

Transistores

Introdução

Em 1947, John Bardeen e Walter Brattain, sob a supervisão de William Shockley no AT&T Bell Labs, demonstraram que uma corrente fluindo no sentido de polaridade direta sobre uma junção semicondutora PN poderia controlar a corrente de polaridade reversa sobre um terceiro eletrodo montado muito próximo ao primeiro contato. Este dispositivo de controle de corrente recebeu o nome de transistor como uma forma contraída das palavras “resistor de transferência” (do inglês, *TRANS*fer *reSIST*OR) e como ele opera com elétrons e lacunas como portadores de carga recebeu o nome de transistor bipolar. Um outro dispositivo semicondutor de controle é o transistor de efeito de campo FET (*Field Effect Transistor*), cujo controle da corrente é realizado por meio de um campo elétrico induzido na região condutora; como ele opera majoritariamente com apenas um tipo de portador, também é denominado de transistor unipolar.

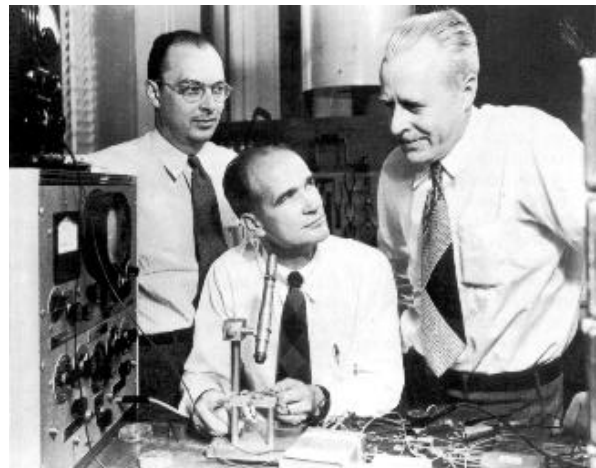
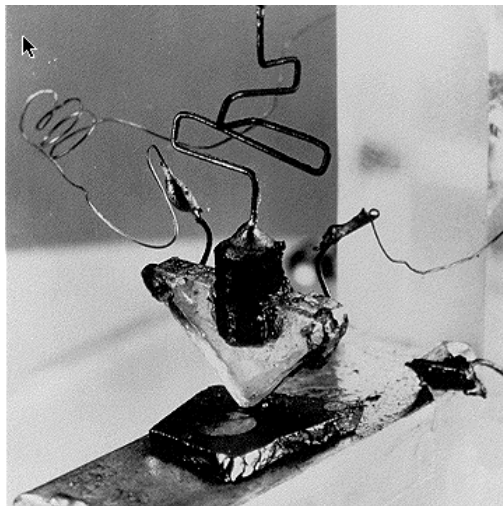


Fig. 1 Fotografia do aparato experimental de teste do primeiro transistor, inventado em 1947, por Brattain, Bardeen e Shockley.

Tipos de transistores

Os transistores podem ser classificados de acordo com o tipo de portador de carga utilizado para transporte de corrente. Sob esse ponto de vista, existem dois tipos de transistores: os bipolares e os unipolares. Enquanto os bipolares utilizam-se de elétrons livres **E** lacunas como portadores de carga, os transistores unipolares utilizam-se de elétrons livres **OU** lacunas como portadores de carga. A Fig. 2 ilustra os tipos de transistores bipolares e unipolares existentes, que serão descritos neste capítulo.

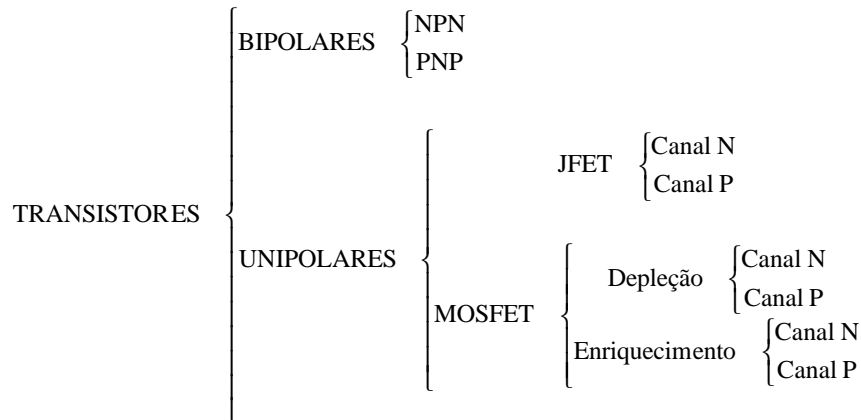


Fig. 2 Tipos e classificação dos transistores.

O transistor bipolar

O esquema do funcionamento do transistor bipolar NPN (designado pela sigla BJT – *bipolar junction transistor*) está mostrado na Fig. 3. Ele é caracterizado por duas junções PN, sendo que o semiconductor tipo P, comum às duas junções é denominado “base”. O semiconductor tipo N de uma das junções, com alto nível de dopagem, é denominado “emissor”, enquanto que o outro semiconductor tipo N com baixo nível de dopagem é chamado “coletor”.

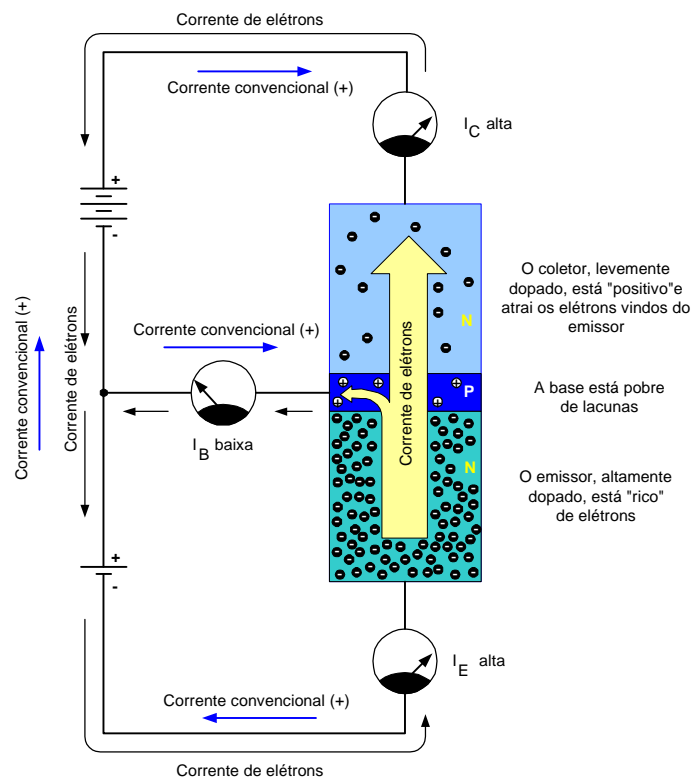


Fig. 3 Esquema do funcionamento do transistor bipolar NPN.

