



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SUDESTE DO PARÁ - UNIFESSPA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E ENGENHARIAS - IGE
FACULDADE DE COMPUTAÇÃO E ENG. ELÉTRICA – FACEEL
CURSO ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

Microeletrônica

Prof. José Carlos Da Silva

jcdsilv@hotmail.com

jose-carlos.silva@unifesspa.edu.br

whatsApp: 19-993960156

Setembro/2021

Conteúdo

- Introdução;
- Familiarizar-se com as características estruturais e operacionais de transistores de efeito de campo de junção (JFET) e transistores de efeito de campo metal-óxido-semicondutor (MOSFET).
- Ser capaz de esboçar as características de transferência a partir das curvas características de dreno dos transistores JFET e MOSFET.
- Compreender as informações principais fornecidas em uma folha de dados para cada tipo de FET.
- Conhecer as diferenças entre as análises CC dos vários tipos de FET.

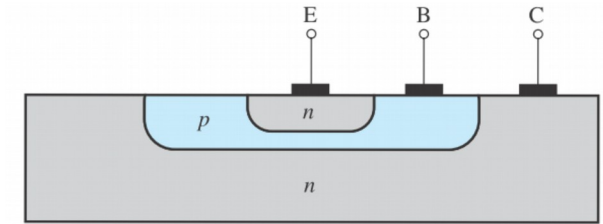
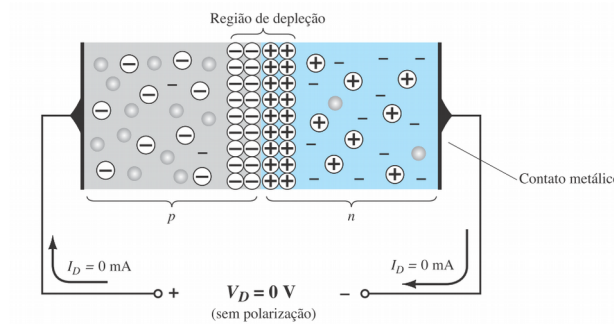
Introdução

Vacuum Tube Op-Amps

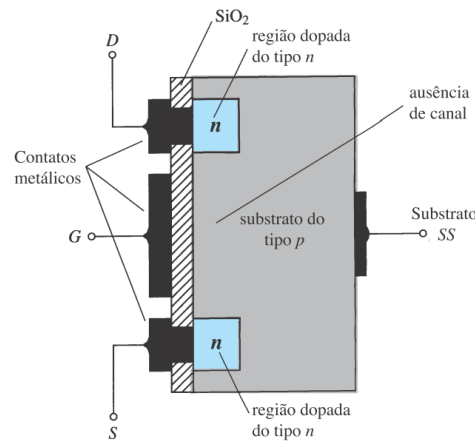
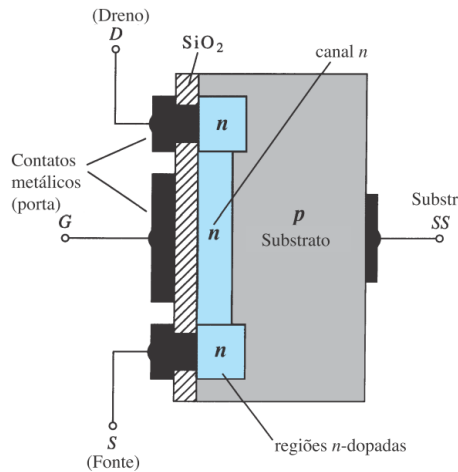
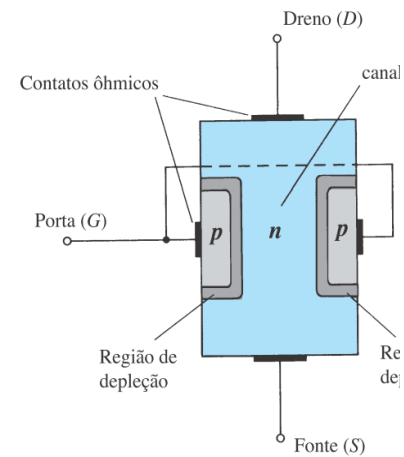
- First op amps built in 1930's-1940's
 - Technically feedback amplifiers due to only having one useable input
- Used in WWII to help how to strike military targets
 - Buffers, summers, differentiators, inverters
- Took $\pm 300V$ to $\pm 100V$ to power



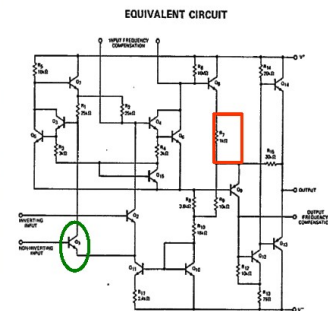
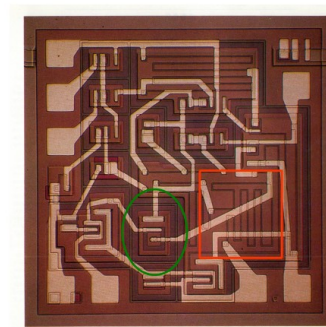
http://en.wikipedia.org/wiki/Image:K2-W_vacuum_tube_op-amp.jpg



Cross section of an npn BJT.



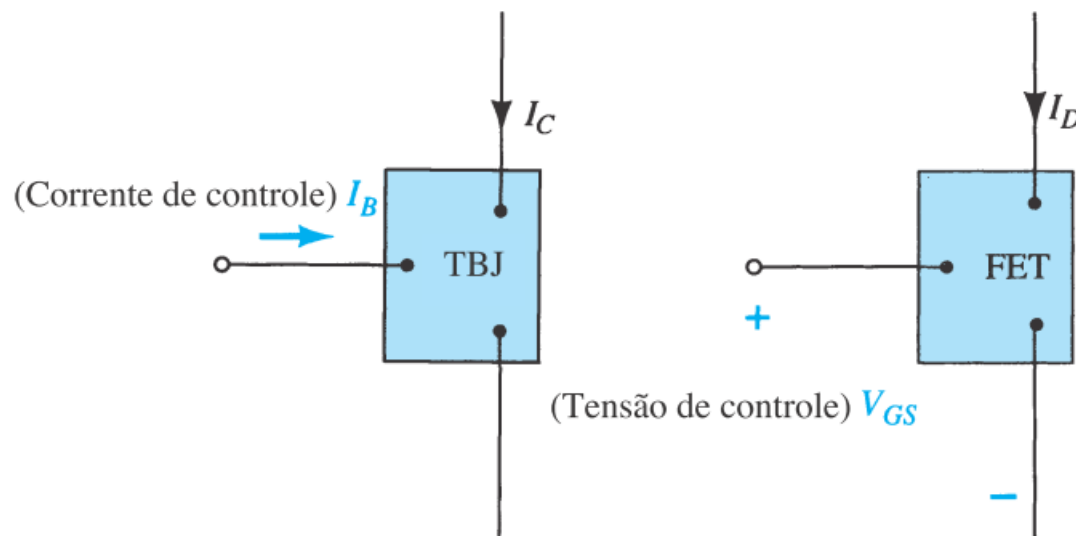
(Exemplos de AmpOp - 1964 - Op-Amp A702, Fairchild)



Referência: Notas de Aulas do Prof. Wilhelmus Van Noije

Transistor Efeito de Campo (FET)

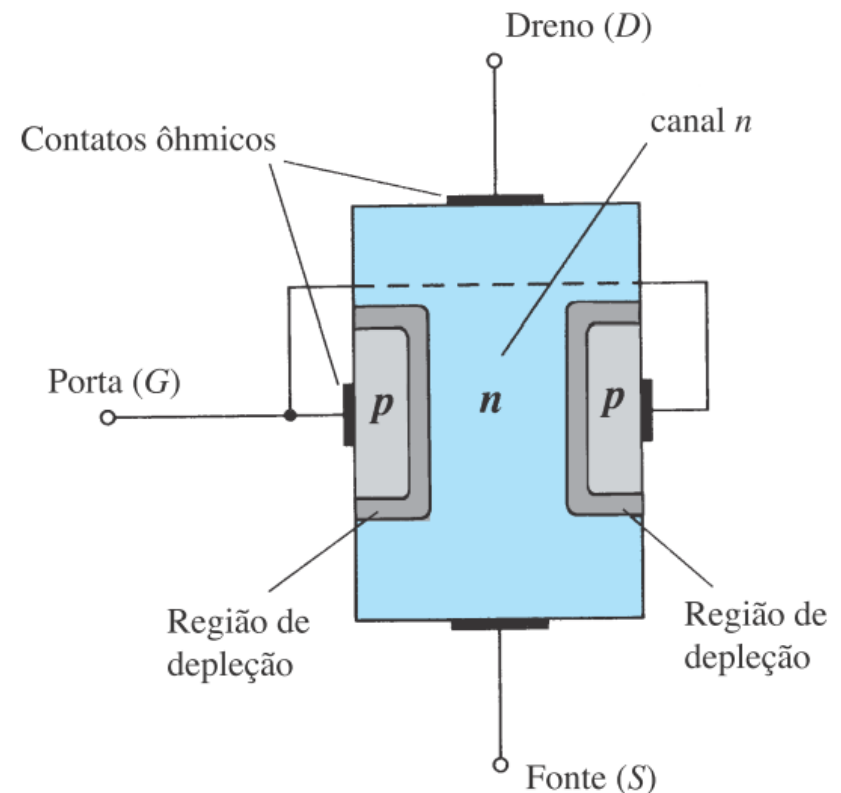
- Principais diferenças entre BJT x FET:
 - BJT é um dispositivo controlado por corrente;
 - FET é um dispositivo controlado por tensão;
 - FET tem maior impedância de entrada que o BJT;
 - O ganho AC do BJT é maior que o ganho do FET;
 - O FET é mais estável em relação a temperatura e menores que o BJT, assim muito utilizados em aplicações de eletrônica digital.



Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) (Construção)

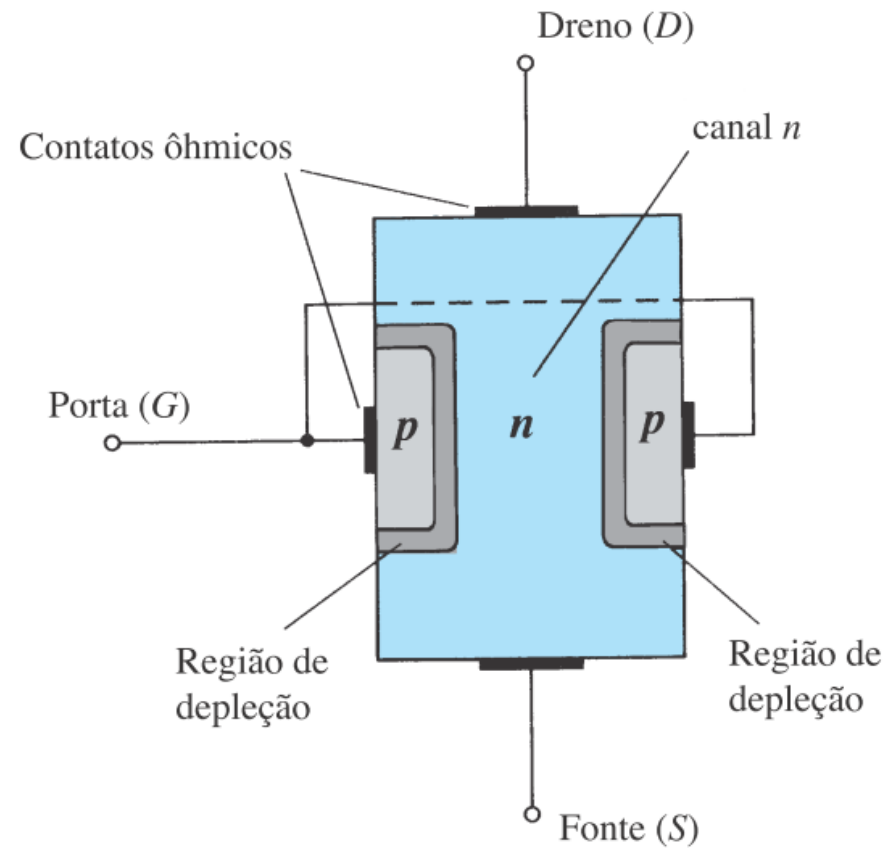
Formação:

- Terminal Dreno (D) ou Drain (D);
- Terminal Fonte (S) ou Source (S);
- Terminal Porta (G) ou Gate (G);
- Camada formada pelos materiais tipo P e tipo N;
- Sendo denominados transistores De J-FET do tipo Canal N ou Canal P.



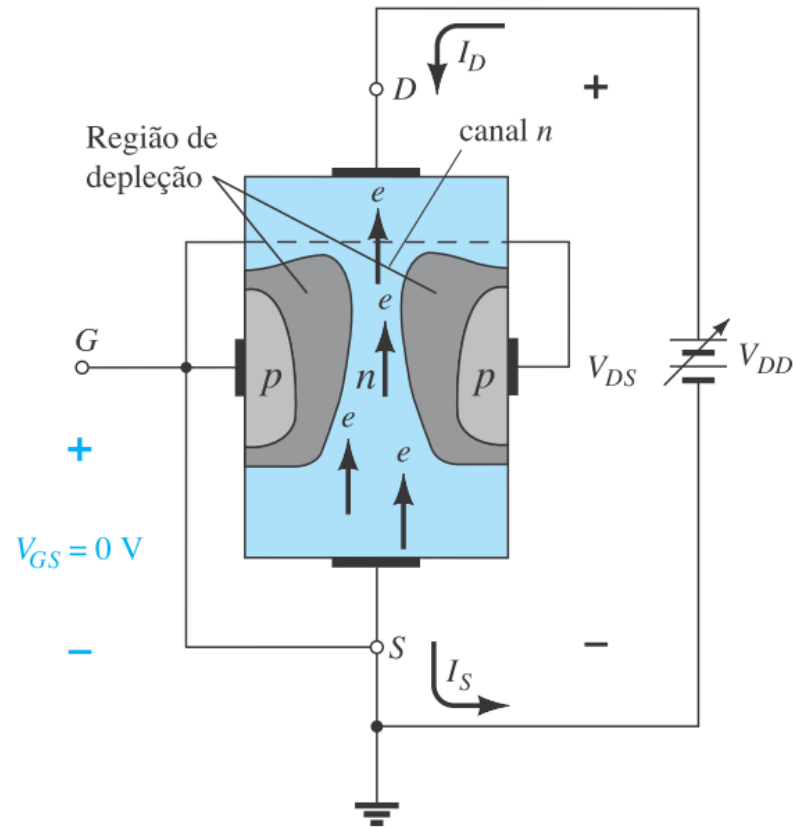
Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) (Operação)

- $V_{GS}=0V$, $V_{DS}=0$



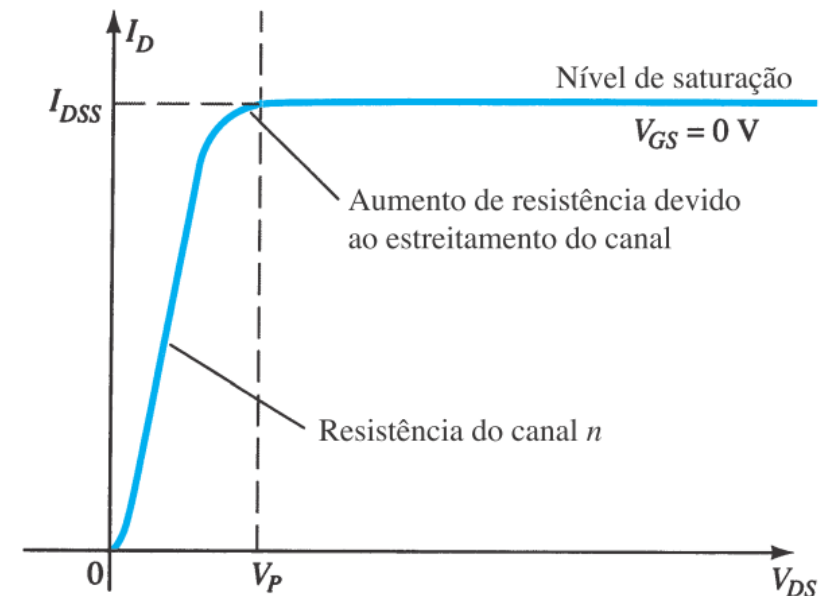
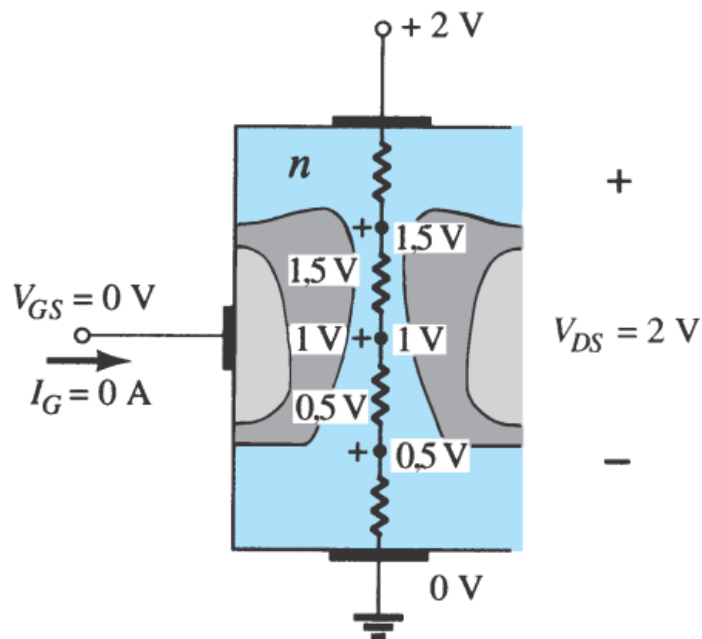
Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) (Operação)

