

# Fontes ou Geradores de Corrente Constante

PAULO BRITES \*

*Numa linguagem acessível para o iniciante e utilizando matemática elementar, o Autor comenta um dos circuitos que, embora de inúmeras aplicações, tem sido pouco abordado na literatura técnica.*

**EXISTEM** dois tipos de fontes, ou geradores, utilizados em Eletrônica: de tensão e de corrente. Neste trabalho vamos nos dedicar ao segundo tipo, o qual não parece ser muito familiar a um grande número de técnicos.

Uma fonte de tensão é, na verdade, um gerador de tensão que tem uma resistência interna muito baixa, entregando em sua saída um valor de tensão constante, para uma extensa gama de valores de carga a ele conectado. A definição que acabamos de apresentar se refere a um gerador prático, pois o gerador **ideal** apresenta resistência interna nula, e tensão de saída constante, para qualquer valor de carga.

Exemplos típicos de geradores de tensão que encontramos na prática são as fontes C.C. reguladas e os circuitos em seguidor de emissor ou seguidor de supridor.

## QUE É UM GERADOR DE CORRENTE?

Tais geradores podem ser definidos como fontes que apresentam resistência interna **muito alta** (idealmente infinita), sendo capazes de fornecer uma corrente de valor constante a qualquer carga, desde um circuito aberto (carga infinita) até um curto-circuito (carga zero).

Obviamente, na prática, tais tipos de geradores terão certas limitações, funcionando dentro de uma faixa de valores limitada. En-

tretanto, são altamente aceitáveis para as aplicações a que se destinam.

Os geradores de corrente passaram a ser mais divulgados com o surgimento dos transistores bipolares, os quais são, basicamente, dispositivos comandados por corrente. Por outro lado, muitos circuitos são analisados mais facilmente quando utilizamos geradores de corrente, em lugar dos de tensão, e com o auxílio do teorema de Norton, que é a versão para corrente do teorema de Thevenin.

A esta altura, já deve estar claro que os geradores de corrente são utilizados para estabilizar a corrente em uma carga que varia dentro de uma grande faixa de valores.

Outra aplicação para estes geradores é na obtenção de ondas triangulares, bastante lineares, através da carga e descarga de um capacitor sob regime de corrente constante. Vamos encontrar os geradores de corrente constante também em fontes reguladas de boa qualidade, amplificadores diferenciais e carregadores de baterias.

Para simbolizar o gerador de corrente em um diagrama usa-se uma das duas representações vistas na Fig. 1.

## CONSTRUINDO FONTES DE CORRENTE NA PRÁTICA

Na prática, os geradores de corrente constante podem assumir

diversas configurações. Começemos com um circuito de caráter didático, o qual se constitui, sem dúvida, numa boa aproximação de um gerador de corrente constante, obtido a partir de um gerador de tensão, que nada mais é que uma bateria de 9 V.

O circuito em questão está na Fig. 2a. Nele vemos uma bateria, ou seja, uma fonte de tensão, conectada em série com um resistor (que chamamos de  $R_1$ ), cujo valor escolhido foi 90 k $\Omega$ . Com este artifício simulamos um gerador de corrente de 0,1 mA. Como a bateria apresenta uma resistência interna muito baixa, não a levamos em conta, e consideramos a resistência interna do nosso gerador igual exatamente aos 90 k $\Omega$  colocados externamente.

Suponhamos, agora, que a carga ligada ao nosso gerador seja um curto-circuito, como se vê na Fig. 2b. Qual será, então, o valor da corrente que circulará na carga? Para saber, basta empregar a Lei de Ohm:

$$I = 9 \text{ V} / 90 \text{ k}\Omega = 0,1 \text{ mA}$$

Agora, substituamos a carga "curto-circuito" por uma  $R_L$  de 90  $\Omega$  (Fig. 2c). Neste caso, a corrente que circulará na carga será:

$$I = 9 \text{ V} / (90.000 \Omega + 90 \Omega) = 0,0999 \text{ mA}$$

Ora, 0,0999 mA pode ser considerada, com boa aproximação, 0,1 mA. Aumentemos a carga  $R_L$  para 900  $\Omega$ ; isto nos dará:

$$I = 9 \text{ V} / (90.000 \Omega + 900 \Omega) = 0,099 \text{ mA}$$

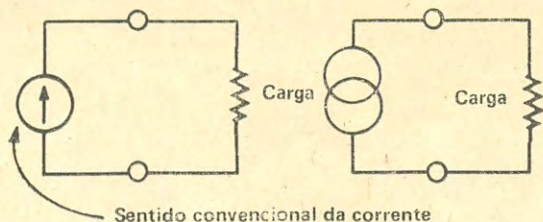


FIG. 1 — Representações simbólicas dos geradores de corrente.