O emissor é a região rica em portadores de carga; sua tarefa é enviar os portadores para a base e dali para o coletor. O coletor como o nome diz, coleta os portadores que atravessam a base. A base atua como região de controle do fluxo de portadores de carga do emissor para o coletor.

As regiões tipo N contém elétrons livres como portadores majoritários, enquanto que a região tipo P contém lacunas como portadores majoritários. O nome transistor bipolar vem do fato que ambos os portadores (elétrons livres e lacunas) tomam parte do fluxo de corrente que atravessa o dispositivo.

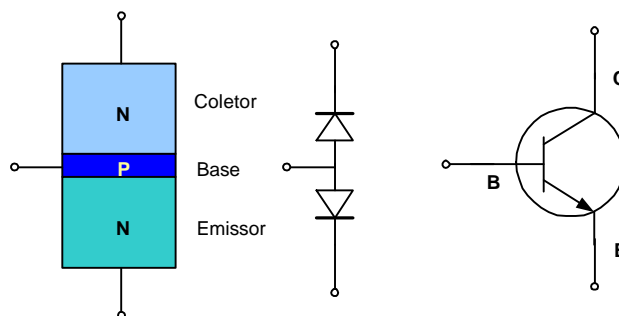


Fig. 4 Estrutura, circuito equivalente e símbolo para o transistor bipolar NPN.

Circuito para caracterização do transistor bipolar NPN

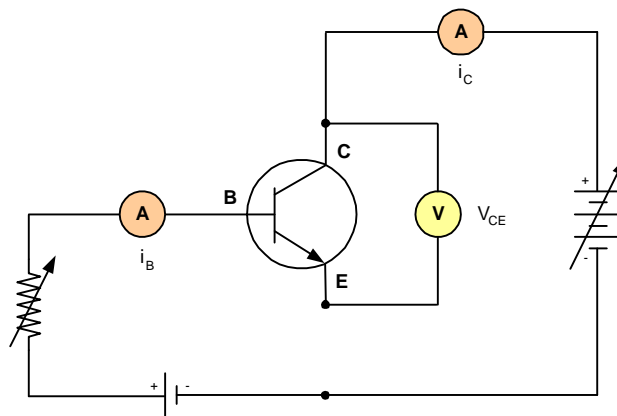


Fig. 5 Circuito para caracterização de transístor bipolar NPN

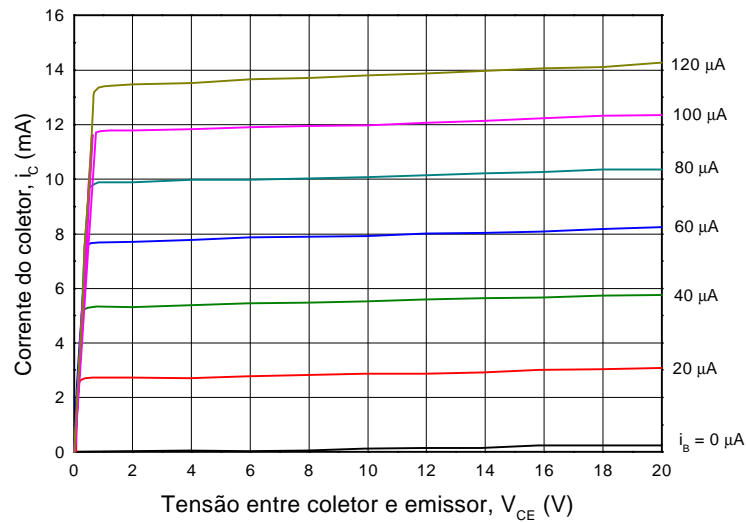


Fig. 6 Família de curvas VI do coletor para um transistor bipolar NPN.

Transistor PNP

O transistor bipolar PNP opera de maneira análoga ao transistor NPN, porém com fluxo de portadores majoritários de cargas sendo as lacunas.

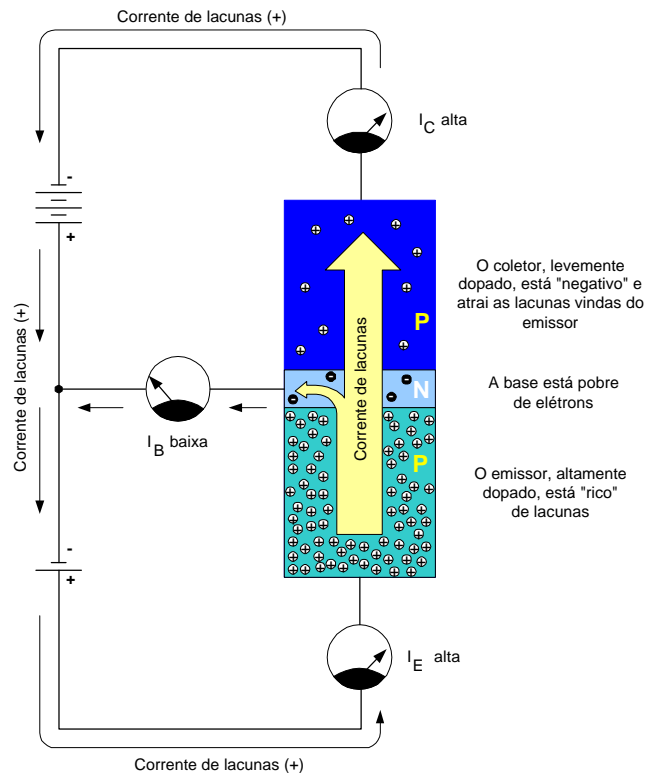


Fig. 7 Esquema do funcionamento do transistor bipolar PNP.

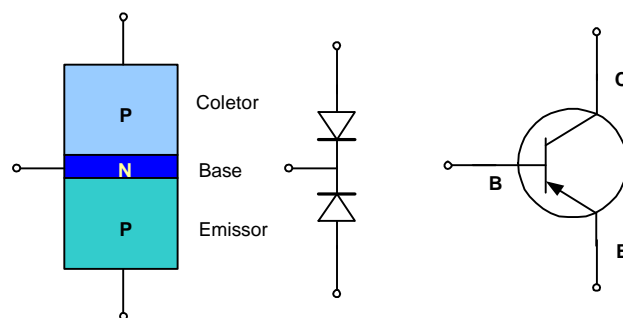


Fig. 8 Estrutura, circuito equivalente e símbolo para o transistor bipolar PNP.