- $V_{GS}=0V$, $V_{DS} > 0V$



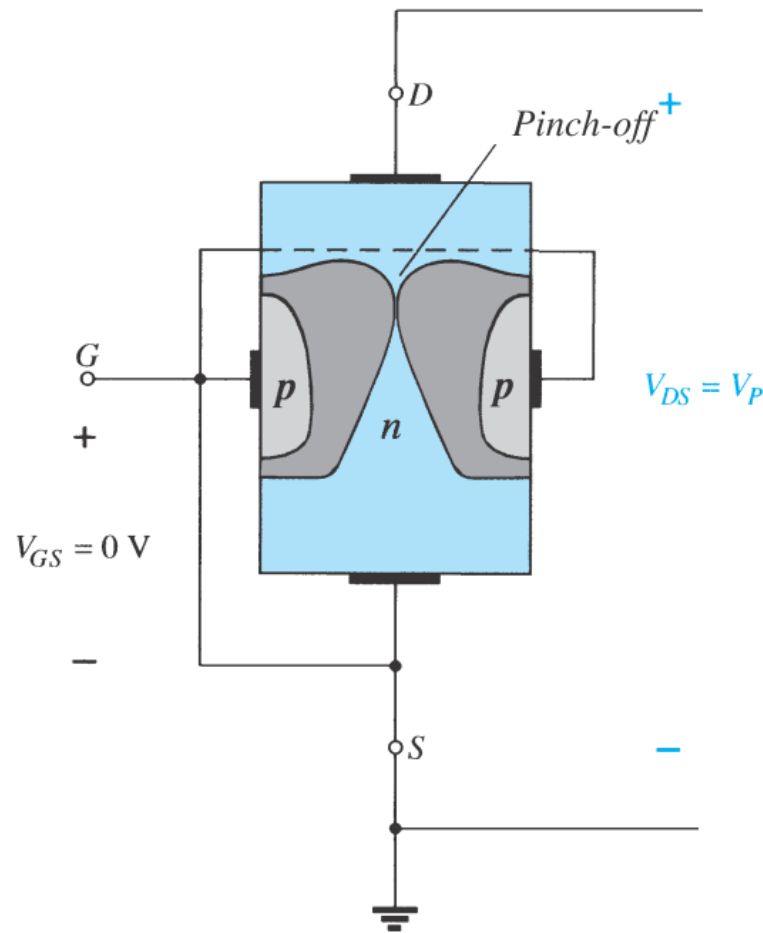
Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) (Operação)

- Variação dos potenciais reversos de polarização através da junção p-n de um JFET de canal n
- I_D versus V_{DS} para $V_{GS}=0$ V



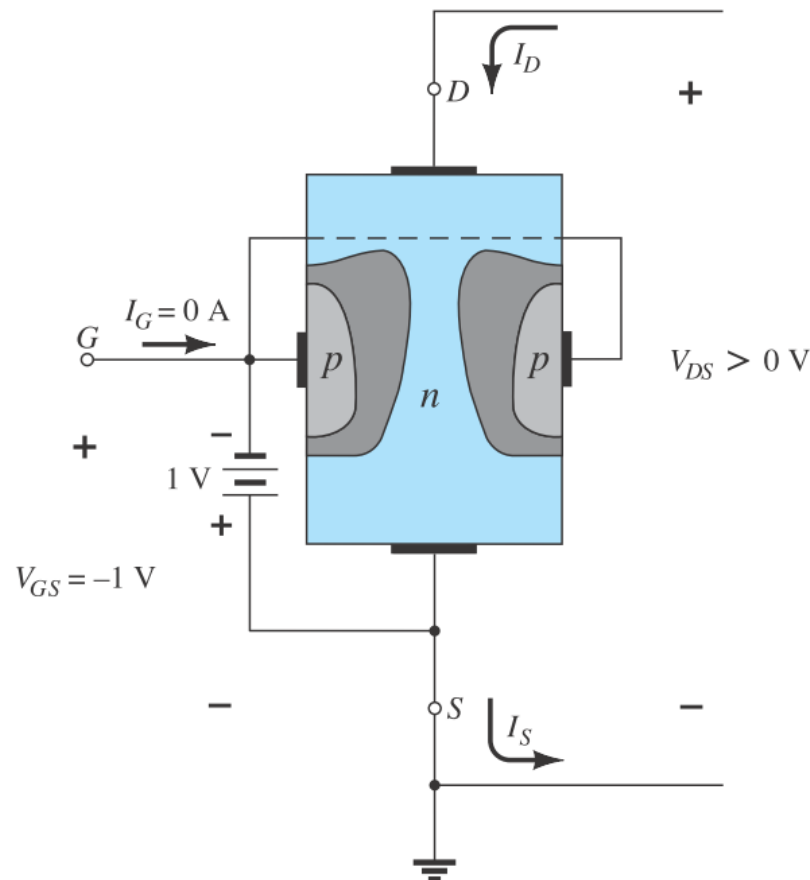
Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) (Operação)

- Pinch-off ($V_{GS} = 0V$, $V_{DS} = V_P$).



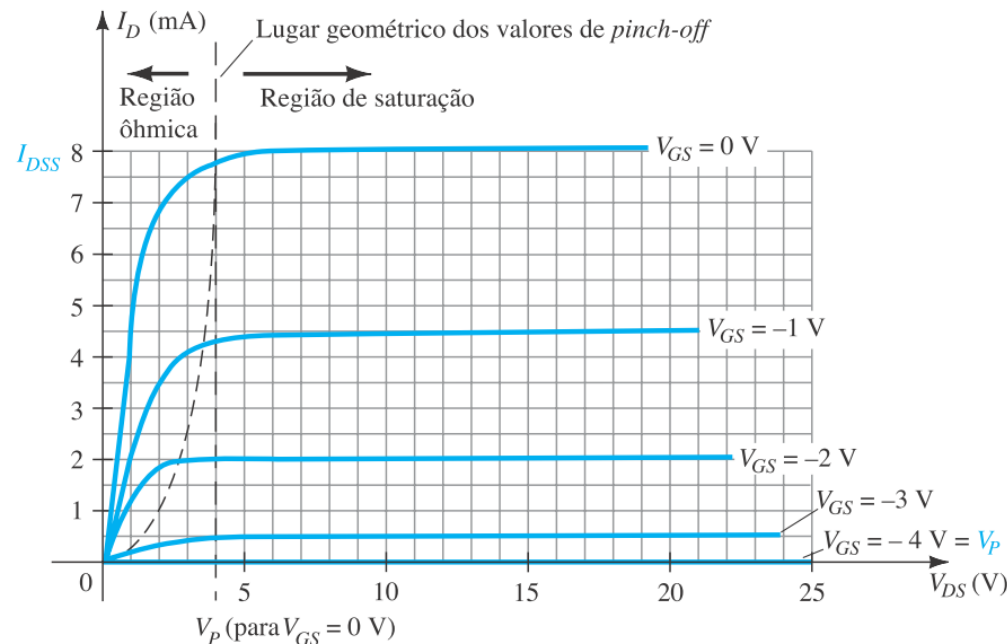
Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) (Operação)

- Aplicação de uma tensão negativa no terminal de porta de um JFET $V_{GS} < 0$ V.



Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) (Operação)

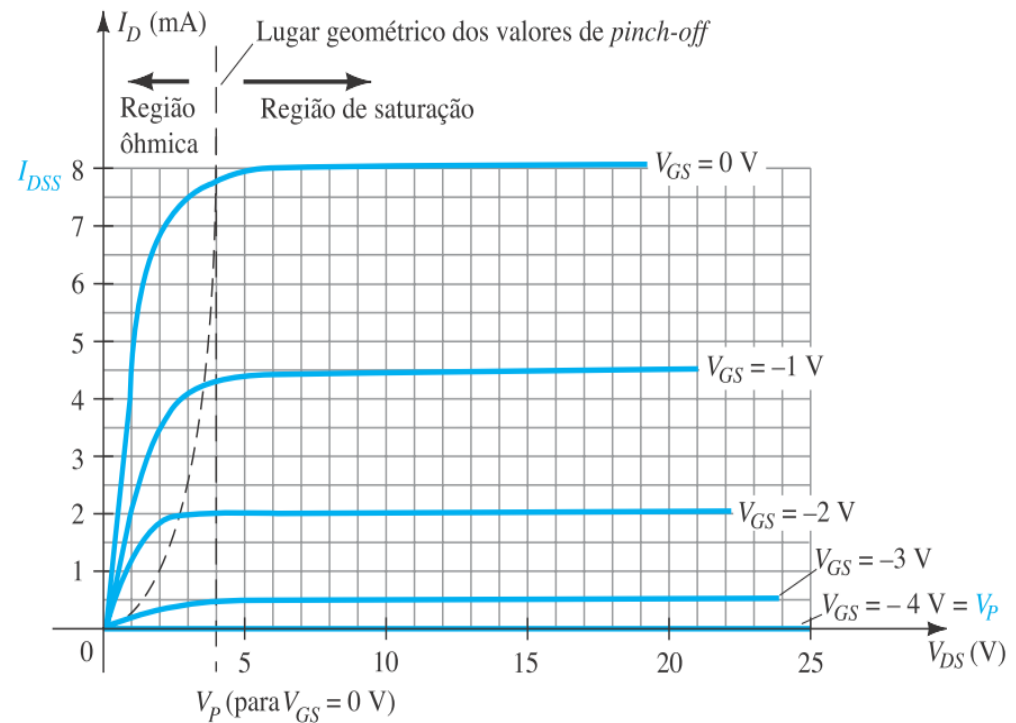
- Aplicação de uma tensão negativa no terminal de porta de um JFET $V_{GS} < 0V$;
- O efeito da polarização negativa aplicada V_{GS} é estabelecer regiões de depleção semelhantes às obtidas com $V_{GS} = 0V$, mas com valores menores de V_{DS} . Com isso, o efeito da aplicação de uma polarização negativa V_{GS} é atingir a condição de saturação em valores menores de tensão V_{DS} ;
- O valor de V_{GS} que resulta em $I_D = 0mA$ é definido por $V_{GS} = V_P$, sendo V_P uma tensão negativa para dispositivos de canal n e uma tensão positiva para JFETs de canal p.



Curvas características do JFET de canal n com $I_{DSS} = 8mA$ e $V_P = -4V$.

Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) (Operação - Resistor Controlado por Tensão)

- A região à direita do lugar geométrico de “pinch-off” na Figura ao lado é aquela normalmente empregada em amplificadores lineares (que apresentam um mínimo de distorção no sinal aplicado) e costuma ser chamada de corrente constante, saturação ou região de amplificação linear.

