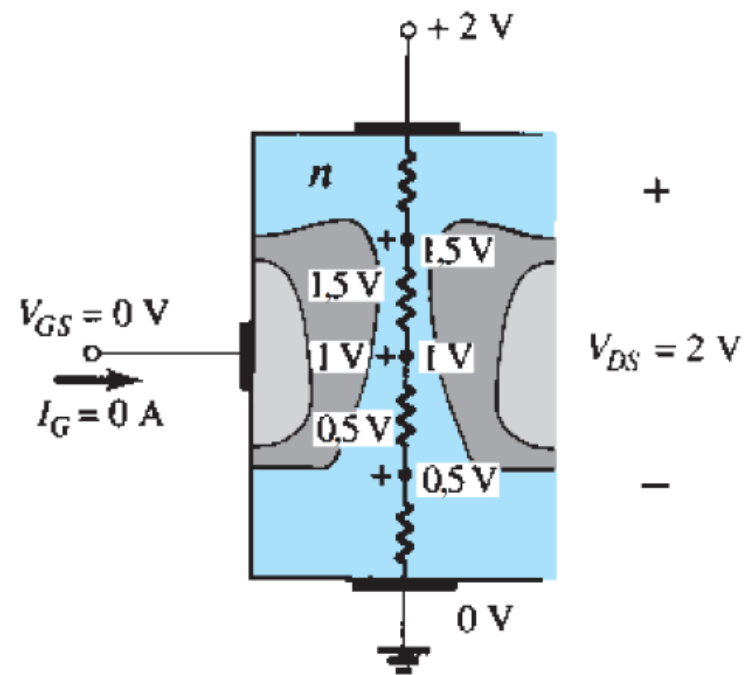
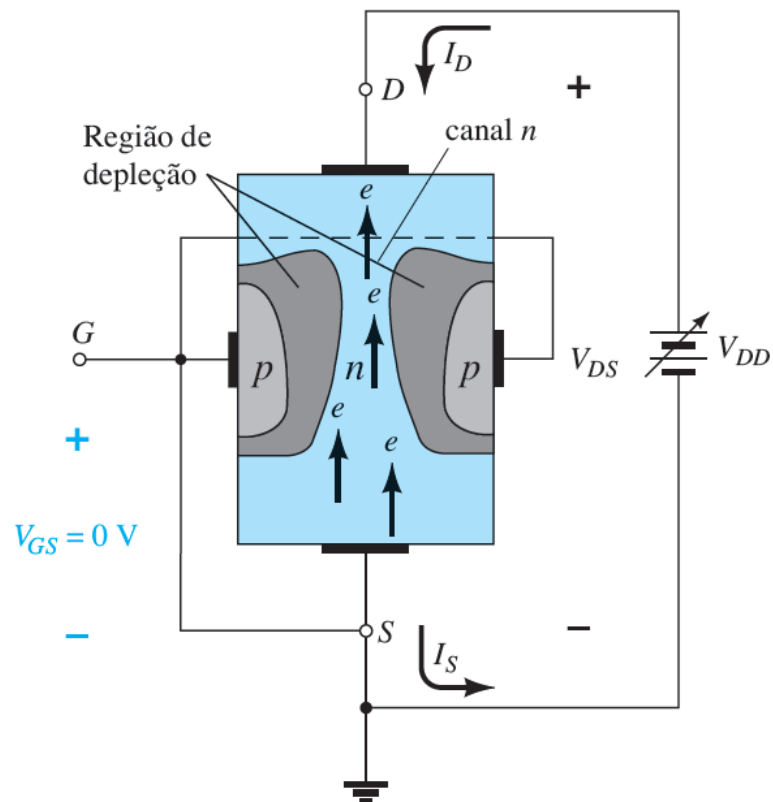
Características do JFET:

- $V_{GS} = 0 \text{ V}$ e a V_{DS} aumenta de 0 V a uma tensão positiva:
 - O tamanho da região de depleção entre a ponta do tipo p e o canal n aumenta e diminui a largura do canal n , que aumenta sua resistência.
 - Resistência do canal n aumenta, I_D ao aumenta porque a V_{DS} está aumentando.



Características do JFET:

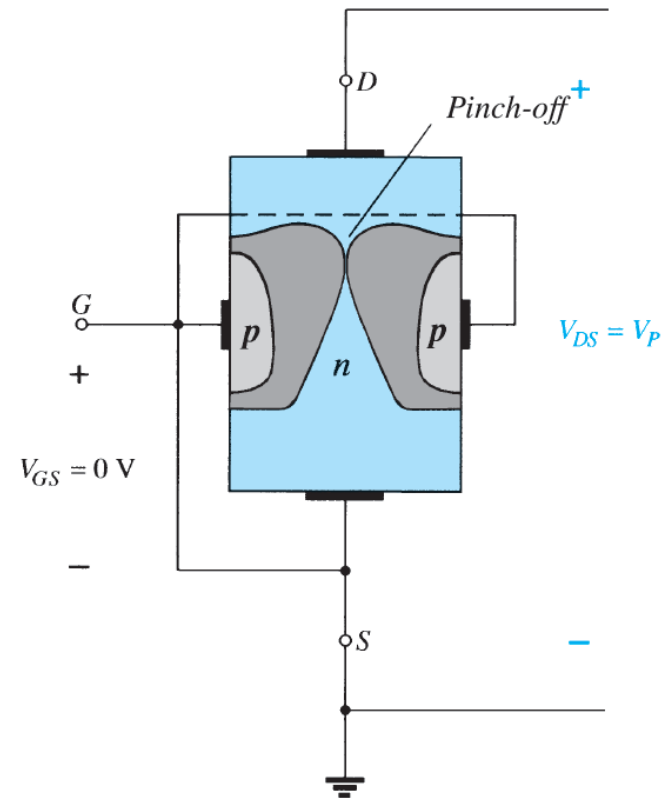
Assimetria da região de depleção



Características do JFET:

pinch-off

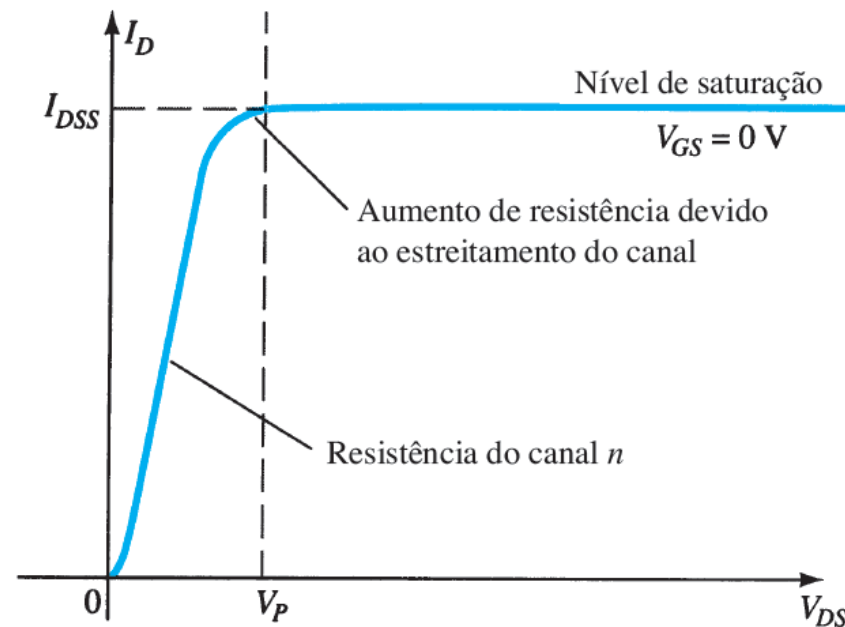
- Se a $V_{GS} = 0$ V e a V_{DS} aumenta continuamente para uma tensão mais positiva, um ponto é alcançado onde a região de depleção fica tão grande que “estrangula” o canal.
- Isso sugere que a corrente no canal (I_D) cai para 0 A, mas isso não acontece: à medida que a V_{DS} aumenta, a I_D também aumenta. Entretanto, uma vez que o *pinch-off* ocorre, aumentos subsequentes na V_{DS} não fazem com que a I_D aumente.