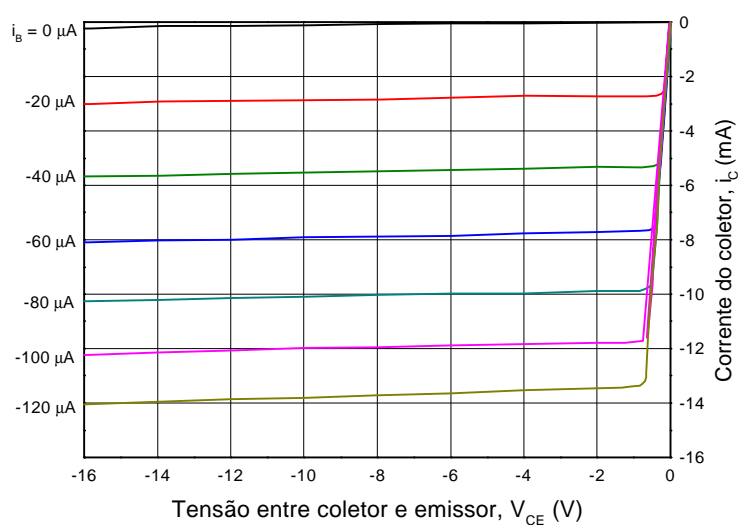


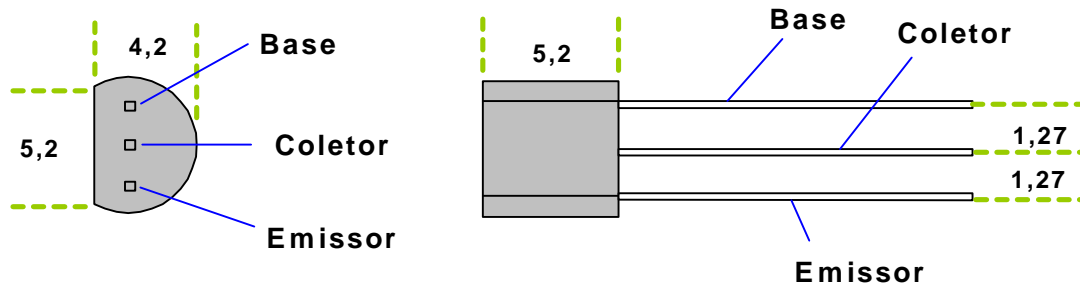
Fig. 9 Família de curvas VI do coletor para um transistor bipolar NPN.

Tabela 1 Códigos e especificações de alguns transistores bipolares.

TIPO	POL	V_{CE0}	I_C (mA)	P (mW)	h_{FE}	α	I_C (mA)	Aplicações
BC107	NPN	45	100	300	110-450	2	200	AF/ uso geral
BC108	NPN	20	100	300	110-800	2	200	AF/ uso geral
BC109	NPN	20	100	300	200-800	100	200	AF/ baixo ruído
BC327	PNP	45	500	800	100-600	100	700	AF/ até 1W
BC328	PNP	25	500	800	100-600	100	700	AF/ até 1W
BC337	NPN	45	500	800	100-600	100	700	AF
BC338	NPN	25	500	800	100-600	100	700	AF
BC368	NPN	20	1000	800	85-375	500	500	AF/ até 3 W
BC369	PNP	20	1000	800	85-365	500	500	AF
BC546	NPN	65	100	500	110-450	2	600	AF/ uso geral
BC547	NPN	45	100	500	110-800	2	600	AF/ uso geral
BC548	NPN	30	100	500	10-800	2	600	AF/ uso geral
BC549	NPN	30	100	500	200-800	2	600	AF/ baixo ruído
BC557	PNP	45	100	500	75-475	2	650	AF/ uso geral
BC558	PNP	30	100	500	75-475	2	650	AF/ uso geral

AF = usado na faixa de frequência de áudio.


Transistor: Encapsulamento plástico TO-92




Transistores bipolares de pequeno sinal:

- Família BC106 (obsoleto preferido)
- BC182/BC212 (Uso geral)
- 2SA1085/2SC2547 (Baixo ruído e alta tensão)

Transistores NPN - 2SC2545 / 6 / 7

	2SC2545	2SC2546	2SC2547	unidades
V_{ce}	60	90	120	V
I_c	100	100	100	mA
P_c	400	400	400	mW
h_{fe}	250 – 1200	250 – 1200	250 – 800	min – max
f_T	90	90	90	MHz
C_b	3	3	3	pF
e_n	0,5	0,5	0,5	nV / Hz ^{1/2}

Transistores PNP - 2SA1083 / 4 / 5

	2SA1083	2SA1084	2SA1085	unidades
V_{ce}	60	90	120	V
I_c	100	100	100	mA
P_c	400	400	400	mW
h_{fe}	250 – 800	250 – 800	250 – 800	min – max
f_T	90	90	90	MHz
C_b	3,5	3,5	3,5	pF
e_n	0,5	0,5	0,5	nV / Hz ^{1/2}

Circuitos de polarização de transistores bipolares

Como visto nas Figuras 6 e 9, o transistor bipolar necessita de uma corrente de polarização da base para colocar o dispositivo na região de operação. Por outro lado, a corrente de base modula a corrente que flui entre o coletor e o emissor.

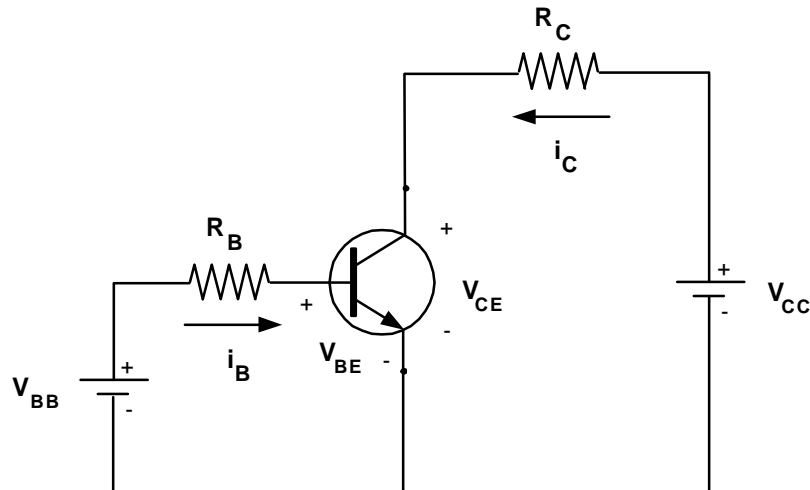


Fig. 10 Circuito de polarização da base.