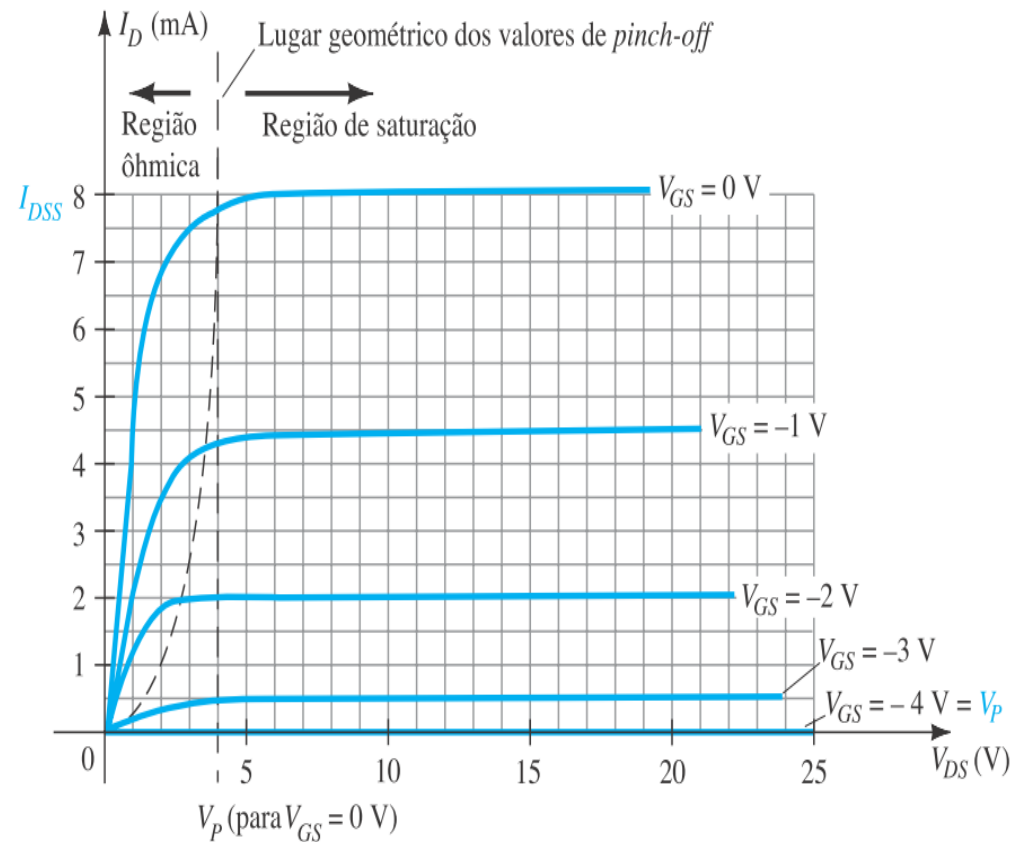


Curvas características do JFET de canal n com $I_{DSS} = 8$ mA e $V_P = -4$ V.

Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) (Operação - Resistor Controlado por Tensão)

- A região à esquerda da linha de “pinch-off”, na Figura ao lado é chamada de ôhmica ou região de resistência controlada por tensão;
- É regida pela equação abaixo:

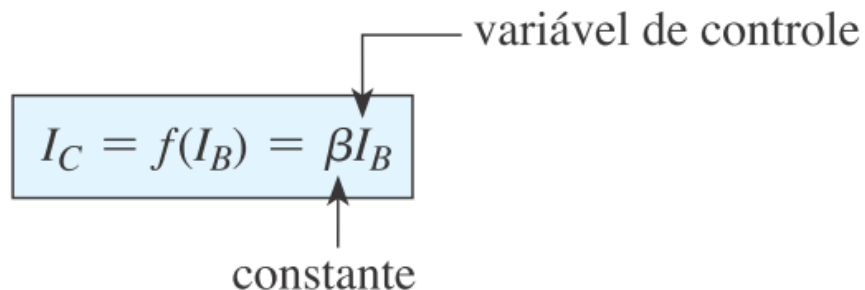
$$r_d = \frac{r_o}{(1 - V_{GS}/V_P)^2}$$



Curvas características do JFET de canal n com $I_{DSS} = 8$ mA e $V_P = -4$ V.

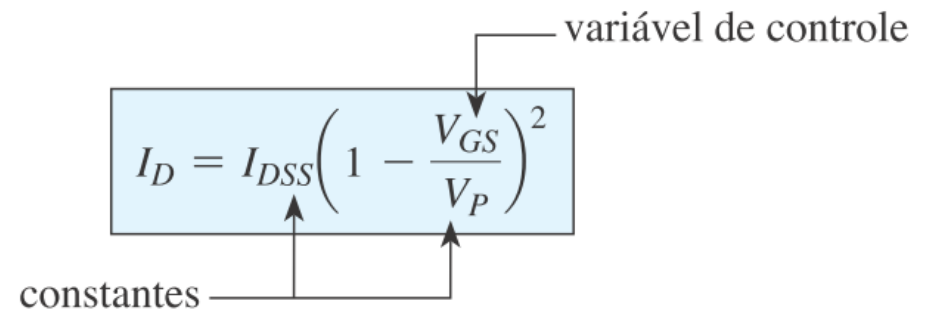
Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) (Curva Característica de transferência)

- Para o transistor TBJ, a corrente de saída I_C e a corrente controladora de entrada I_B se relacionam por meio de beta, que foi considerado constante na análise feita. Em forma de equação:
- A relação linear do TBJ não existe entre as variáveis de saída e entrada de um JFET. A relação entre I_D e V_{GS} é definida pela equação de Shockley:



A diagram showing the relationship between collector current I_C and base current I_B for a TBJ transistor. A light blue rectangular box contains the equation $I_C = f(I_B) = \beta I_B$. An arrow labeled "variável de controle" (control variable) points to I_B in the equation. Another arrow labeled "constante" (constant) points to β in the equation.

$$I_C = f(I_B) = \beta I_B$$

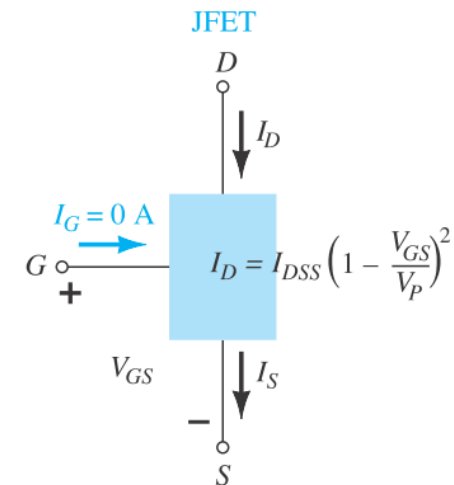
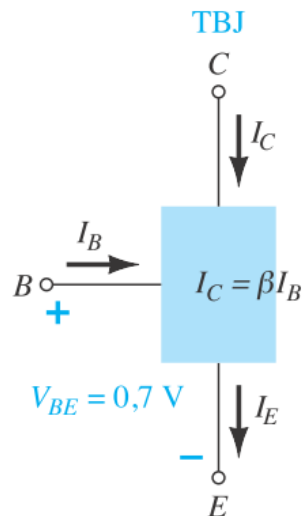


A diagram showing the Shockley equation for a JFET. A light blue rectangular box contains the equation $I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2$. An arrow labeled "variável de controle" (control variable) points to V_{GS} in the equation. Two arrows labeled "constantes" (constants) point to I_{DSS} and V_P in the equation.

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

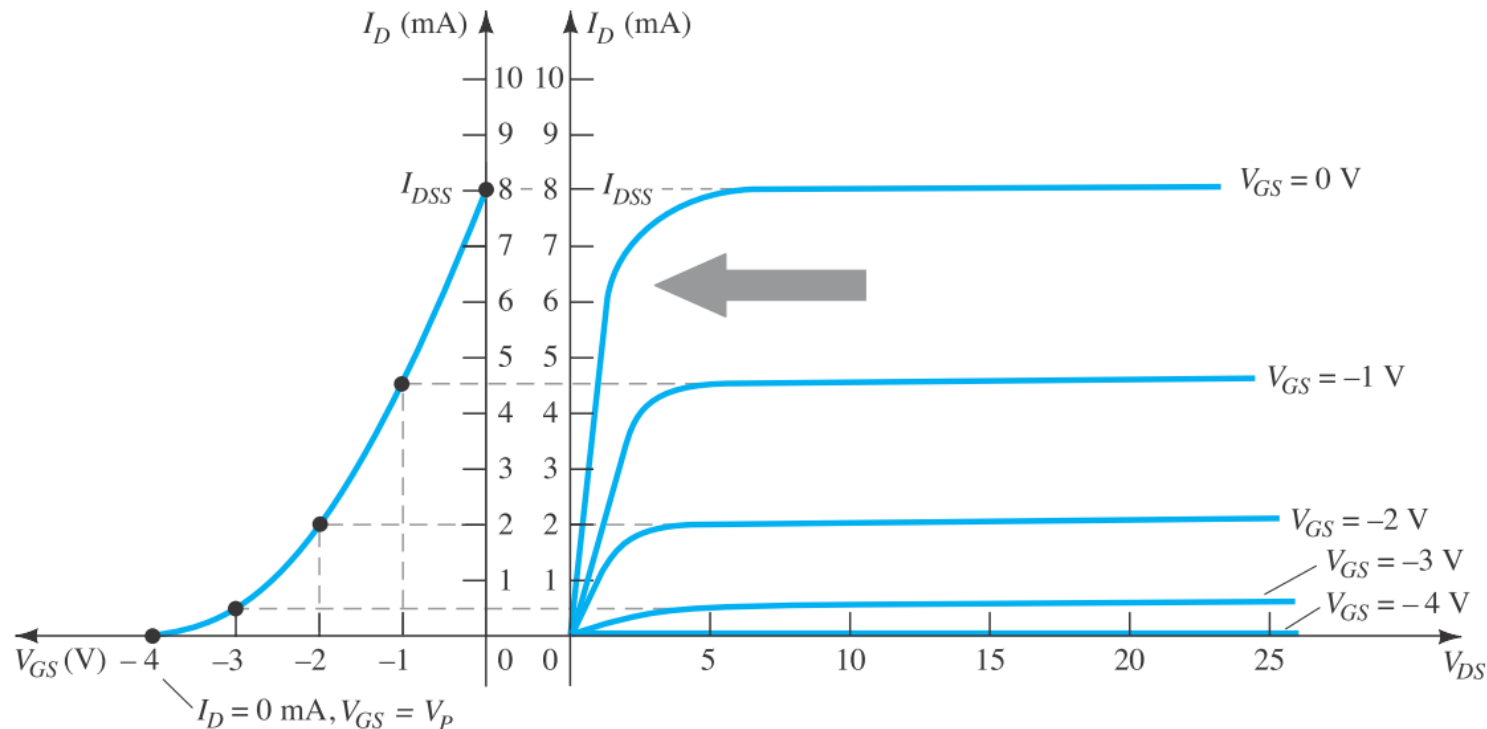
Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) (Curva Característica de transferência)