Características do JFET:

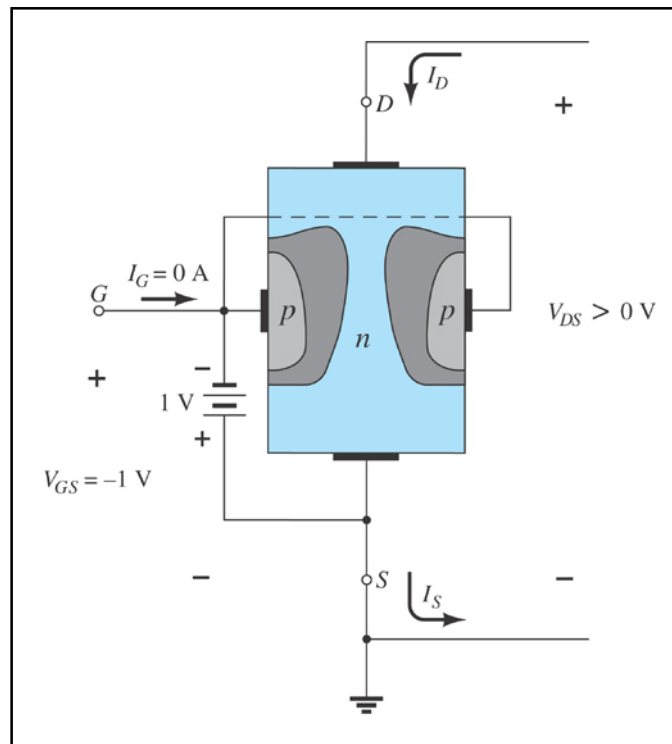
saturação

- *No ponto do pinch-off:*
 - Qualquer aumento adicional da V_{DS} não produz nenhum aumento na I_D . No *pinch-off*, a V_{DS} recebe o nome de V_p .
 - A I_D está em saturação ou em seu valor máximo, e é referida como I_{DSS} .



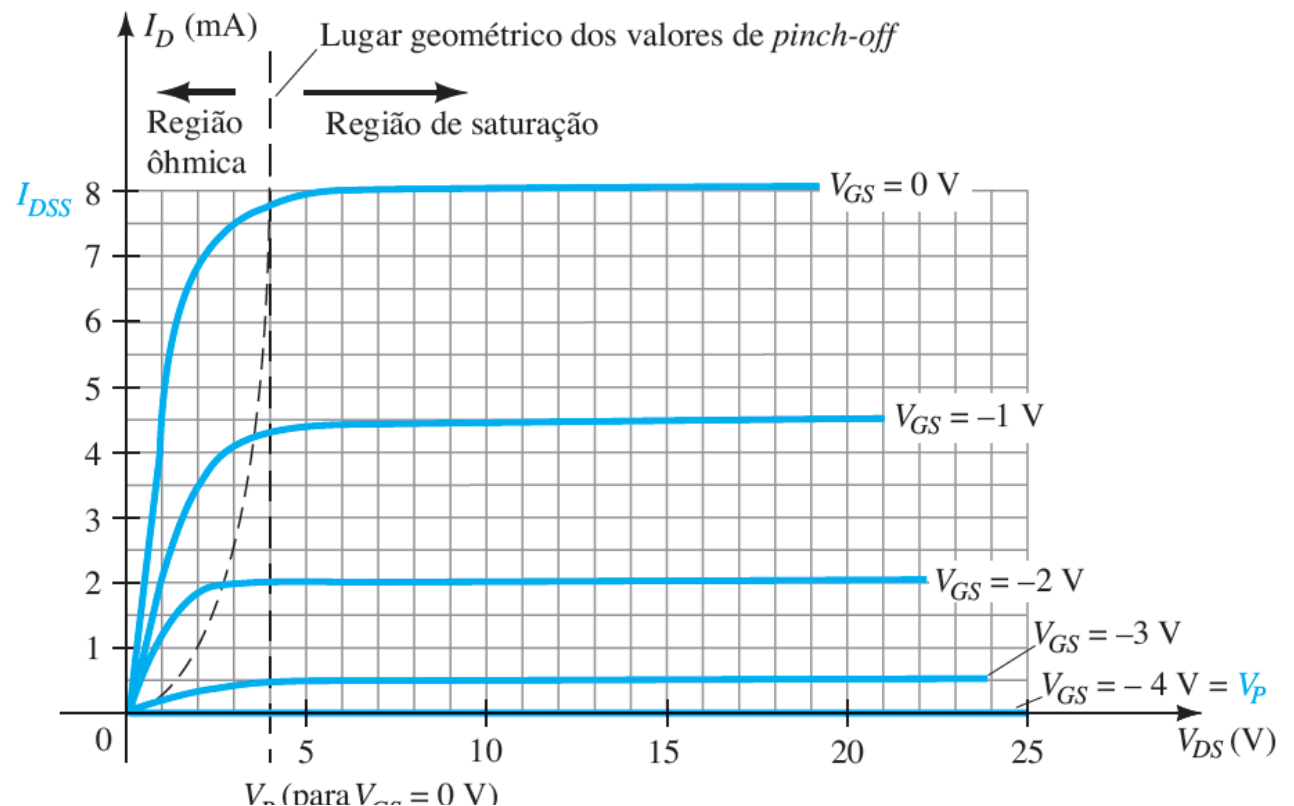
Características de operação da JFET

- À medida que a V_{GS} se torna mais negativa, a região de depleção aumenta.



Características de operação da JFET

- À medida que a V_{GS} se torna mais negativa:
- O JFET passa por um *pinch-off* quando em baixa tensão (V_P).
- A I_D diminui ($I_D < I_{DSS}$) mesmo quando a V_{DS} aumenta.
- A I_D cai, por fim, a 0 A. O valor de V_{GS} que faz com que isso ocorra é denominado $V_{GS(off)}$.