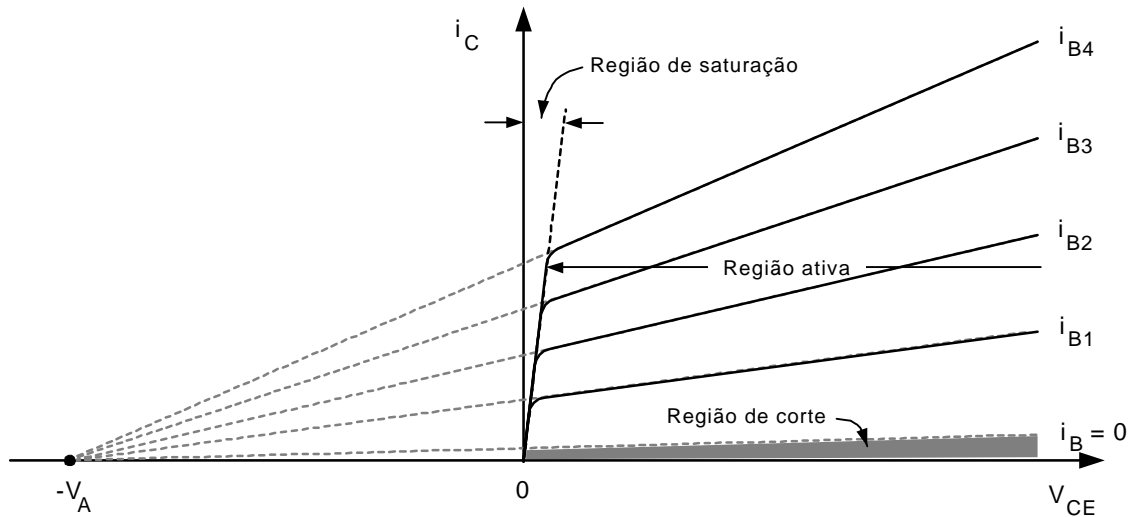


Fig. 11 Esquema de curva característica para transistores bipolares reais.

Relações corrente-tensão para o transistor bipolar NPN operando na região ativa:

$$i_C = I_S e^{V_{BE}/V_T} \quad (1)$$

Definindo o ganho de corrente β de emissor comum como:

$$\beta = \frac{i_C}{i_B} \quad (2)$$

vem que:

$$i_B = \frac{i_C}{\beta} = \left(\frac{I_S}{\beta} \right) e^{V_{BE}/V_T} \quad (3)$$

À partir da definição de α :

$$\alpha = \frac{i_C}{i_E} \quad (4)$$

obtem-se:

$$i_E = \frac{i_C}{\alpha} = \alpha I_S e^{V_{BE}/V_T} \quad (5)$$

Aplicações

O transistor pode ser empregado de muitas maneiras, mas basicamente ele desempenha duas funções: amplificação e chaveamento. No caso da amplificação, podemos fazer uma analogia com uma torneira: girando a torneira, podemos controlar o fluxo de água, tornando-o mais forte ou mais fraco. No caso do chaveamento, podemos imaginar o transistor como um interruptor de luz: ligando o interruptor, a luz se acende; desligando o interruptor, a luz se apaga. Da mesma forma que a torneira controla o fluxo de água, o transistor controla o fluxo de corrente elétrica. E da mesma forma que o interruptor “chaveia” (liga ou desliga) a luz, o transistor pode chavear corrente elétrica. A grande diferença, contudo, da torneira e do interruptor para o transistor é que nos dois primeiros o controle é feito pelas nossas mãos. Já no transistor, o controle da amplificação e do chaveamento é feito por corrente elétrica. Ou seja, no transistor bipolar temos corrente elétrica controlando corrente elétrica.

Isso é importante por diversos motivos: em primeiro lugar, com o controle sendo feito por corrente elétrica, consegue-se num transistor uma velocidade de operação milhares de vezes mais rápida do que nossas mãos. Em segundo lugar, o transistor pode ser acoplado a outras fontes de sinal elétrico, como uma antena, um microfone, ou mesmo um outro transistor. Por fim, sendo controlado por corrente, o transistor pode funcionar como uma “chave eletrônica”, sem partes móveis, muito mais rápida e eficiente do que os antigos relés (chaves eletro-mecânicas).

O transistor como amplificador

Amplificação de sinal é um dos propósitos básicos da eletrônica. Idealmente, na entrada de um circuito amplificador temos um sinal de baixa intensidade, cuja amplitude é aumentada sem haver distorção na forma de onda, conforme ilustrado na Fig. 12.

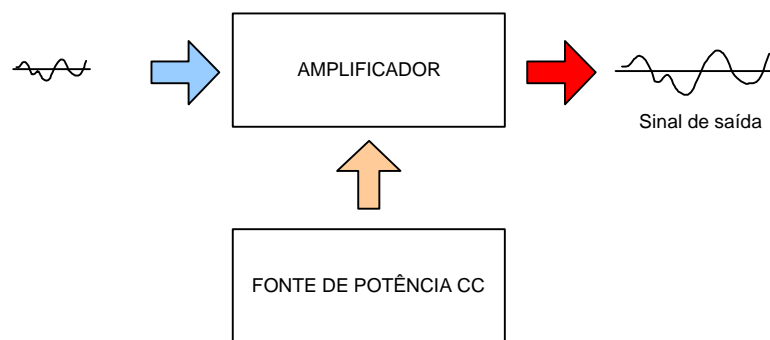


Fig. 12 Esquema de um amplificador

O transistor de efeito de campo (FET)

O transistor de efeito de campo (FET – *field effect transistor*) é um dispositivo semicondutor cuja corrente de operação depende do campo elétrico aplicado no seu terminal de controle, diferentemente do transistor bipolar, cuja corrente que flui entre o emissor e o coletor é controlada por corrente injetada no terminal base.

O FET tem diversas vantagens sobre o transistor bipolar:

1. Sua operação depende apenas do fluxo de portadores majoritários. São, portanto, dispositivos *unipolares* (trabalham apenas com um tipo de portador de carga) e por isso recebe também, o nome de *transistor unipolar*;
2. São relativamente imunes à radiação;
3. Possuem uma grande resistência de entrada, tipicamente da ordem de megaohms;
4. Apresentam menor ruído comparado aos transistores bipolares;
5. Eles não apresentam tensão residual (tensão de *offset*) para corrente de dreno nula;
6. Apresentam estabilidade térmica.