- Para o transistor TBJ, a corrente de saída I_C e a corrente controladora de entrada I_B se relacionam por meio de beta, que foi considerado constante na análise feita. Em forma de equação:
- A relação linear do TBJ não existe entre as variáveis de saída e entrada de um JFET. A relação entre I_D e V_{GS} é definida pela equação de Shockley:

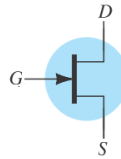


Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET) (Curva Característica de transferência)

O termo quadrático da equação resulta em uma relação não linear entre I_D e V_{GS} , e isso resulta em uma curva que cresce exponencialmente com valores decrescentes de V_{GS} .



Transistor Efeito de Campo de Junção (J-FET)



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

 TO-92

MMBF5457

 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.

CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS

Símbolo	Características	Máx.		Unidade
		2N5457	*MMBF5457	
P_D	Dissipação total do dispositivo Degradação acima de 25°C	625 5,0	350 2,8	mW mW/°C
$R_{\theta JC}$	Resistência térmica, junção para encapsulamento	125		°C/W
$R_{\theta JA}$	Resistência térmica, junção para ambiente	357	556	°C/W

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

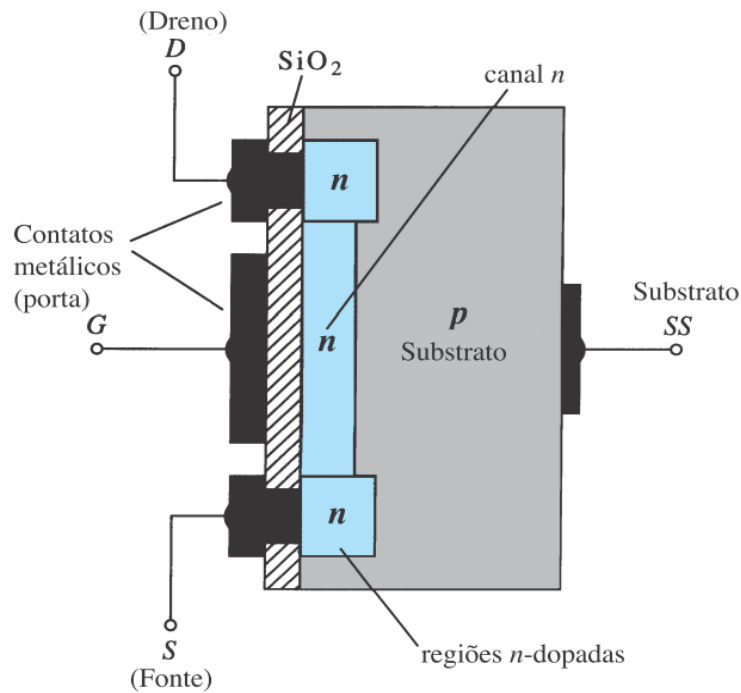
Símbolo	Parâmetro	Condições de teste	Mín.	Típ.	Máx.	Unidade
---------	-----------	--------------------	------	------	------	---------

CARACTERÍSTICAS EM ESTADO DESLIGADO

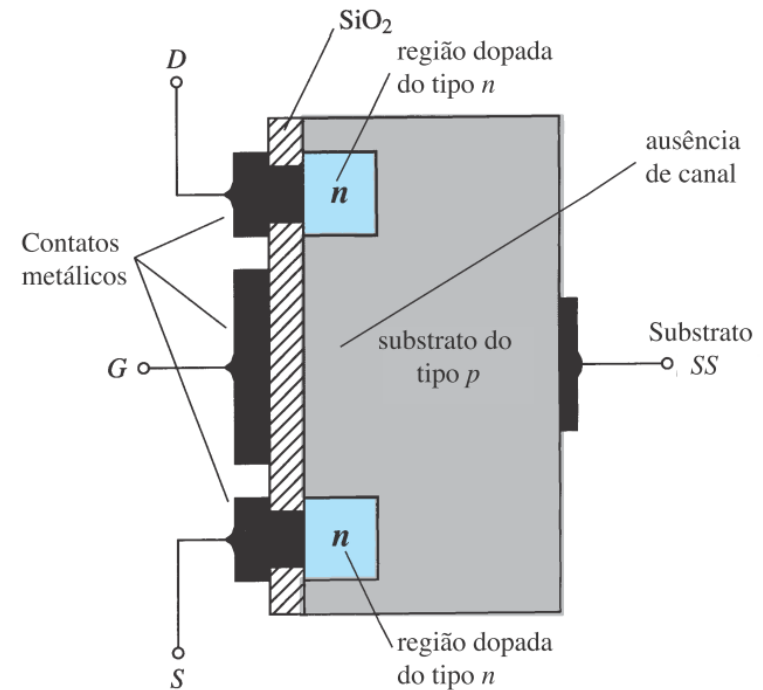
$V_{(BR)GSS}$	Tensão de ruptura porta-fonte	$I_G = 10 \mu\text{A}, V_{DS} = 0$	-25			V
I_{GSS}	Corrente reversa de porta	$V_{GS} = -15 \text{ V}, V_{DS} = 0$ $V_{GS} = -15 \text{ V}, V_{DS} = 0, T_A = 100^\circ\text{C}$			-1,0 -200	nA nA
$V_{GS(off)}$	Tensão de corte porta-fonte	$V_{DS} = 15 \text{ V},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

Metal Oxido Semicondutor - Efeito de Campo de Junção (MOSFET)

- Estrutura básica



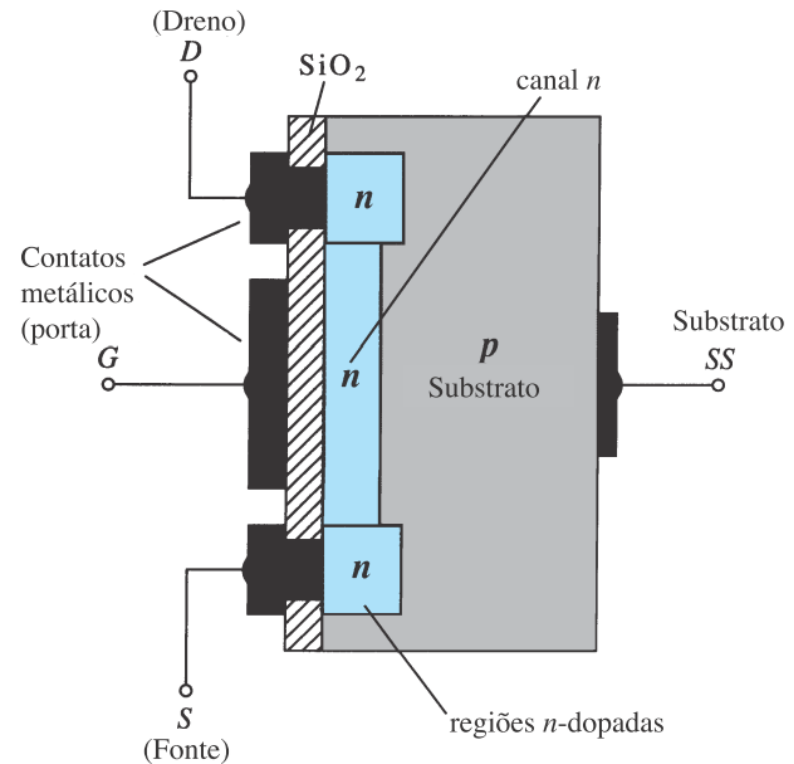
MOSFET tipo depleção de canal n



MOSFET tipo intensificação de canal n

Metal Oxido Semicondutor - Efeito de Campo de Junção (Mosfet tipo depleção)