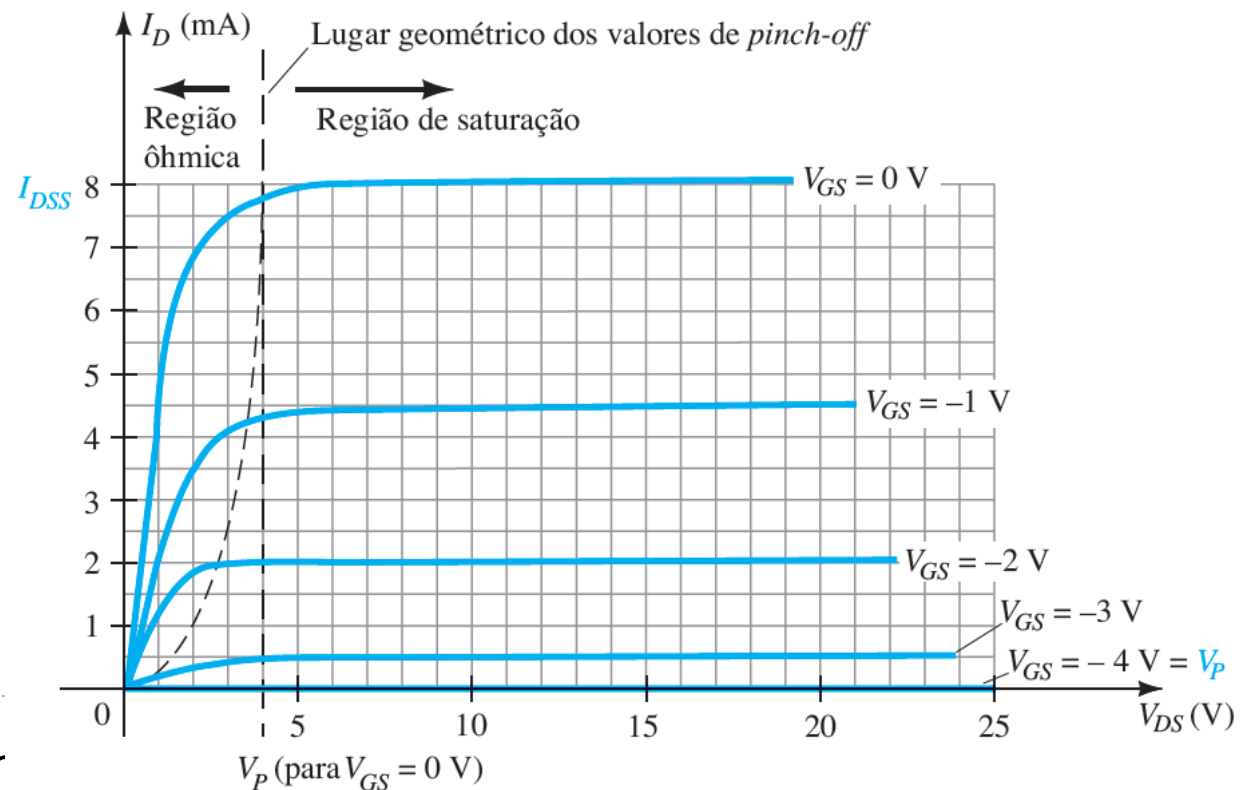


Resistor controlado por tensão

- A região à esquerda do *pinch-off* é chamada de **região ôhmica**.
- O JFET pode ser usado como um resistor variável, no qual a V_{GS} controla a resistência dreno-fonte (r_d).

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

- V_{GS} diminui e a resistência (r_d) aumenta.



Características de transferência do JFET

- *As características de transferência de entrada a saída do JFET não são tão simples quanto as do TBJ.*
- TBJ: β indica a relação entre I_B (entrada) e I_C (saída).
- JFET: a relação entre V_{GS} (entrada) e I_D (saída) é um pouco mais complicada:

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

Gráfico da curva de transferência do JFET

• Utilizando os valores de I_{DSS} e V_p ($V_{GS(\text{desligado})}$) encontrados em uma folha de dados, a curva de transferência pode ser colocada em um gráfico conforme os passos a seguir:

1. Resolvendo a equação para $V_{GS} = 0$ V: $I_D = I_{DSS}$

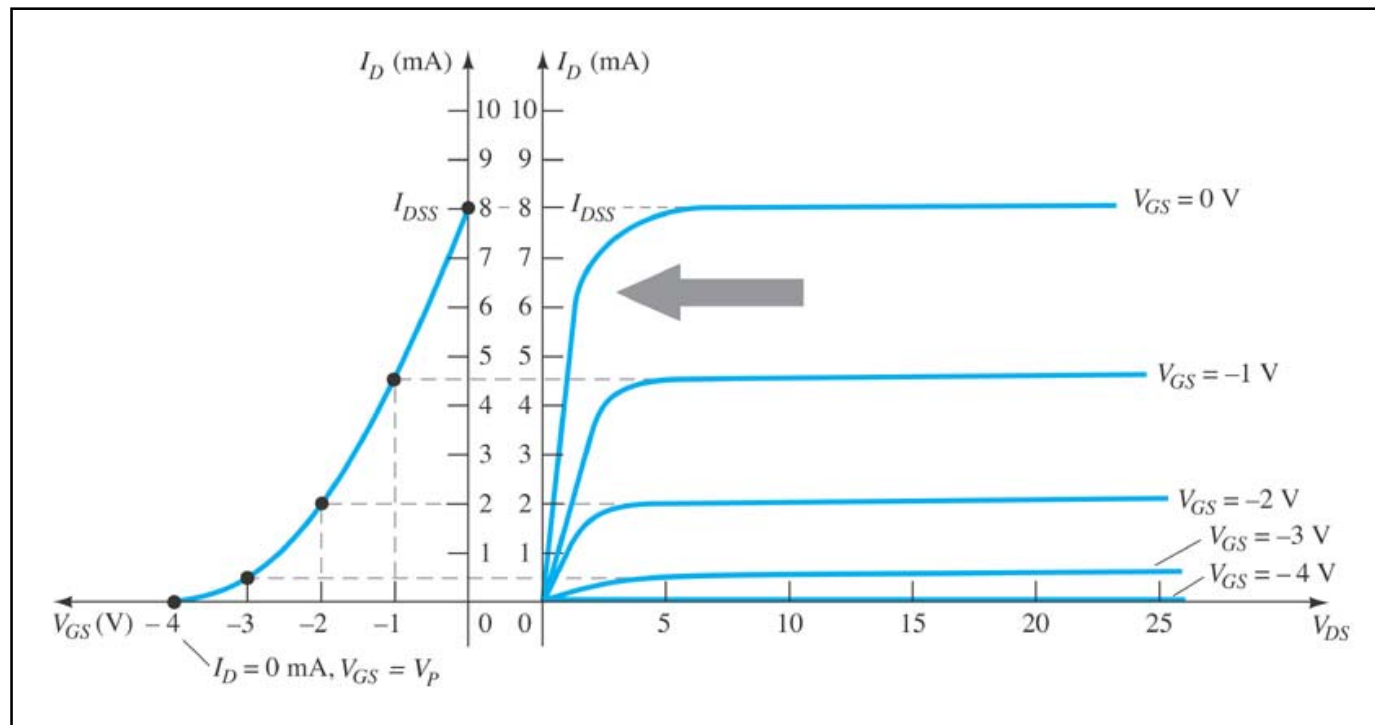
2. Resolvendo a equação para $V_{GS} = V_{GS(\text{desligado})}$: $I_D = 0$ A

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

3. Resolvendo a equação para $V_{GS} = 0$ V to $V_{GS(\text{desligado})}$: $0 \text{ A} < I_D < I_{DSS}$

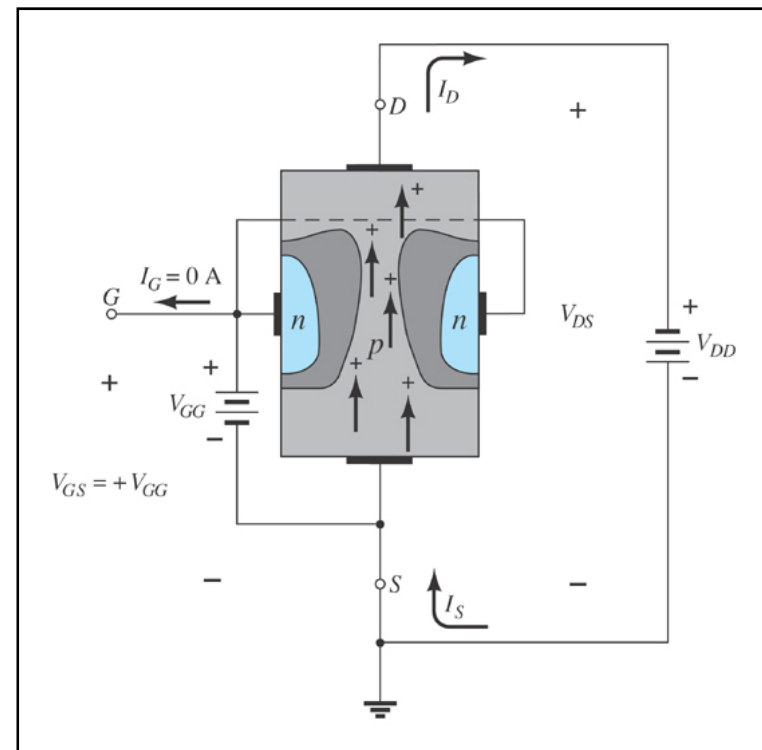
Curva de transferência do JFET

- Este gráfico mostra o valor de I_D para um dado valor de V_{GS} .