A desvantagem do FET é o seu pequeno produto $\text{ganho} \times \text{faixa de passagem}$ (*bandwidth*) em comparação ao transistor bipolar.

Existem dois tipos de transistor de efeito de campo: o FET de junção (JFET – *junction field effect transistor*) e o FET de porta isolada (IGFET – *insulated-gate field effect transistor*) mais comumente chamado MOSFET (*metal-oxide-semiconductor field effect transistor*).

O transistor de efeito de campo de junção (JFET)

JFET canal P: portadores são lacunas

O JFET opera no modo de *depleção*, isto é, uma tensão aplicada no terminal porta pode remover os portadores de carga presentes no canal N. Por exemplo, o transistor mostrado na Fig. 4 conduzirá normalmente do terminal fonte para o terminal dreno. O canal N contém elétrons livres em quantidade suficiente para suportar o fluxo de corrente. Se a tensão da porta se tornar negativa, os elétrons livres serão empurrados para fora do canal N, pois cargas iguais se repelem. Isto deixa o canal com poucos elétrons livres e a sua resistência

aumentará várias vezes, reduzindo assim a corrente entre dreno e fonte. Na realidade, se a tensão no terminal porta se tornar negativo, o dispositivo pode ser desligado e nenhuma corrente fluirá. Existem algumas diferenças importantes entre transistores bipolares e unipolares, a principal delas é que o transistor bipolar é controlado por corrente, e o transistor unipolar é controlado por tensão.

O JFET é o mais simples tipo de transistor dentre todos eles e tem pequeno uso atualmente, em função das melhores características do MOSFET. Sua aplicação é restrita aos circuitos discretos, nos quais é utilizado tanto como amplificador como chave. Nos circuitos integrados as suas aplicações estão limitadas aos estágios de entrada diferencial de alguns amplificadores operacionais para os quais deseja-se uma alta impedância de entrada em comparação aos transistores bipolares.

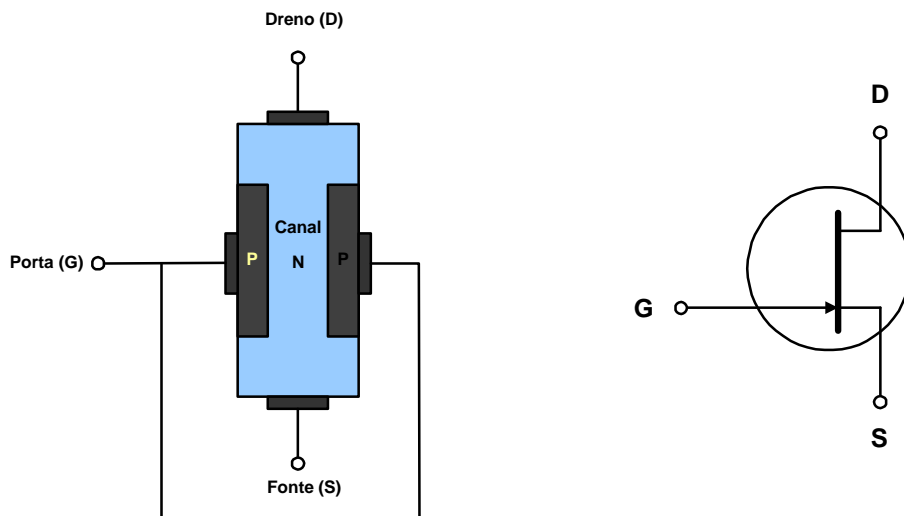


Fig. 13 (a) FET junção canal N e (b) símbolo do JFET canal N.

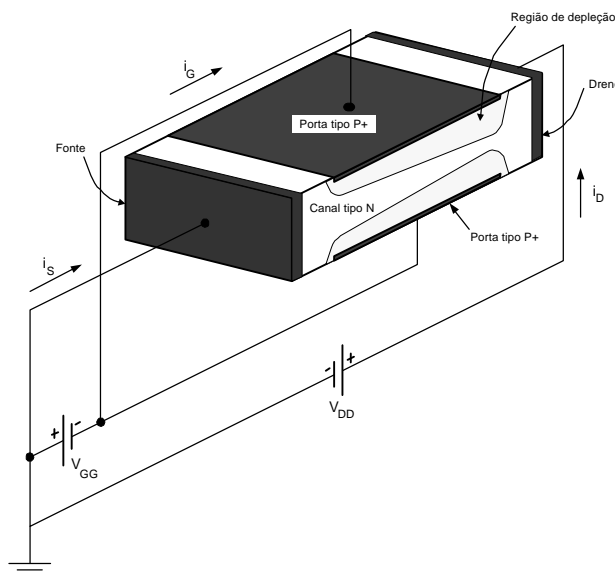


Fig. 14 Estrutura básica de um transistor de efeito de campo canal P. As polaridades normais das fontes de tensão V_{DD} (dreno-fonte) e V_{GG} (porta-fonte) estão mostradas.

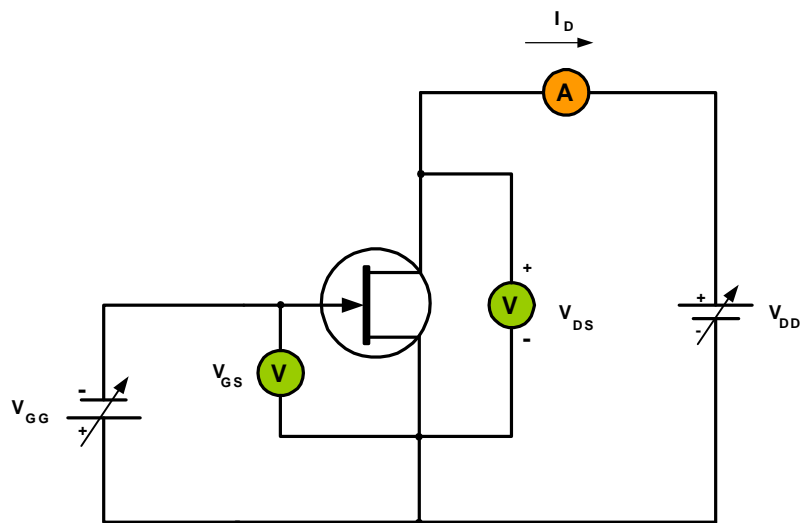


Fig. 15 Circuito para caracterização de JFET canal N.