(\*) Técnico de Telecomunicações da EMBRATEL.



$R_i$	$R_L$	$I_{CARGA}$	Erro
90 k $\Omega$	curto	0,1 mA	0%
90 k $\Omega$	90 $\Omega$	0,0999 mA	0,1%
90 k $\Omega$	900 $\Omega$	0,099 mA	1,0%
90 k $\Omega$	9.000 $\Omega$	0,0909 mA	9,1%

Percentagem de erro da corrente de carga, em função de  $R_L$  e em relação à corrente de curto-circuito do gerador básico da Fig. 2.

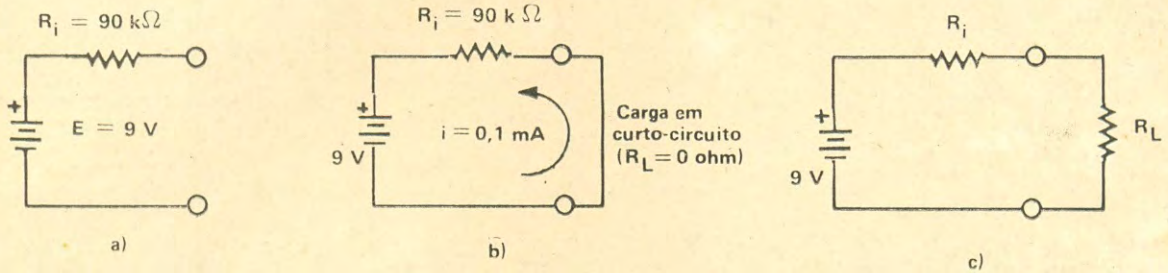


FIG. 2 — Gerador de corrente constante simplificado: a) circuito básico; b) com a saída em curto, a corrente se apresenta com o valor constante de 0,1 mA; c) com uma carga ligada aos terminais de saída, desde que esta não apresente valores de resistência elevados, em relação à resistência interna do gerador, para todos os fins práticos, a corrente pode ser considerada constante.

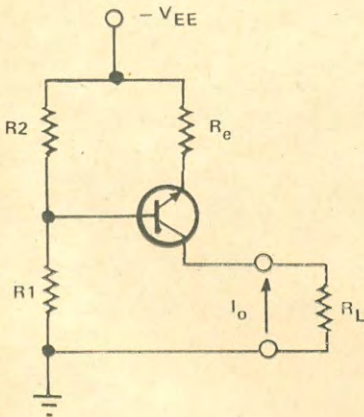


FIG. 3 — Utilização de um transistor bipolar em um circuito típico de gerador de corrente constante.

que ainda dá para considerar como 0,1 mA. Se quisermos calcular o erro quando utilizamos a carga de 90  $\Omega$  e a de 900  $\Omega$ , em relação à corrente obtida para a condição de curto-circuito, devemos utilizar a seguinte fórmula:

$$\text{Erro}(\%) = \frac{(I_{\text{curto}} - I_{\text{carga}})}{I_{\text{curto}}} \times 100$$

No caso dos 90  $\Omega$ , o erro será de 0,1%, enquanto que com  $R_L$  igual a 900  $\Omega$ , temos 1% de erro.

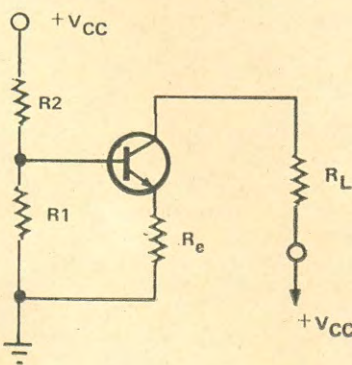


FIG. 4 — Neste circuito de gerador de corrente constante, a carga é ligada entre o positivo da fonte (+VCC) e o coletor do transistor.

Entretanto, se aumentarmos a carga para 9 k $\Omega$ , a corrente será 0,0909 mA, que corresponde a um erro de 9,1%. Na Tabela I temos um resumo destes valores, para melhor acompanhamento.

Note que uma carga de até 900  $\Omega$  ainda é um valor bem pequeno em relação à nossa  $R_i$ , que é de 90 k $\Omega$ . Portanto, a variação da corrente entregue pelo gerador se situa em 1%.

Deste exemplo, podemos estabelecer que um bom critério para se obter uma fonte de cor-

rente é fazer com que sua resistência interna seja, no mínimo, 100 vezes o valor da maior carga a ser utilizada, o que nos assegurará um erro máximo de 1%.

Insistimos em dizer que não é o valor absoluto da resistência interna do gerador que irá qualificá-lo como um "bom" gerador de corrente, e sim a sua resistência interna ( $R_i$ ), comparada com a resistência da carga ( $R_L$ ).