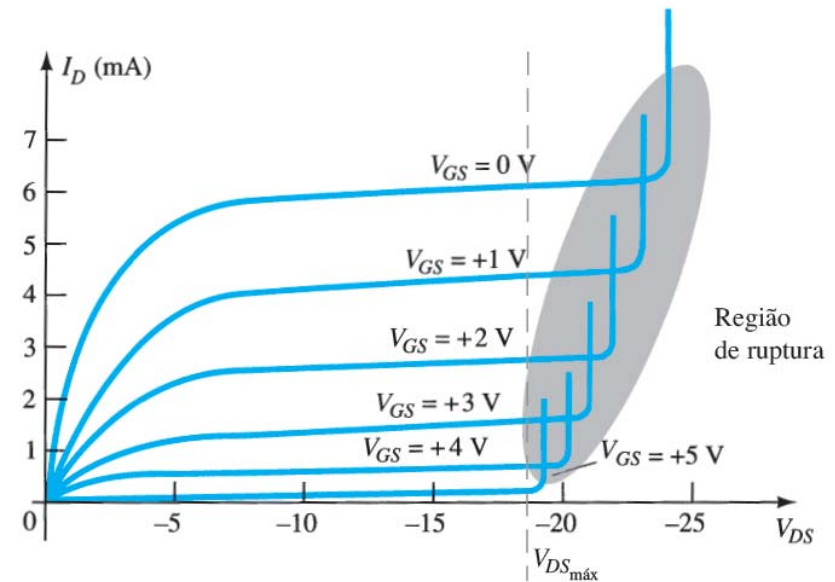
JFETs de canal p

- O JFET de canal p se comporta da mesma forma que o JFET de canal n . A diferenças são que as polaridades de tensão e as direções das correntes são reversas.

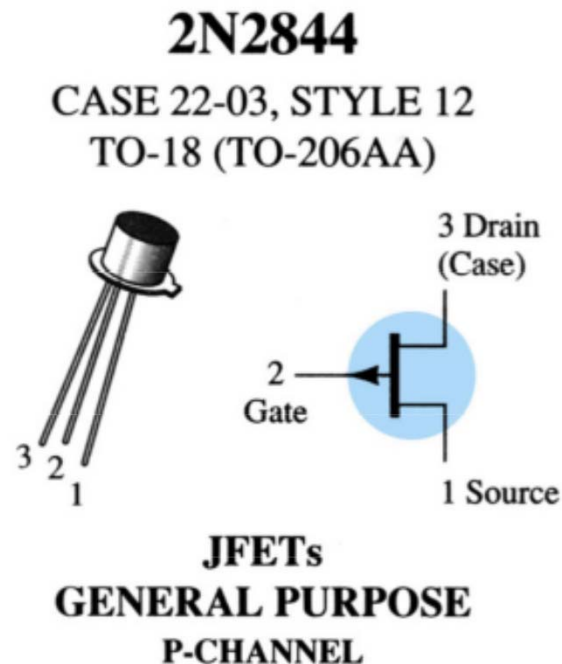


Características do JFET de canal p

- À medida que a V_{GS} se torna mais positiva:
- O JFET passa por um *pinch-off* quando a uma baixa tensão (V_P).
- A região de depleção aumenta, e a I_D diminui ($I_D < I_{DSS}$).
- A I_D cai, por fim, a 0 A (quando $V_{GS} = V_{GSoff}$)
- Observe também que a altos níveis de V_{DS} o JFET atinge uma situação de ruptura: a I_D aumenta incontrolavelmente se $V_{DS} > V_{DSmáx}$.



Encapsulamento e identificação dos terminais

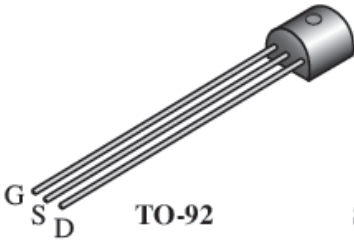


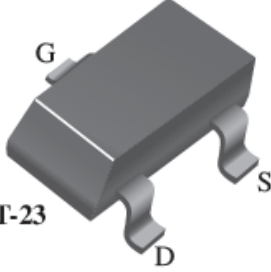
Folha de dados (JFETs)

ESPECIFICAÇÕES MÁXIMAS

Símbolo	Parâmetro	Valor	Unidade
V_{DS}	Tensão dreno-fonte	25	V
V_{DG}	Tensão dreno-porta	25	V
V_{GS}	Tensão porta-fonte	-25	V
I_{GF}	Corrente direta de porta	10	mA
T_j, T_{stg}	Faixa de temperatura da junção para operação e armazenagem	-55 a +150	°C

FAIRCHILD
SEMICONDUCTOR™

2N5457

G S D TO-92

MMBF5457

G S D SOT-23

NOTA: Fonte e dreno são intercambiáveis.

Amplificador de uso geral de canal *n*
Este dispositivo é um amplificador de áudio de baixo nível e transistor de chaveamento que pode ser usado para aplicações de chaveamento analógico.

Folha de dados (JFET)

•Características elétricas

CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ a menos que outro valor seja especificado).

Símbolo	Parâmetro	Condições de teste	Mín.	Típ.	Máx.	Unidade
---------	-----------	--------------------	------	------	------	---------

CARACTERÍSTICAS EM ESTADO DESLIGADO

$V_{(BR)GSS}$	Tensão de ruptura porta-fonte	$I_G = 10 \mu\text{A}, V_{DS} = 0$	-25			V
I_{GSS}	Corrente reversa de porta	$V_{GS} = -15 \text{ V}, V_{DS} = 0$ $V_{GS} = -15 \text{ V}, V_{DS} = 0, T_A = 100^\circ\text{C}$			-1,0 -200	nA nA
$V_{GS(off)}$	Tensão de corte porta-fonte	$V_{DS} = 15 \text{ V}, I_D = 10 \text{ nA}$ 5457	-0,5		-6,0	V
V_{GS}	Tensão porta-fonte	$V_{DS} = 15 \text{ V}, I_D = 100 \mu\text{A}$ 5457		-2,5		V

CARACTERÍSTICAS EM ESTADO LIGADO

I_{DSS}	Corrente de dreno para tensão nula na porta	$V_{DS} = 15 \text{ V}, V_{GS} = 0$ 5457	1,0	3,0	5,0	mA
-----------	---	--	-----	-----	-----	----

CARACTERÍSTICAS DE PEQUENO SINAL

g_{fs}	Condutância de transferência direta	$V_{DS} = 15 \text{ V}, V_{GS} = 0, f = 1,0 \text{ kHz}$ 5457	1000		5000	μmhos
g_{os}	Condutância de saída	$V_{DS} = 15 \text{ V}, V_{GS} = 0, f = 1,0 \text{ MHz}$		10	50	μmhos
C_{iss}	Capacitância de entrada	$V_{DS} = 15 \text{ V}, V_{GS} = 0, f = 1,0 \text{ MHz}$		4,5	7,0	pF
C_{rss}	Capacitância de transferência reversa	$V_{DS} = 15 \text{ V}, V_{GS} = 0, f = 1,0 \text{ MHz}$		1,5	3,0	pF
NF	Figura de ruído	$V_{DS} = 15 \text{ V}, V_{GS} = 0, f = 1,0 \text{ kHz},$ $R_G = 1,0 \text{ megohm}, BW = 1,0 \text{ Hz}$			3,0	dB

(a)