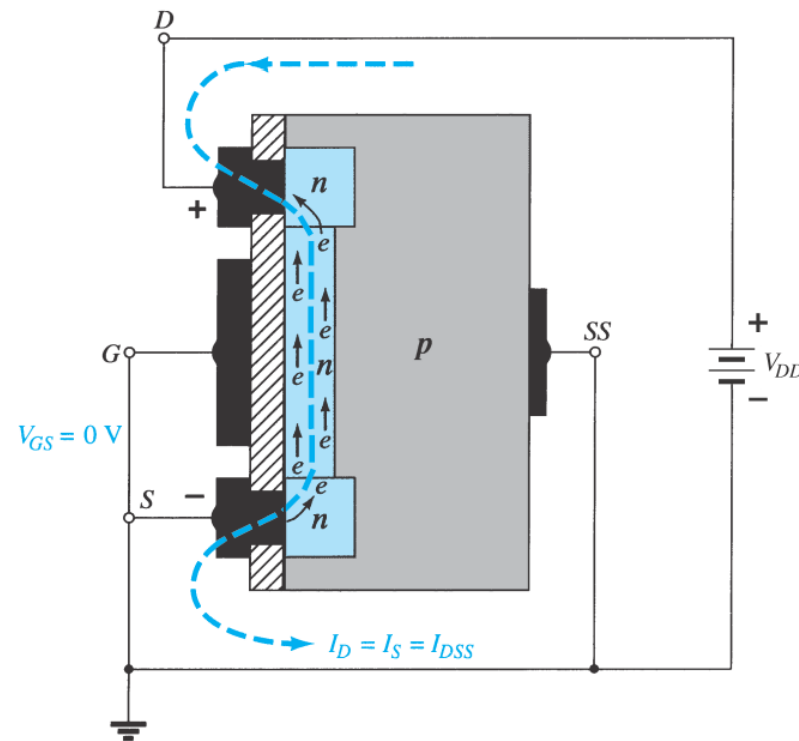
- Estrutura básica:
- Não há conexão elétrica direta entre o terminal de porta e o canal de um MOSFET;
- A camada isolante de SiO_2 na construção do MOSFET é a responsável pela desejável alta impedância de entrada do dispositivo.



MOSFET tipo depleção de canal n

Metal Oxido Semicondutor - Efeito de Campo de Junção (Mosfet tipo depleção)

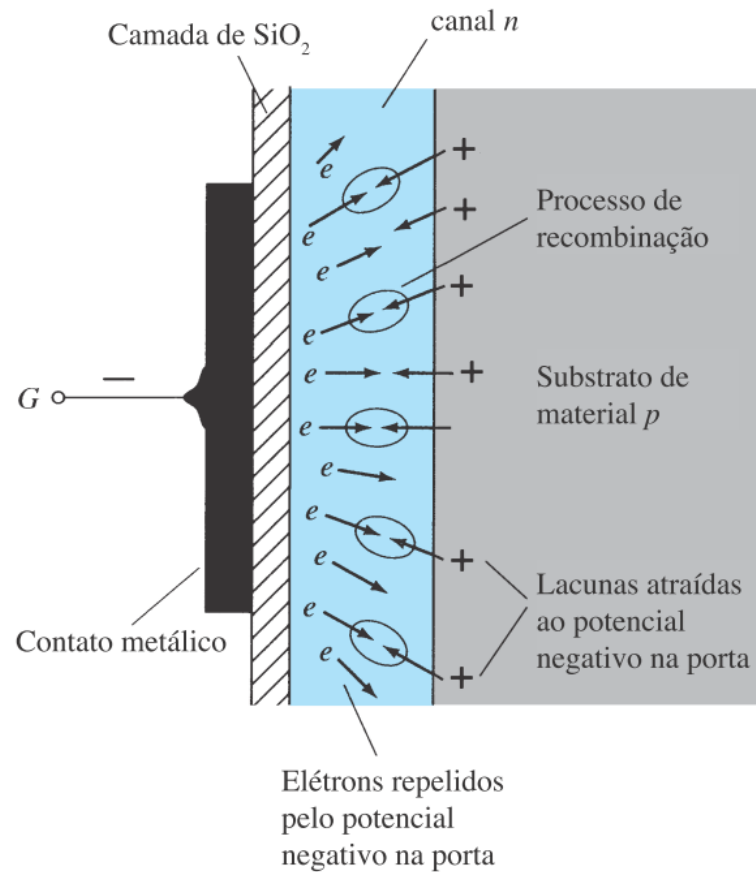
- Operação básica e curvas características:



MOSFET tipo depleção de canal n com $V_{GS} = 0$ V e uma tensão V_{DD} aplicada.

Metal Oxido Semicondutor - Efeito de Campo de Junção (Mosfet tipo depleção)

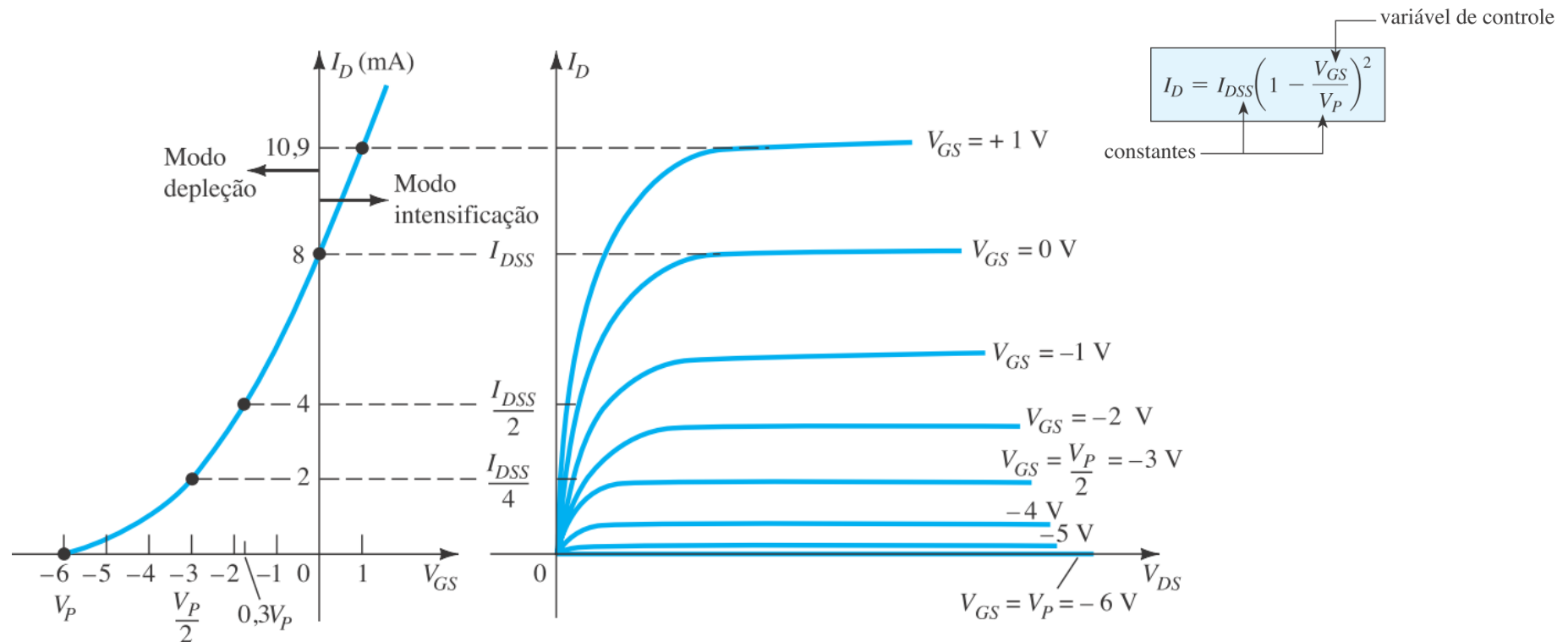
- Operação básica e curvas características:



Redução dos portadores livres no canal devido ao potencial negativo no terminal de porta.

Metal Oxido Semicondutor - Efeito de Campo de Junção (Mosfet tipo depleção)

- Operação básica e curvas características:

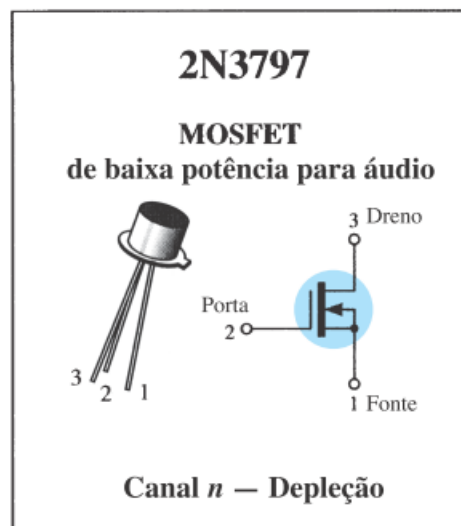


Curvas características de dreno e curva de transferência para um MOSFET tipo depleção de canal n .