No exemplo que estudamos, se quiséssemos utilizar cargas de 9 k $\Omega$ , seria necessário que a

resistência interna do nosso gerador fosse, no mínimo, 900 k $\Omega$ .

Todavia, isto acarretaria a necessidade de uma fonte de tensão de 90 V, para conseguirmos 0,1 mA constantes na carga. Caso quiséssemos reduzir o erro abaixo de 1%, deveríamos trabalhar com uma  $R_L$  de 9 M $\Omega$  e uma fonte de tensão de 900 V! Como se vê, esta solução deixa de ser prática, pois, além de cara, é até perigosa!

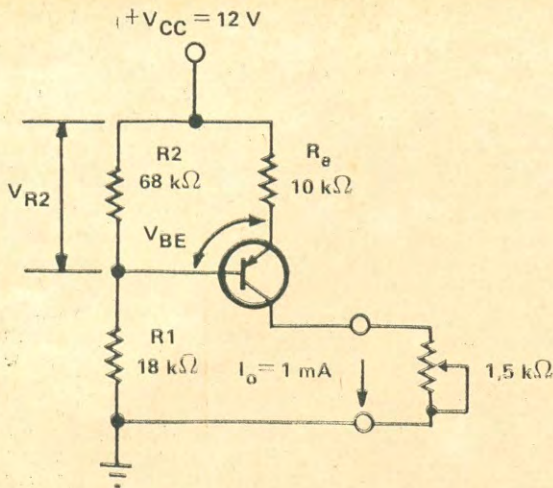
A seguir, veremos algumas das soluções adotadas na prática para obter fontes de corrente que, além de operarem com baixas tensões, são de desempenho muito bom.

## UM TRANSISTOR BIPOLAR COMO GERADOR DE CORRENTE

Um transistor bipolar, polarizado na região linear de sua curva característica, é um gerador de corrente natural. Além disso, podemos polarizá-lo de modo que sua corrente de coletor apresente, praticamente, qualquer valor necessário à aplicação em vista.

A resistência de saída desses geradores é, essencialmente, a de uma junção base/coletor polarizada inversamente. Portanto, bem elevada. Seu valor, como sabemos, é dado por





$$R_o = 1/h_{ob}$$

Na Fig. 3 temos uma típica fonte de corrente constante utilizando um transistor bipolar. A polarização deste transistor é determinada pelo divisor de tensão formado por R1 e R2, bem como o valor de tensão que tivermos sobre  $R_e$ .

O valor de  $R_e$ , por sua vez, determinará a corrente de emissor e, por conseguinte, a corrente de coletor (ou da carga), já que  $I_c$  é, aproximadamente, igual a  $I_e$ . Ora, se a corrente de saída é a própria corrente de coletor do transistor, ela será de valor praticamente constante.

Note que no circuito da Fig. 3 a carga é ligada entre o coletor do transistor e a massa, sendo utilizada uma fonte ( $-V_{BE}$ ) para polarizar o transistor.

Na Fig. 4 temos uma outra configuração para este circuito, onde a carga fica ligada entre o coletor do transistor e  $+V_{CC}$ . É óbvio que, se utilizarmos transistores p-n-p em lugar de n-p-n, teremos que inverter a polaridade das fontes em ambos os circuitos.

Passemos, agora, à realização prática de um gerador de corrente do tipo apresentado acima, para ver como dimensionar seus componentes.

Em nosso exemplo, vamos utilizar um circuito similar ao da Fig. 3, todavia empregando um transistor p-n-p. Desta forma, temos que contar com uma fonte  $+V_{CC}$ . Na Fig. 5 se encontra o circuito que vamos projetar e experimentar.

Estabelecemos as seguintes condições para o nosso gerador de corrente constante: 1) corren-

te de saída igual a 1 mA; 2) carga variando entre 0 e 1 kΩ; 3) alimentação através de uma fonte de tensão de 12 V ( $+V_{CC}$ ).

Iniciaremos nosso cálculo analisando  $R_e$ . Para tal temos:

$$R_e = V_{BE}/I_o \quad (1)$$

Ainda, analisando o circuito, obteremos:

$$V_{CC} = V_{R_e} + V_{CE} + V_{BE} \quad (2)$$

tendo essa expressão sido obtida pela aplicação da Lei de Kirchoff na malha de coletor.

Por outro lado, como nossa carga varia entre 0 e 1 kΩ, devendo a corrente nela ficar constante em 1 mA, concluímos que  $V_{BL}$  deverá variar entre 0 V e 1 V ( $I_o \times R_L$ ).