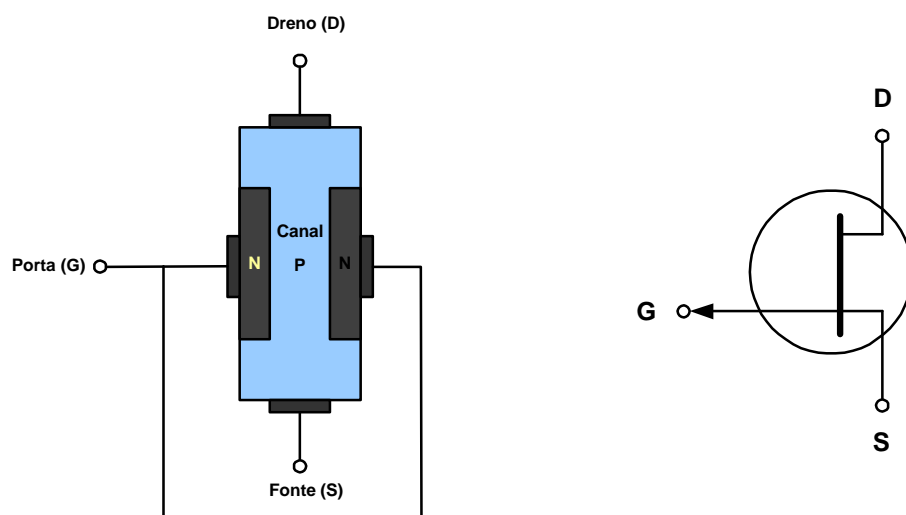


Fig. 16 (a) FET junção canal P e (b) símbolo do JFET canal P.

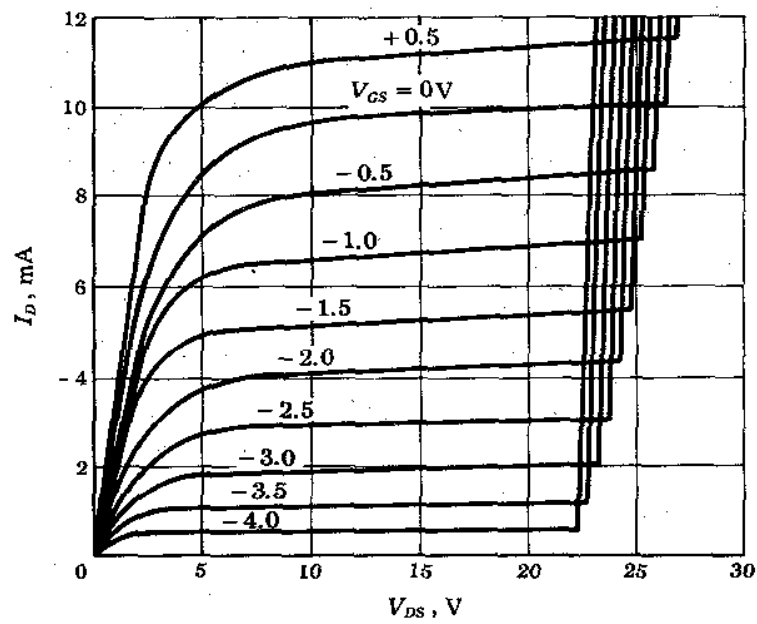


Fig. 17 Curvas V-I características de um JFET canal N.

O transistor de efeito de campo MOSFET

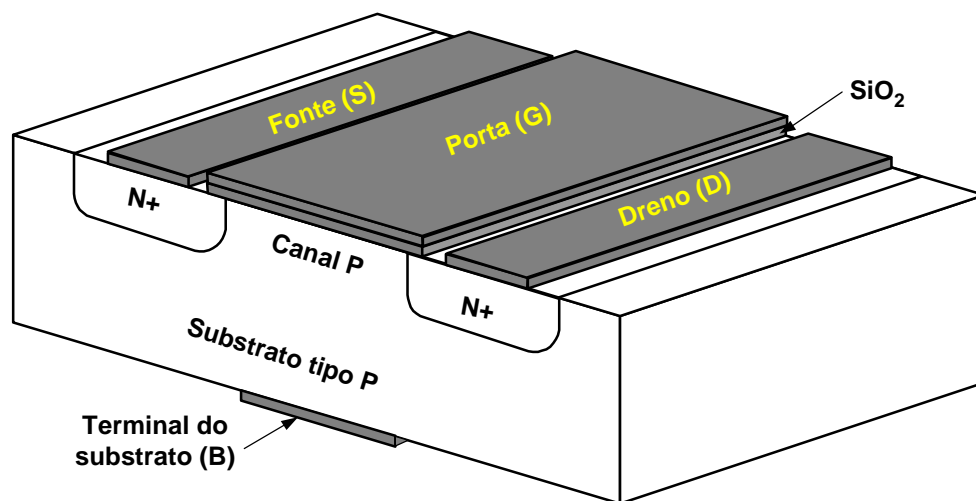


Fig. 18 Transistor de efeito de campo metal óxido semiconductor (MOSFET) ou FET de porta isolada (IGFET).

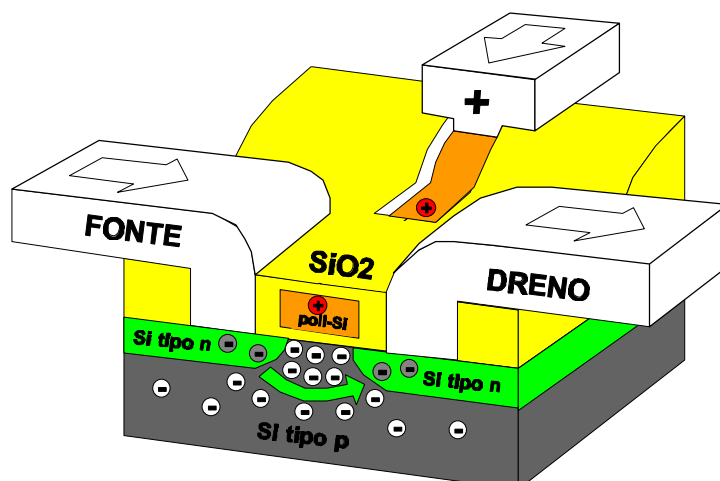


Fig. 19 Princípio de funcionamento do MOSFET no modo enriquecimento.