Metal Oxido Semicondutor - Efeito de Campo de Junção (Mosfet tipo depleção)

ESPECIFICAÇÕES MÁXIMAS

Especificações	Símbolo	Valor	Unidade
Tensão dreno-fonte 2N3797	V_{DS}	20	V_{CC}
Tensão porta-fonte	V_{GS}	± 10	V_{CC}
Corrente de dreno	I_D	20	mA_{CC}
Dissipação total do dispositivo @ $T_A = 25^\circ C$ Fator de redução acima de $25^\circ C$	P_D	200 1,14	mW $mW/^\circ C$
Faixa de temperatura da junção	T_J	+175	$^\circ C$
Faixa de temperatura do canal para armazenamento	T_{stg}	-65 a +200	$^\circ C$



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

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

CARACTERÍSTICAS EM ESTADO DESLIGADO

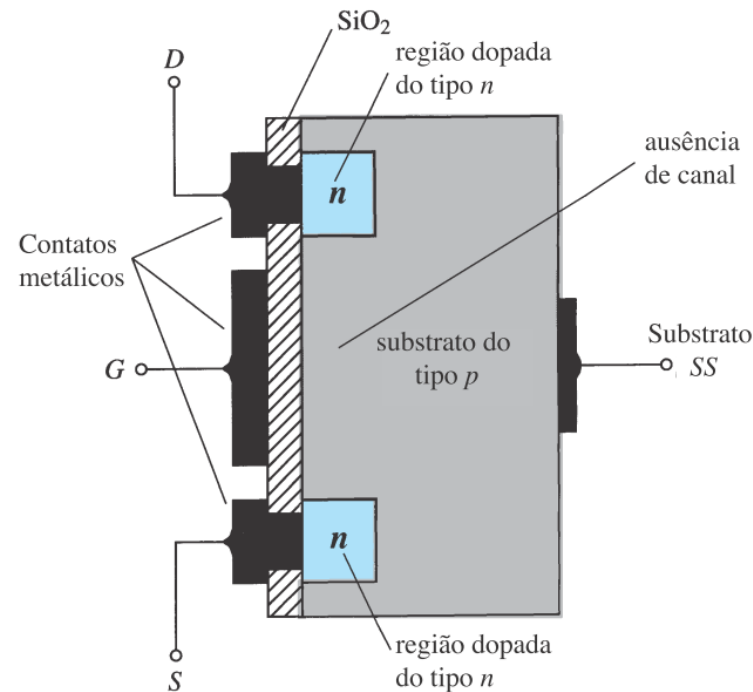
Tensão de ruptura dreno-fonte ($V_{GS} = -7,0 V$, $I_D = 5,0 \mu A$) 2N3797	$V_{(BR)DSX}$	20	25	—	V_{CC}
Corrente reversa de porta (1) ($V_{GS} = -10 V$, $V_{DS} = 0$) ($V_{GS} = -10 V$, $V_{DS} = 0$, $T_A = 150^\circ C$)	I_{GSS}	— —	— —	1,0 200	pA_{CC}
Tensão de corte porta-fonte ($I_D = 2,0 \mu A$, $V_{DS} = 10 V$) 2N3797	$V_{GS(desligado)}$	—	-5,0	-7,0	V_{CC}
Corrente reversa dreno-porta (1) ($V_{DG} = 10 V$, $I_S = 0$)	I_{DGO}	—	—	1,0	pA_{CC}

CARACTERÍSTICAS EM ESTADO LIGADO

Corrente de dreno para tensão nula na porta ($V_{DS} = 10 V$, $V_{GS} = 0$) 2N3797	I_{DSS}	2,0	2,9	6,0	mA_{CC}
Corrente de dreno em estado ligado ($V_{DS} = 10 V$, $V_{GS} = +3,5 V$) 2N3797	$I_{D(ligado)}$	9,0	14	18	mA_{CC}

Metal Oxido Semicondutor - Efeito de Campo de Junção (MosFet tipo intensificação)

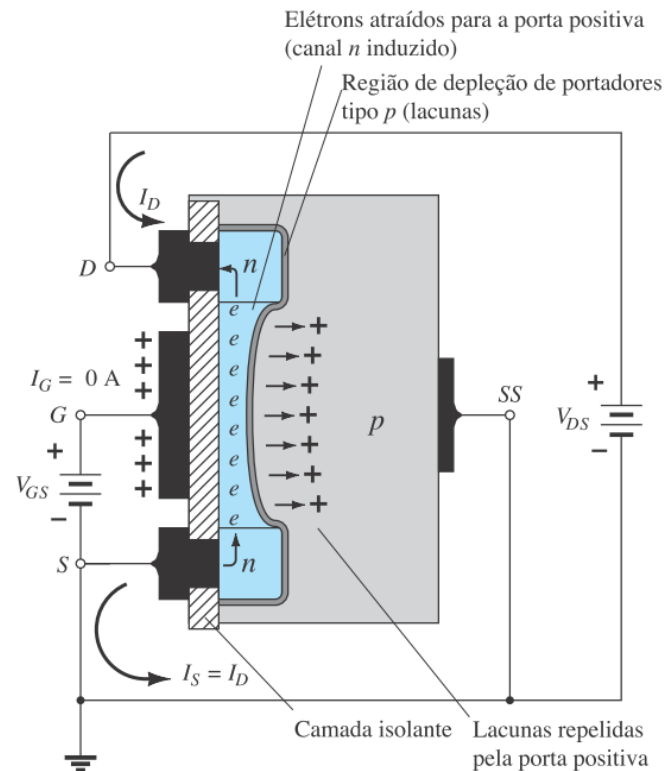
- Estrutura básica



MOSFET tipo intensificação de canal n .

Metal Oxido Semicondutor - Efeito de Campo de Junção (MosFet tipo intensificação)

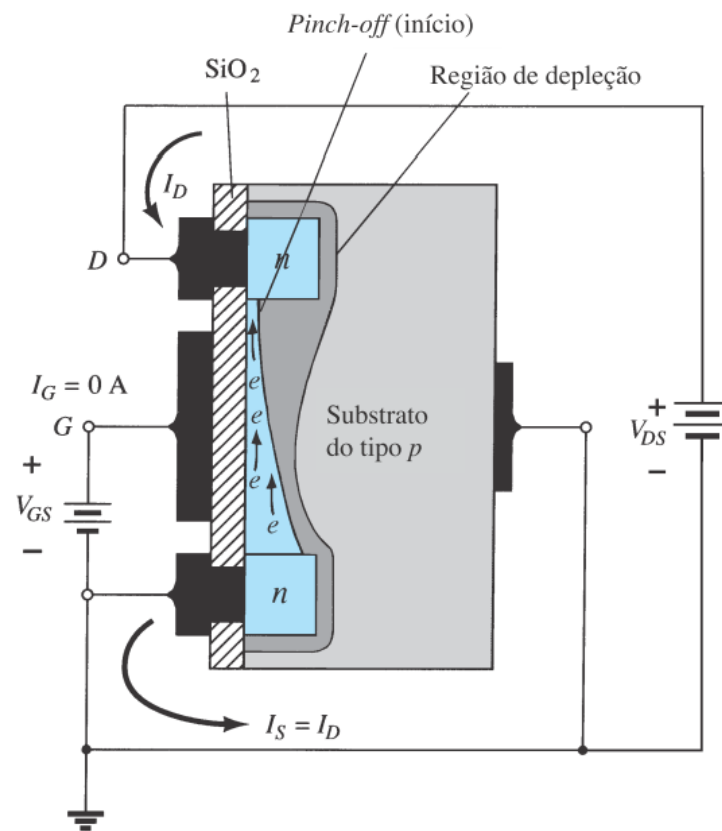
- Operação básica e curvas características



Formação do canal no MOSFET tipo
intensificação de canal n .

Metal Oxido Semicondutor - Efeito de Campo de Junção (MosFet tipo intensificação)

- Operação básica e curvas características

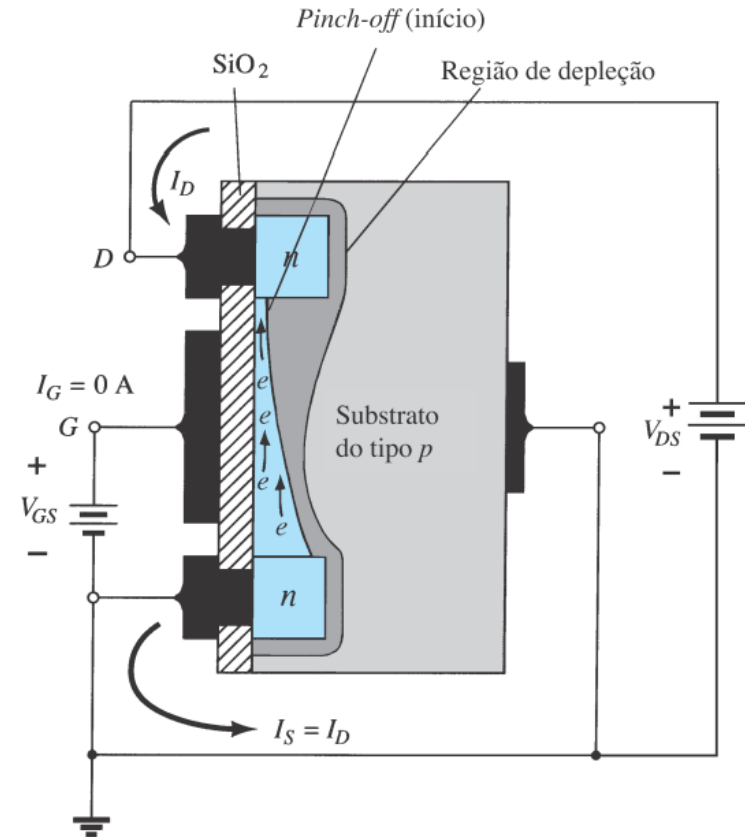


Alterações no canal e na região de depleção com o aumento de V_{DS} para um valor fixo de V_{GS} .

Metal Oxido Semicondutor - Efeito de Campo de Junção (Mosfet tipo intensificação)

- Operação básica e curvas características:
- Se V_{GS} for mantido em um valor fixo, como 8 V, e V_{DS} for aumentado de 2 V para 5 V, a tensão V_{DG} , de acordo com a Equação abaixo aumentará de - 6 V para -3 V, e a porta se tornará cada vez menos positiva com relação ao dreno.