JFET X BJT - resumo

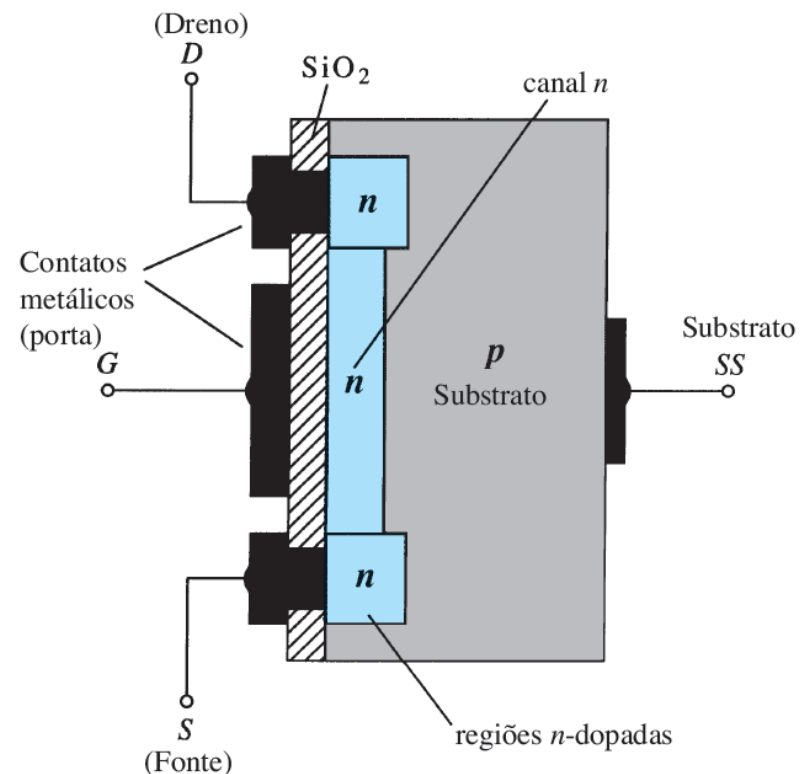
<i>JFET</i>		<i>TBJ</i>
$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2$	\Leftrightarrow	$I_C = \beta I_B$
$I_D = I_S$	\Leftrightarrow	$I_C \cong I_E$
$I_G \cong 0 \text{ A}$	\Leftrightarrow	$V_{BE} \cong 0,7 \text{ V}$

MOSFETs

- MOSFETs têm características similares às dos JFETs e características adicionais que fazem deles muito úteis.
- Há dois tipos de MOSFETs:
 - **Tipo depleção**
 - **Tipo intensificação**

Construção do MOSFET tipo depleção

- O **dreno (D)** e a **fonte (S)** se conectam às regiões de tipo n . Essas regiões estão conectadas pelo canal n . Esse canal n está conectado à **Porta (G)** por uma fina camada isolante de dióxido de silício (SiO_2).
- O material de tipo n fica sobre um substrato de tipo p que pode ter uma conexão terminal adicional chamada de **substrato (SS)**.

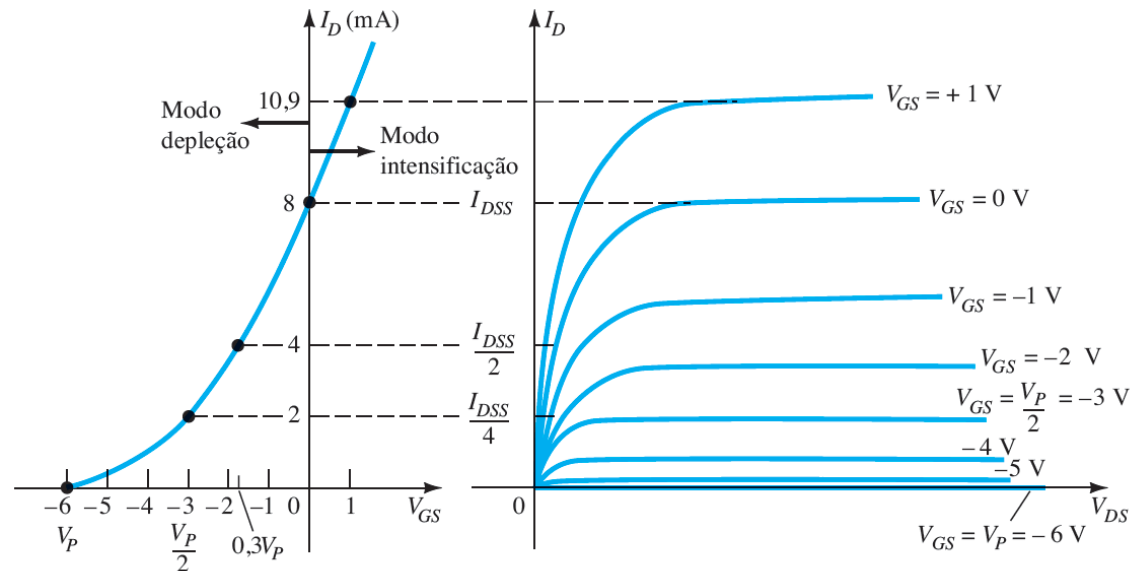


Operação MOSFET básica

- Uma MOSFET tipo depleção pode operar de dois modos:

- **Modo depleção**

- **Modo intensificação**

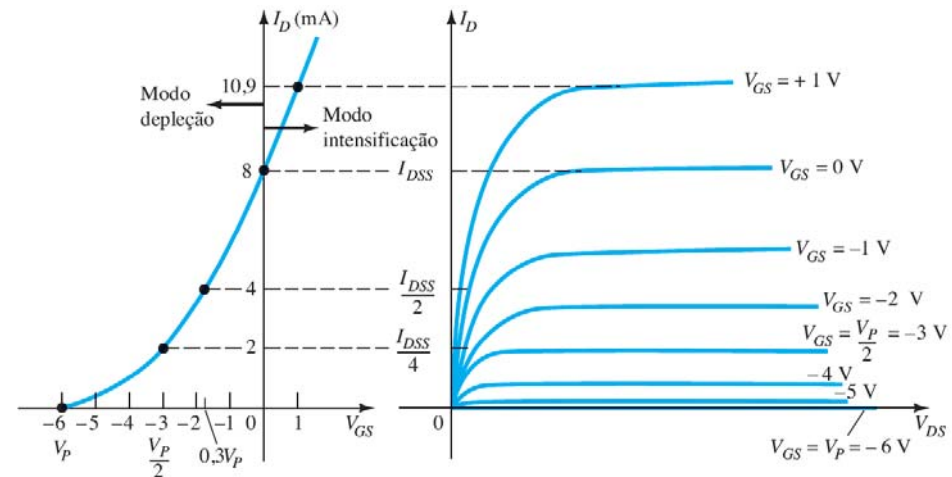


Operação no modo depleção (D-MOSFET)

- As características são similares às do JFET.

Quando $V_{GS} = 0 \text{ V}$, $I_D = I_{DSS}$

Quando $V_{GS} < 0 \text{ V}$, $I_D < I_{DSS}$



- A fórmula utilizada para colocar em gráfica a curva de transferência para um JFET também se aplica ao D-MOSFET:

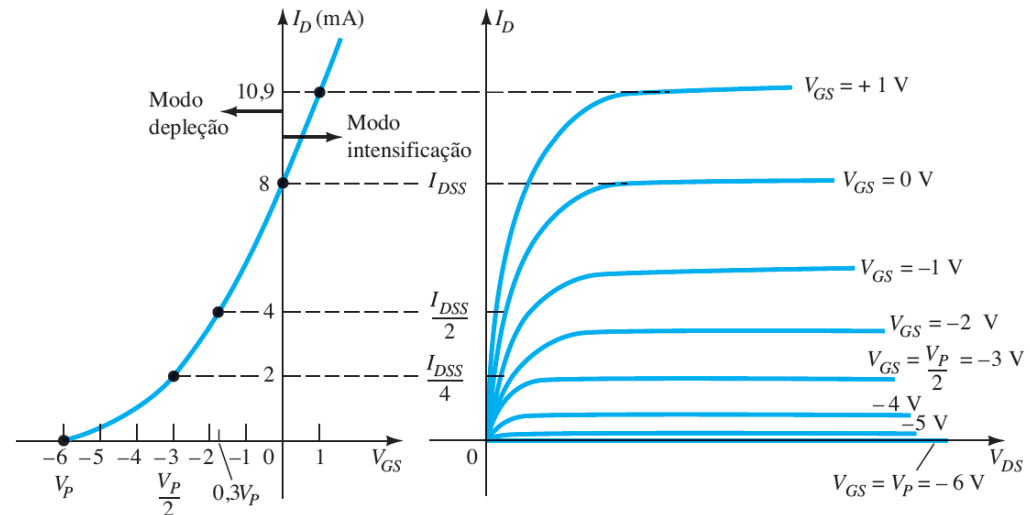
$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2$$

Operação no modo intensificação (D-MOSFET)