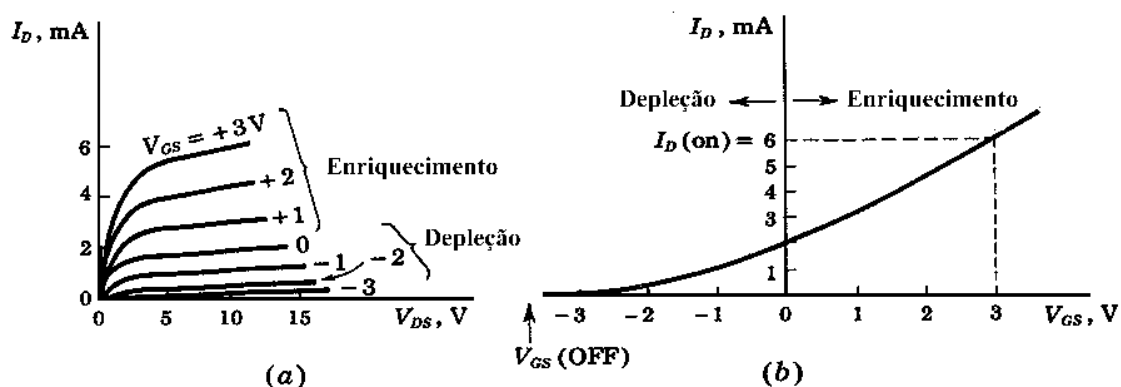
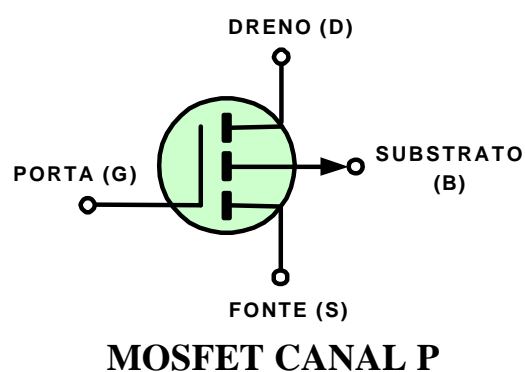
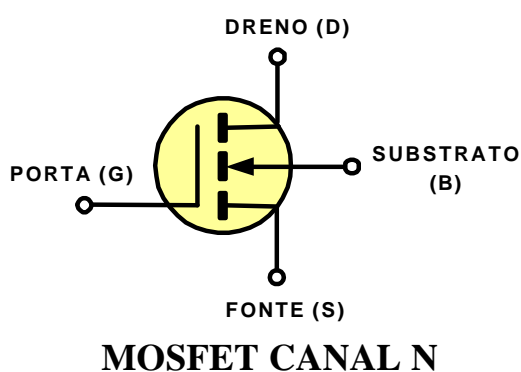


Fig. 20 (a) Curvas V-I características e (b) curva de transferência (para $V_{DS} = 10 \text{ V}$) para um NMOSFET que tanto pode ser usado no modo de depleção quanto no modo de enriquecimento (Millman, 1967).

Circuitos digitais que empregam lógica CMOS

A utilização de FETs como dispositivos lógicos tem diversas vantagens sobre os dispositivos baseados em transistores bipolares, particularmente devido à alta resistência do terminal porta (G). Este fato acarreta em baixa dissipação de energia, da ordem de 1 mW/porta. Quando um FET canal p é utilizado complementarmente a um FET canal n, apenas uma fonte é necessária, daí o nome de semicondutores de óxido metálico complementares CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*). A Fig. 19 apresenta um circuito CMOS utilizado como porta lógica inversora em circuitos digitais.

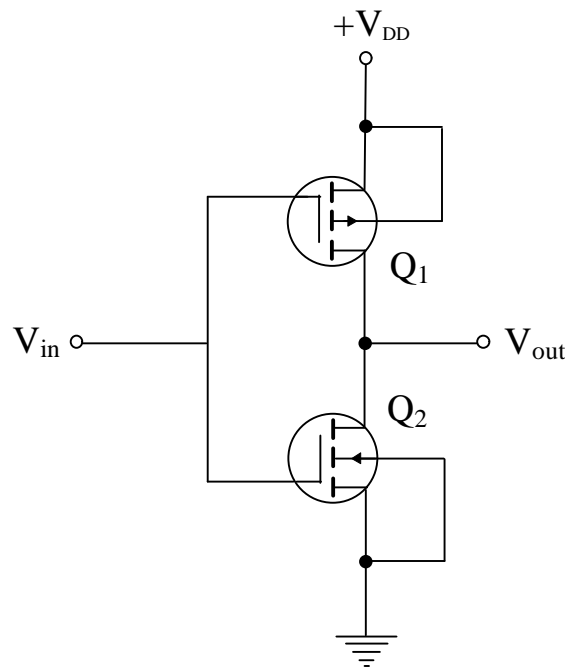


Fig. 21 Circuito CMOS de uma porta lógica inversora.

Parâmetros operacionais das portas lógicas CMOS:

$V_{DD} = 3$ a 15 V, $P_d = 0,3$ MW, $\tau_d = 200$ ns, $V_{NM} = 0,4 V_{DD}$

Estado lógico “1” $\cong V_{DD}$ e estado lógico “0” = 0 V.

A lógica CMOS oferece algumas vantagens substanciais, tais como: baixa dissipação de energia, excelente margem de ruído e elevada capacitância. Esta última característica, embora reduza a velocidade do dispositivo, por outro lado torna-o bastante insensível à fonte de potência utilizada. Ainda, pode-se aumentar a sua margem de ruído aumentando-se o valor de V_{DD} .