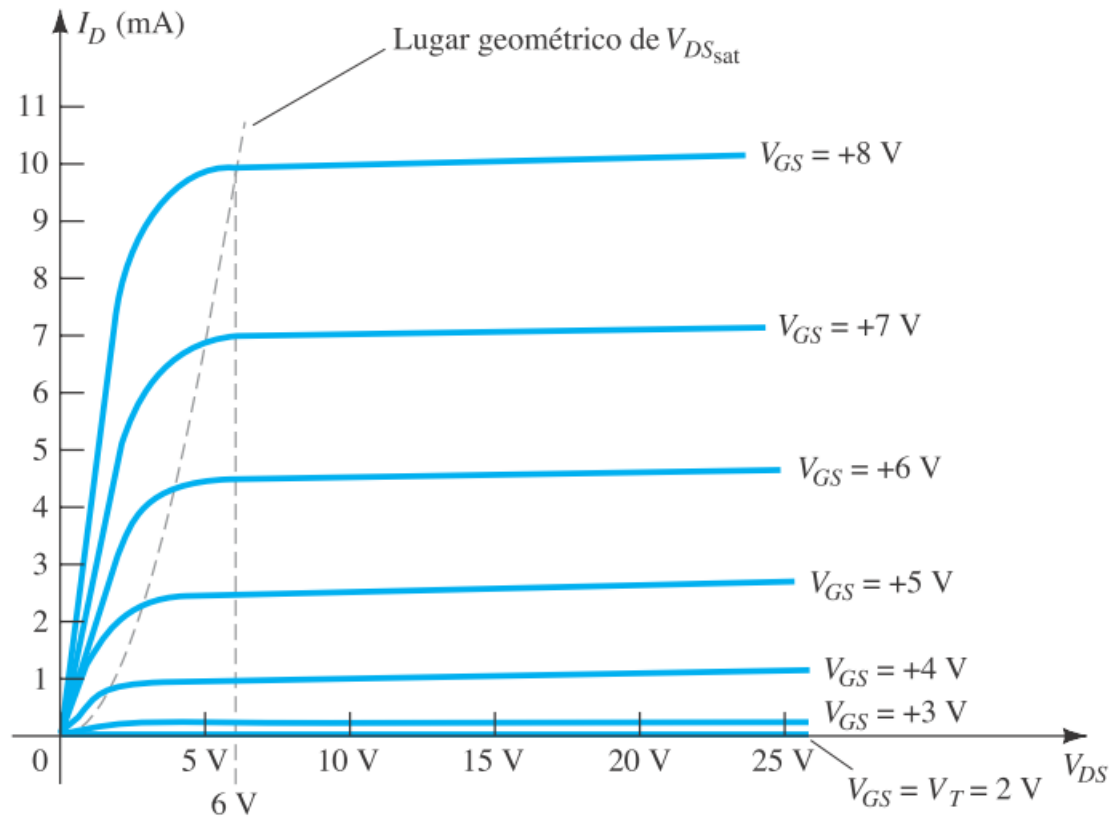
$$V_{DG} = V_{DS} - V_{GS}$$



Alterações no canal e na região de depleção com o aumento de V_{DS} para um valor fixo de V_{GS} .

Metal Oxido Semicondutor - Efeito de Campo de Junção (Mosfet tipo intensificação)

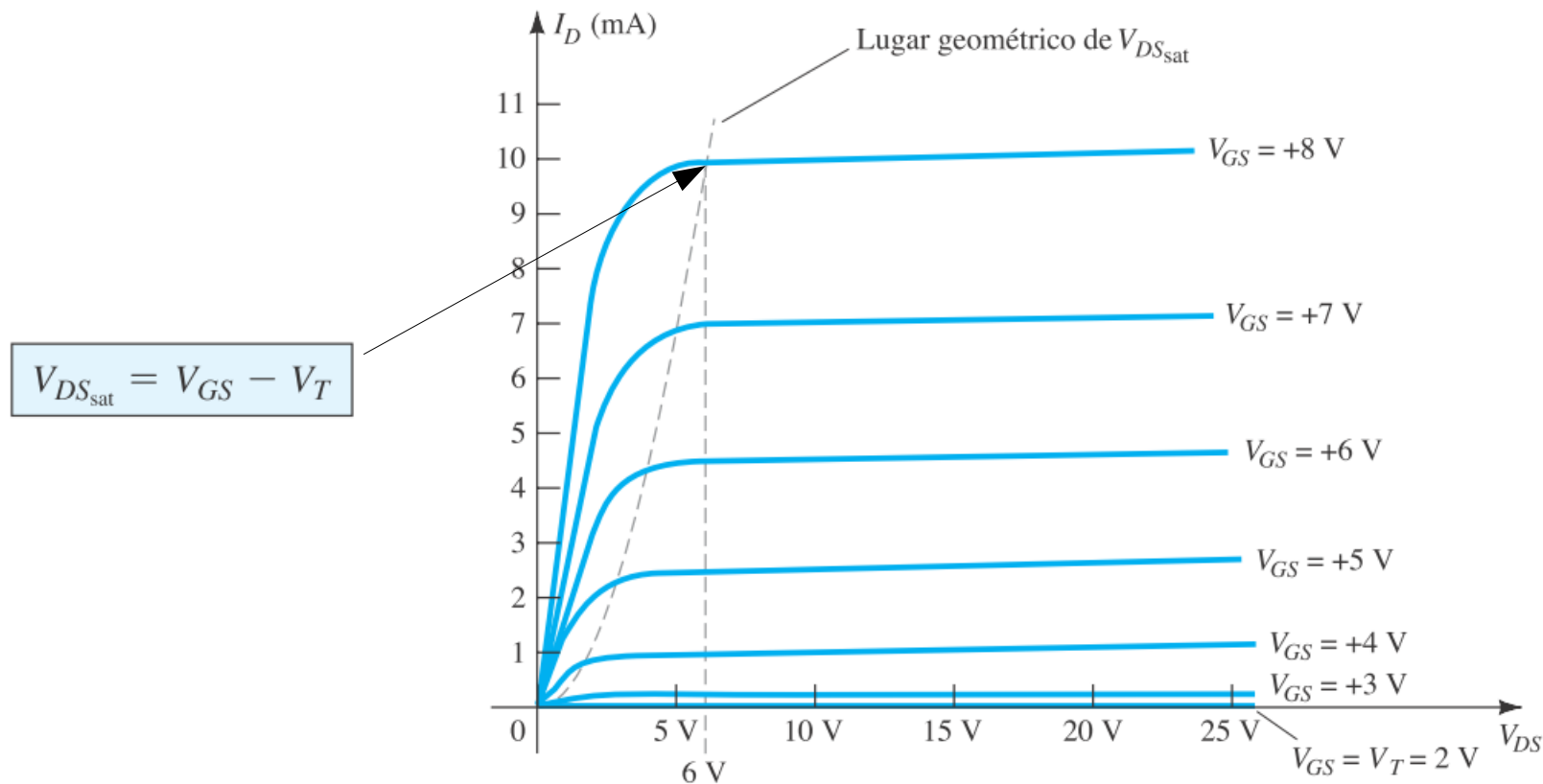
- Operação básica e curvas características:



Curvas características de dreno de um MOSFET tipo intensificação de canal n com $V_T = 2 \text{ V}$ e $k = 0,278 \times 10^{-3} \text{ A/V}^2$.

Metal Oxido Semicondutor - Efeito de Campo de Junção (Mosfet tipo intensificação)

- Operação básica e curvas características:



Curvas características de dreno de um MOSFET tipo intensificação de canal n com $V_T = 2$ V e $k = 0,278 \times 10^{-3}$ A/V².

Metal Oxido Semicondutor - Efeito de Campo de Junção (Mosfet tipo intensificação)

- Operação básica e curvas características:
- Para valores de V_{GS} menores do que o nível de limiar, a corrente de dreno de um MOSFET tipo intensificação é 0 mA;
- $V_{GS} > V_T$

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

- Constante K

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

Metal Oxido Semicondutor - Efeito de Campo de Junção (Mosfet tipo intensificação)

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_{Acc}
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_{slg}	-65 a +175	$^\circ C$

* Potenciais transitórios de $\pm 75 V$ não causam falha na função porta-óxido.

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

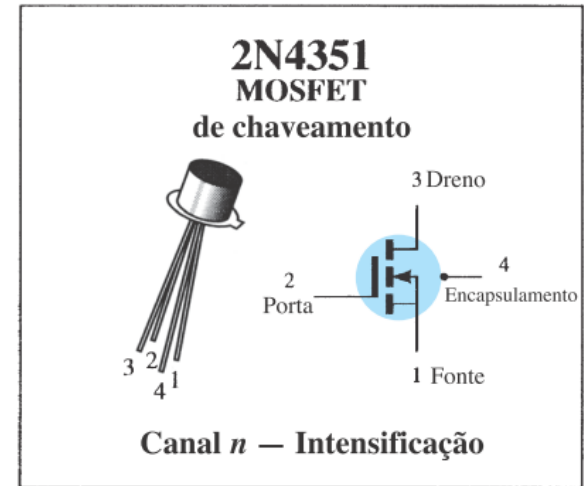
Características	Símbolo	Mín.	Máx.	Unidade
-----------------	---------	------	------	---------

CARACTERÍSTICAS EM ESTADO DESLIGADO

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

CARACTERÍSTICAS EM ESTADO LIGADO

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



FET

(ATIVIDADES)

1- Esboçar e simular as curvas características dos transistores FET's (J-FET e MOSFET's).

Referencias

- Boylestad e Nashelsky. “Dispositivos Eletrônicos e teoria de circuitos”, Prentice Hall, 11 Edição, 784p, 2013;
- Sedra e Smith, “Microeletrônica”, Pearson Prentice Hall, 5 Edição, 948p, 2007.