$V_{GS} > 0$ V, a I_D aumenta além da I_{DSS} ($I_D > I_{DSS}$)

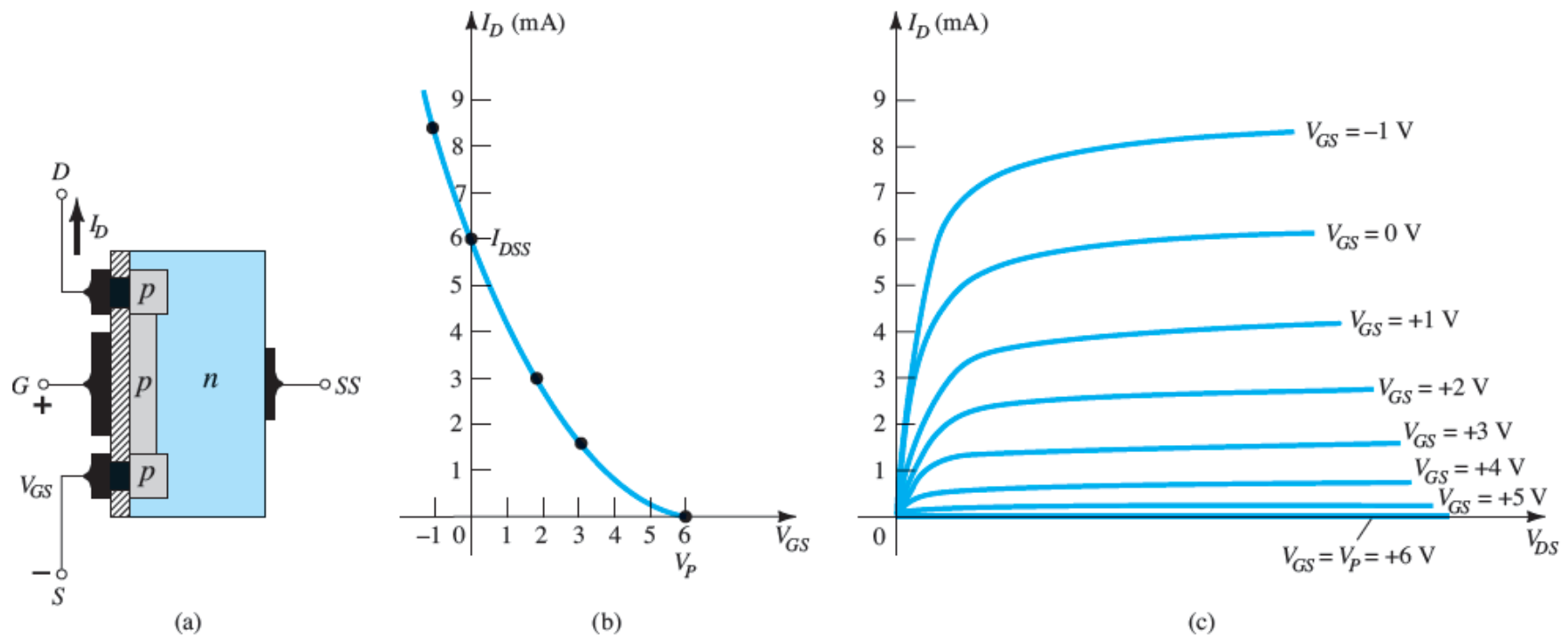
- A fórmula utilizada para transformar em gráfico a curva de transferência ainda se aplica:

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

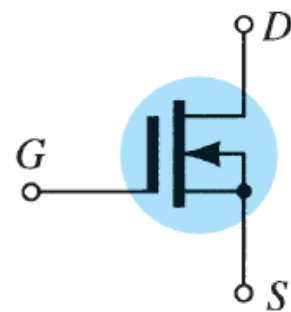
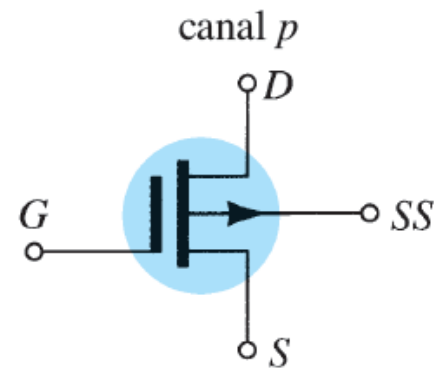
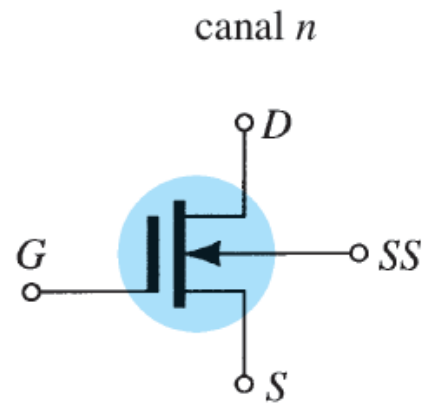


- Observe que a V_{GS} é positiva agora

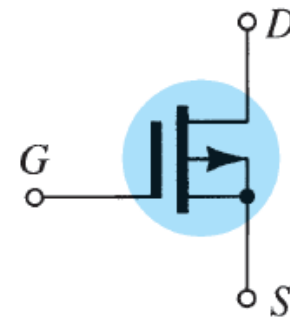
MOSFET tipo depleção de canal p



Símbolos de MOSFET tipo *D*



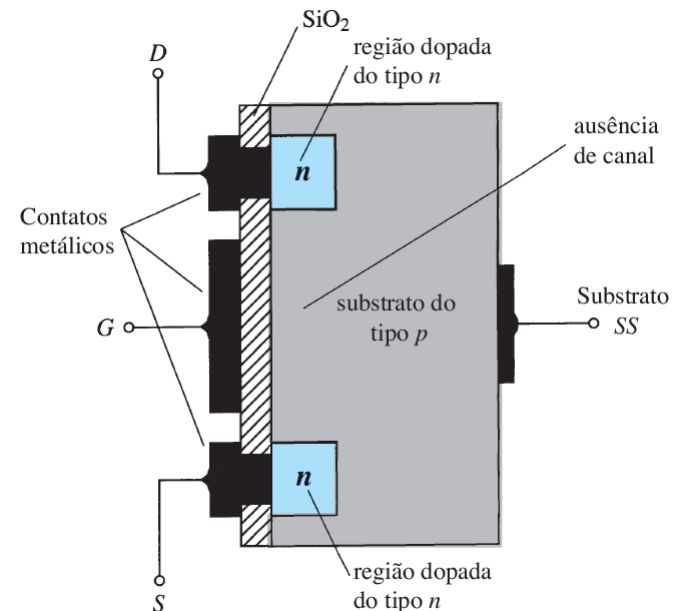
(a)



(b)

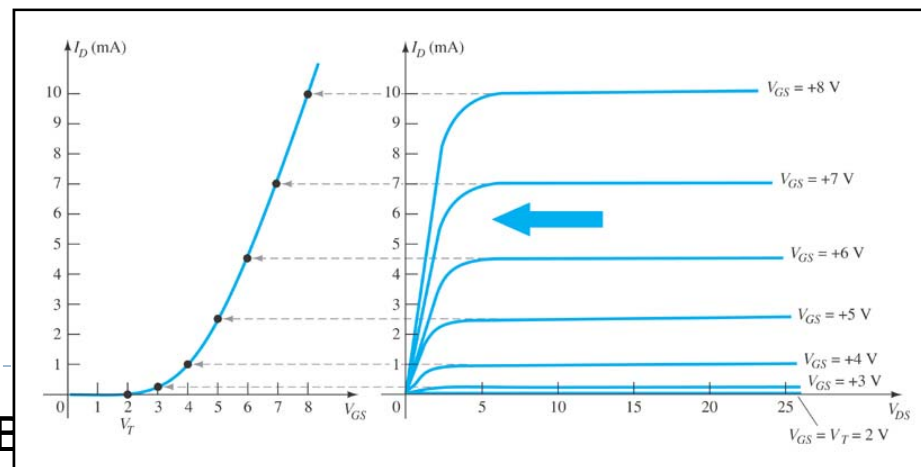
Construção do MOSFET tipo intensificação

- O **dreno (D)** e a **Fonte (S)** se conectam às regiões de tipo *n*. Essas regiões são conectadas por um canal *n*.
- A **Porta (G)** se conecta ao substrato tipo *p* por uma fina camada isolante de dióxido de silício (SiO_2).
- Não há canal.
- O material de tipo *n* *fica* sobre um substrato tipo *p* que pode ter uma conexão terminal chamada de **Substrato (SS)**.