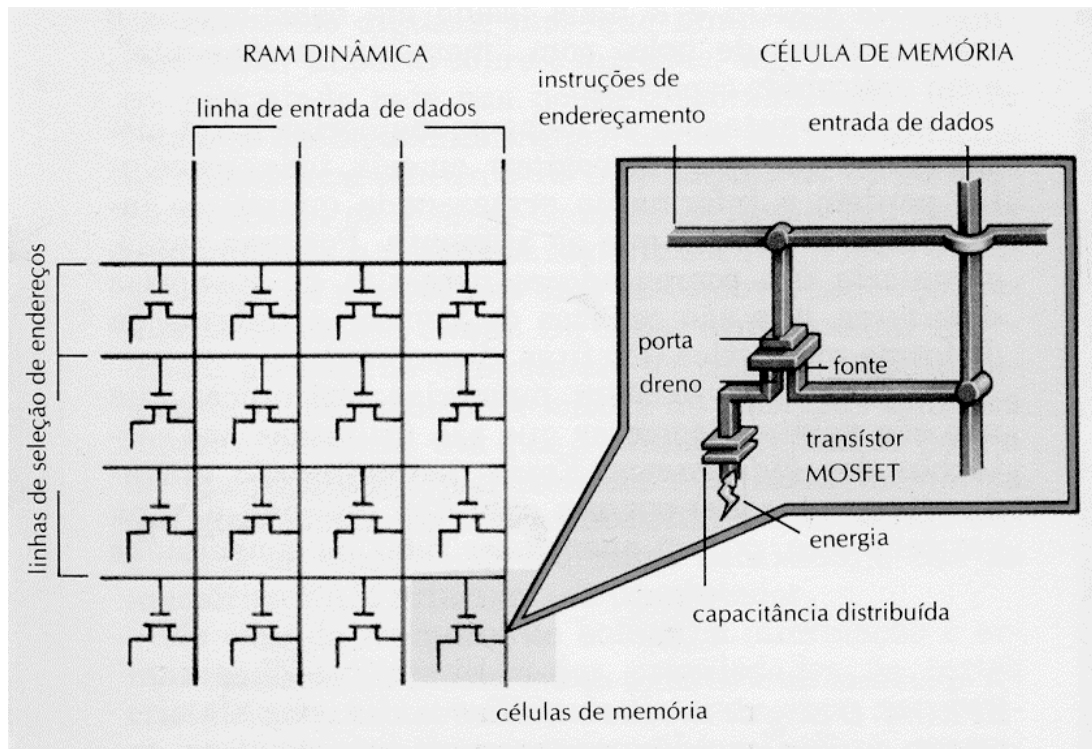


Fig. 22 Esquema de uma memória de computador RAM utilizando CMOSFET.

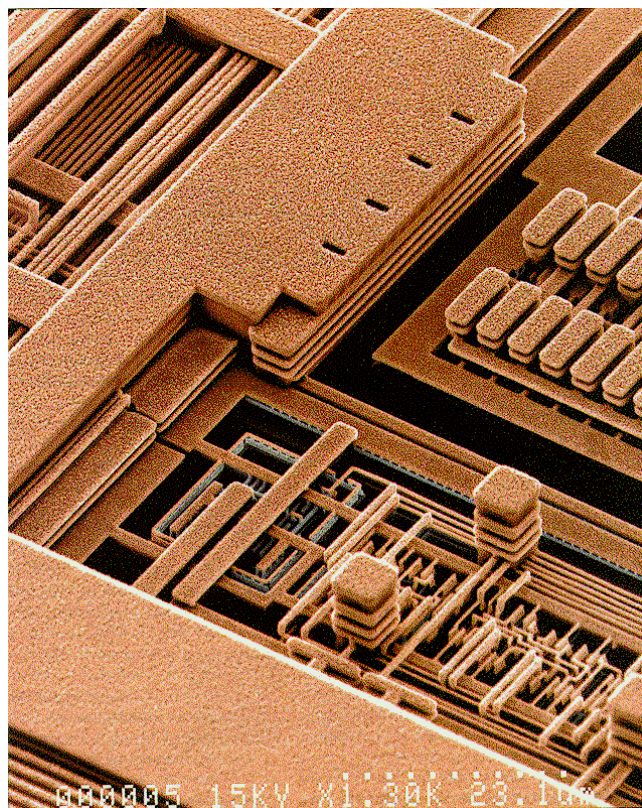


Fig. 23 Fotomicrografia de um circuito integrado CMOS.

Comparação entre o transistor bipolar e o MOSFET.

Tendo em vista as características dos transistores bipolares e os FET estudados aqui, seria ilustrativo comparar os dois tipos de transistores disponíveis comercialmente para a mesma faixa de operação. A Tabela 2, extraída do livro “*The art of electronics*”, apresenta um quadro comparativo entre diferentes tipos de transistores.

Em geral, MOSFET de potência são alternativas mais atraentes do que os transistores bipolares. Embora eles custem mais caro, para a mesma capacidade, eles são mais simples de operar e possuem uma área de operação segura mais ampla do que os BJTs. Geralmente, os BJTs tem melhor desempenho em baixos sinais do que os MOSFETs. Em compensação, na faixa de 10-50 A/0-100 V, os MOSFETs tem melhor desempenho. Observe na Tabela 2 a enorme corrente de base necessária para trazer o BJT para saturação – 10% ou mais do valor da corrente do coletor. Comparativamente, o MOSFET requer apenas 10 V de polarização da porta (corrente zero). Naturalmente, os MOSFETs de potência tem capacitância maior do que os BJTs para a mesma corrente; em algumas aplicações (particularmente se o tempo de chaveamento for importante) é necessário considerar o produto da capacitância pela tensão de saturação como figura de mérito do dispositivo.

Tabela 2 Comparativo entre transistores bipolares e FET comerciais (Horowitz, 1993).

Classe	Tipo	i_C, i_D	V_{sat} máx. (V)		i_B, V_{GS}	C_{out} máx. (10 V)	Preço (US\$/100 pç)
			25°C	125°C			
60V, 0,5A	NPN: 2N4400	0,5A	0,75	0,8	50mA	8pF	0,09
	NMOS: VNO610	0,5A	2,5	4,5	10V	25pF	0,43
60V, 10A	NPN: 2N3055	10A	3	—	3,3A	600pF	0,65
	NMOS: MTP3055A	10A	1,5	2,3	10V	300pF	0,57
100V, 50A	NPN: 2N6274	20A	1	1,4	2A	600pF	11,00
	NMOS: VNE003A	20A	0,7	1,1	10V	3000pF	12,50
400V, 15A	NPN: 2N6547	15A	1,5	2,5	2A	500pF	4,00
	NMOS: IRF350	15A	3	6	10V	900pF	12,60

Referências bibliográficas

DIEFENDERFER, A.J. *Principles of electronic instrumentation*. Philadelphia, PA: Saunders College Publishing, 1979.

HOROWITZ, P., HILL, W. *The art of electronics*. New York: Cambridge University Press, 1993.

MALMSTADT, H.V., ENKE, C.G. *Electronics for scientists: principles and experiments for those who use instruments*. New York: W.A. Benjamin, 1962.

MILLMAN, J. & HALKIAS, C.C. *Electronic devices and circuits* (International student edition). Tokyo: McGraw-Hill Kogakusha, 1967.

SCHULER, C.A. *Electronics principles and applications*. New York: McGraw-Hill, 1985.

SEDRA, A.S., SMITH, K.C. *Microeletrônica*. São Paulo: Makron Books, 2000.

REZENDE, S.M. *A física de materiais e dispositivos eletrônicos*. Recife, PE: Editora Universitária da UFPE, 1996.