Operação MOSFET tipo intensificação

- O MOSFET tipo intensificação (E-MOSFET) opera somente no modo intensificação.
- V_{GS} é sempre positiva.
- À medida que a V_{GS} aumenta, a I_D aumenta.
- À medida que a V_{GS} se mantém constante e a V_{DS} é aumentada, a I_D satura (I_{DSS}) e o nível de saturação (V_{DSsat}) é alcançado.



Curva de transferência do MOSFET tipo intensificação

Para determinar a I_D dada a V_{GS} :

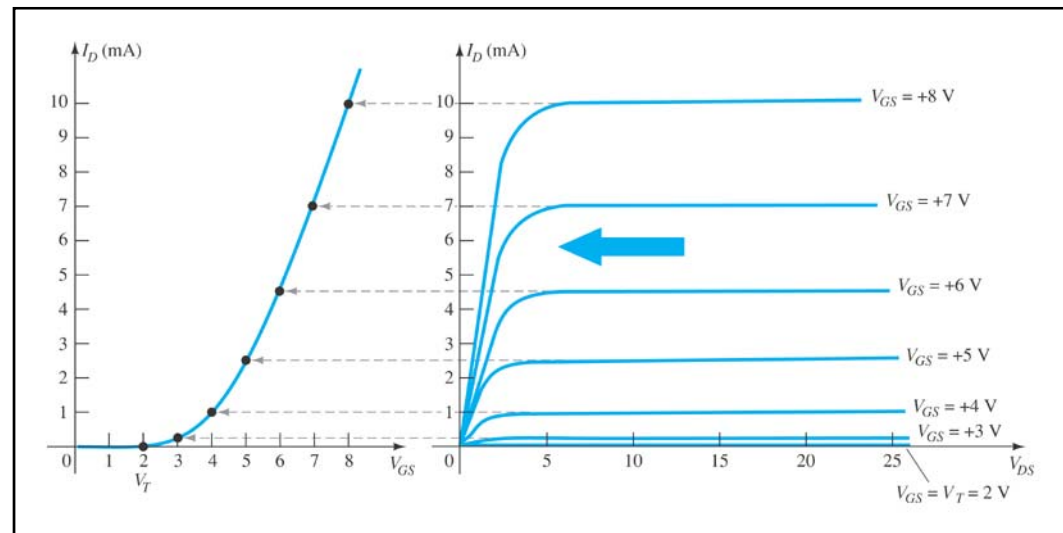
$$I_D = k(V_{GS} - V_T)^2$$

onde:

V_T = a tensão limiar do E-MOSFET

k , uma constante, pode ser determinada com a utilização de valores de um ponto específico e a fórmula:

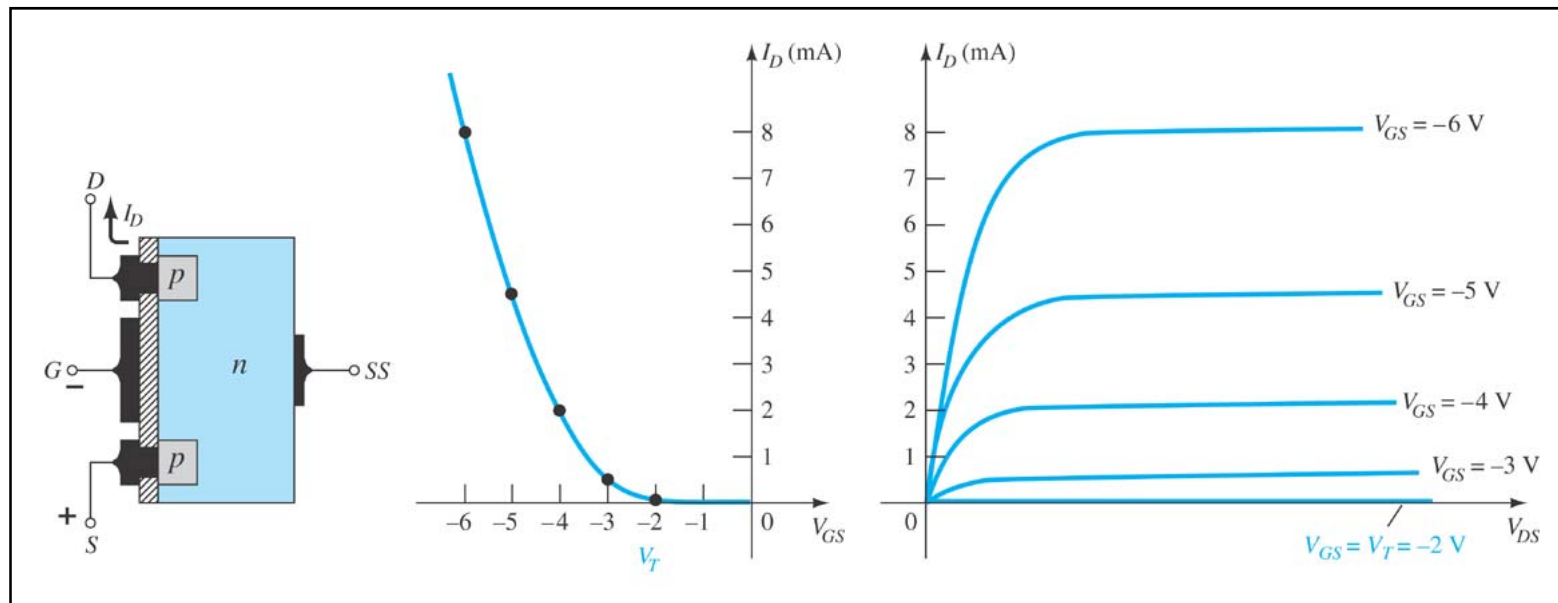
$$k = \frac{I_{D(ON)}}{(V_{GS(ON)} - V_T)^2}$$



V_{DSsat} pode ser calculada utilizando-se:

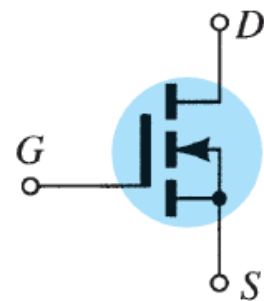
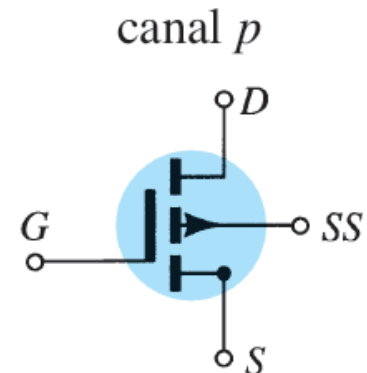
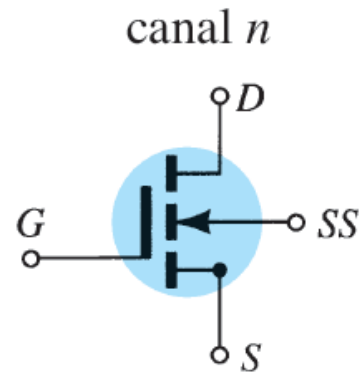
$$V_{DSsat} = V_{GS} - V_T$$

MOSFETs tipo intensificação de canal p

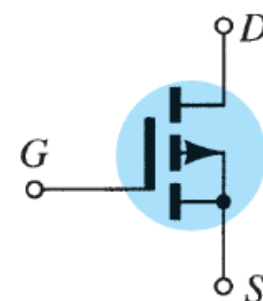


- O MOSFET tipo intensificação de canal p é similar à sua cópia de canal n , exceto pelo fato que as polaridades de tensão e as correntes são reversas.

Símbolos MOSFET



(a)



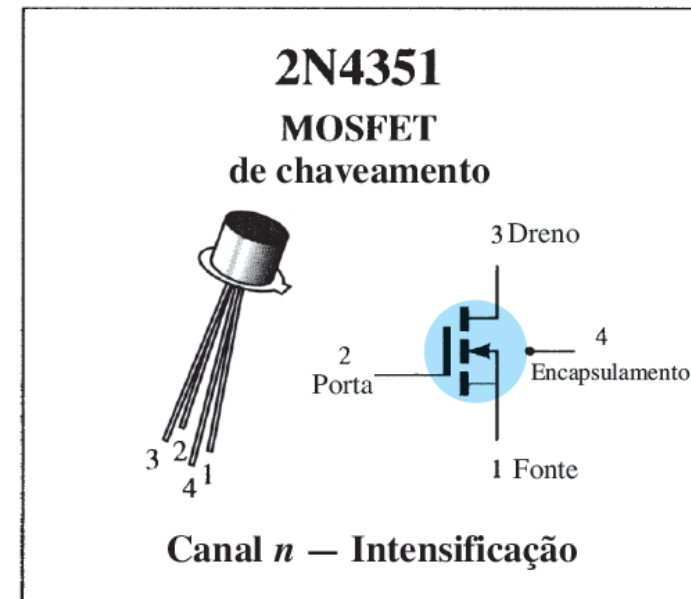
(b)

Folha de dados

ESPECIFICAÇÕES MÁXIMAS

Especificações	Símbolo	Valor	Unidade
Tensão dreno-fonte	V_{DS}	25	V_{CC}
Tensão dreno-porta	V_{DG}	30	V_{CC}
Tensão porta-fonte*	V_{GS}	30	V_{CC}
Corrente de dreno	I_D	30	mA_{CC}
Dissipação total do dispositivo @ $T_A = 25^\circ C$	P_D	300	mW
Fator de redução acima de $25^\circ C$		1,7	$mW/^\circ C$
Faixa de temperatura da junção	T_J	175	$^\circ C$
Faixa de temperatura do canal para armazenamento	T_{stg}	-65 a +175	$^\circ C$

* Potenciais transitórios de ± 75 V não causam falha na função porta-óxido.



more...

Folha de dados

• Características elétricas

CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ a menos que outro valor seja especificado)

Características	Símbolo	Mín.	Máx.	Unidade
-----------------	---------	------	------	---------

CARACTERÍSTICAS EM ESTADO DESLIGADO

Tensão de ruptura dreno-fonte ($I_D = 10\ \mu\text{A}$, $V_{GS} = 0$)	$V_{(BR)DSX}$	25	–	V_{CC}
Corrente de dreno para tensão nula na porta ($V_{DS} = 10\ \text{V}$, $V_{GS} = 0$) $T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = 150^\circ\text{C}$	I_{DSS}	– –	10 10	nA_{CC} μA_{CC}
Corrente reversa de porta ($V_{GS} = \pm 15\ V_{CC}$, $V_{DS} = 0$)	I_{GSS}	–	± 10	pA_{CC}

CARACTERÍSTICAS EM ESTADO LIGADO

Tensão de limiar da porta ($V_{DS} = 10\ \text{V}$, $I_D = 10\ \mu\text{A}$)	$V_{GS(Th)}$	1,0	5	V_{CC}
Tensão de estado ligado dreno-fonte ($I_D = 2,0\ \text{mA}$, $V_{GS} = 10\ \text{V}$)	$V_{DS(ligado)}$	–	1,0	V
Corrente de dreno no estado ligado ($V_{GS} = 10\ \text{V}$, $V_{DS} = 10\ \text{V}$)	$I_{D(ligado)}$	3,0	–	mA_{CC}

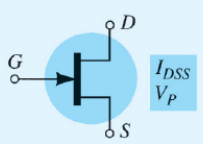
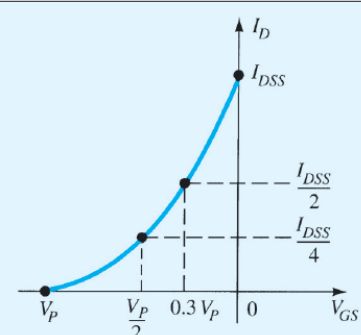
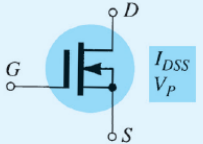
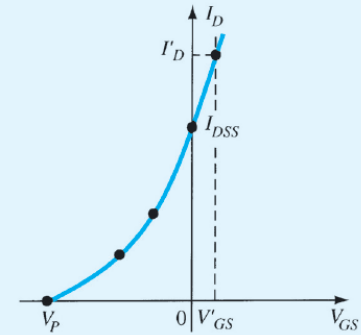
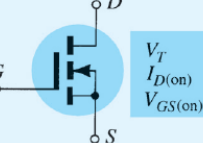
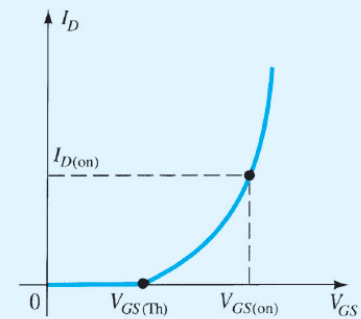
CARACTERÍSTICAS DE PEQUENO SINAL

Admitância de transferência direta ($V_{DS} = 10\ \text{V}$, $I_D = 2,0\ \text{mA}$, $f = 1,0\ \text{kHz}$)	$ y_{fs} $	1000	–	μmho
Capacitância de entrada ($V_{DS} = 10\ \text{V}$, $V_{GS} = 0$, $f = 140\ \text{kHz}$)	C_{iss}	–	5,0	pF
Capacitância reversa de transferência ($V_{DS} = 0$, $V_{GS} = 0$, $f = 140\ \text{kHz}$)	C_{rss}	–	1,3	pF
Capacitância substrato-dreno ($V_{D(SUB)} = 10\ \text{V}$, $f = 140\ \text{kHz}$)	$C_{d(sub)}$	–	5,0	pF
Resistência dreno-fonte ($V_{GS} = 10\ \text{V}$, $I_D = 0$, $f = 1,0\ \text{kHz}$)	$r_{ds(ligado)}$	–	300	ohms

CARACTERÍSTICAS DE CHAVEAMENTO

Atraso de ligamento (Fig. 5)	$I_D = 2,0\ \text{mA}_{CC}$, $V_{DS} = 10\ V_{CC}$, ($V_{GS} = 10\ V_{CC}$) (Veja a Figura 9; circuito de tempo determinado)	t_{d1}	–	45	ns
Tempo de subida (Fig. 6)		t_r	–	65	ns
Atraso de desligamento (Fig. 7)		t_{d2}	–	60	ns
Tempo de queda (Figura 8)		t_f	–	100	ns

Tabela-resumo

Símbolo e relações básicas	Curva de transferência
$I_G = 0 \text{ A}, I_D = I_S$  $I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$	
$I_G = 0 \text{ A}, I_D = I_S$  $I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$	
$I_G = 0 \text{ A}, I_D = I_S$  $I_D = k (V_{GS} - V_{GS(Th)})^2$ $k = \frac{I_{D(on)}}{(V_{GS(on)} - V_{GS(Th)})^2}$	

Manuseio de MOSFETs

- MOSFETs são muito sensíveis à eletricidade estática.
- Por causa da camada muito fina de SiO_2 entre os terminais externos e das camadas do dispositivo, nenhuma descarga elétrica pequena pode produzir uma condução indesejada.

- **Proteção**

- Sempre carregue-o em uma bolsa sensível a estática.
- Utilize pulseiras anti estática ao manusear componentes sensíveis.
- Coloque dispositivos de tensão limitada entre a ponta e a fonte, como diodos Zener, para limitar qualquer tensão transiente.