Para garantirmos que o transistor não ficará saturado, faremos  $V_{CE} = 2$  V. Introduzindo estes valores na expressão (2), teremos:

$$12 \text{ V} = V_{R_e} + 2 \text{ V} + 1 \text{ V}$$

Portanto,  $V_{R_e} = 9$  V. Retornando, agora, à expressão (1), teremos:

$$R_e = 9 \text{ V}/1 \text{ mA} = 9 \text{ k}\Omega$$

Adotaremos o valor de 10 kΩ para  $R_e$ .

Pelo circuito básico, tiramos a seguinte equação:

$$V_{R2} = V_{BE} + V_{R_e} \quad (3)$$

Teremos, então:

$$V_{R2} = 0,7 \text{ V} + 9 \text{ V} = 9,7 \text{ V}$$

Para calcular R2 bastará conhecer a corrente que circula por

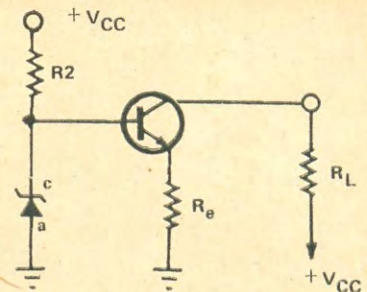


FIG. 6 — Para melhorar a estabilidade do circuito gerador de corrente constante, emprega-se um diodo zener para fornecer a polarização.

este resistor, a qual será arbitrada em 10 vezes o valor de  $I_o$ . Pela definição de  $h_{FE}$ , tiramos:

$$I_B = I_o/h_{FE}, \text{ onde } I_o = I_o$$

Para o nosso projeto, escolhemos o transistor BC558, cujo  $h_{FE}$  varia entre 75 e 250. Utilizando o  $h_{FE}$  mínimo para o cálculo, teremos:

$$I_B = 1 \text{ mA}/75 = 13,3 \mu\text{A}$$

Chegamos, finalmente, ao valor de R2:

$$R2 = 9,7 \text{ V}/(10 \times 13,3 \mu\text{A}) = 72,9 \text{ k}\Omega$$

Adotaremos para R2 68 kΩ, que é o valor padronizado mais próximo.

Para o cálculo de R1 utilizaremos a mesma corrente que passa em R2, uma vez que  $I_B$  foi considerada 10 vezes menor, podendo, portanto, ser desprezada. Sendo assim, teremos:

$$R1 = (12 - 9,7)/133 \mu\text{A} = 17,29 \text{ k}\Omega$$

Usaremos, neste caso, um resistor de 18 kΩ.

Terminados os cálculos, sugerimos que seja montado o circuito com os valores obtidos, e comprovados os resultados experimentalmente.

### MELHORANDO O GERADOR DE CORRENTE "A TRANSISTOR"

Quando se deseja melhorar a estabilidade do circuito, ou melhor, do gerador de corrente, utiliza-se um diodo zener para fornecer a polarização, como sugere a Fig. 6.

Uma outra configuração, também encontrada na prática, é a da Fig. 7. Nela vemos um diodo retificador comum, colocado em série com o zener. Sua função é



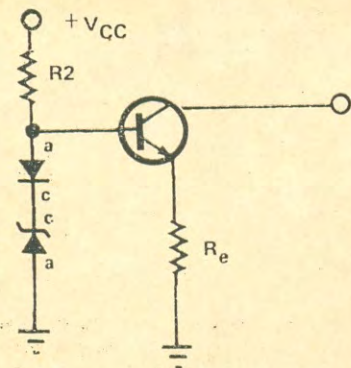


FIG. 7 — Um diodo comum, em série com o zener, compensa as variações de tensão neste último, decorrentes das variações de temperatura.

promover uma estabilização de temperatura, melhorando, assim, ainda mais, o desempenho do gerador. Caso venhamos a utilizá-lo, devemos nos lembrar que ele apresenta uma queda de cerca de 0,7V entre seus terminais, quando conduzindo, o que deverá ser levado em consideração no cálculo. No circuito da Fig. 7, um aumento na temperatura provocará um aumento na tensão inversa do diodo zener, o que faria a corrente de saída variar.

Entretanto, um diodo de silício tem coeficiente de temperatura negativo, o que compensará o aumento da tensão do zener. Observamos, ainda, que poderemos utilizar dois diodos em série

para corrigir os efeitos da temperatura, caso isto seja necessário. Vejamos porquê.

Ocorre que uma variação na temperatura também provoca variação na tensão  $V_{BE}$  do transistor. Como a junção base/emissor de um transistor é similar à de um diodo, ela também tem coeficiente de temperatura negativo. Assim, acrescentando mais um diodo em série com o zener, ele compensará esta outra variação.

Na Fig. 8 temos o circuito completo, no qual, em linhas gerais, ocorre o seguinte: D1 compensa a variação em  $V_{BE}$ ; D2 compensa a variação no zener.

Vejamos, agora, uma variante deste circuito, a qual é utilizada

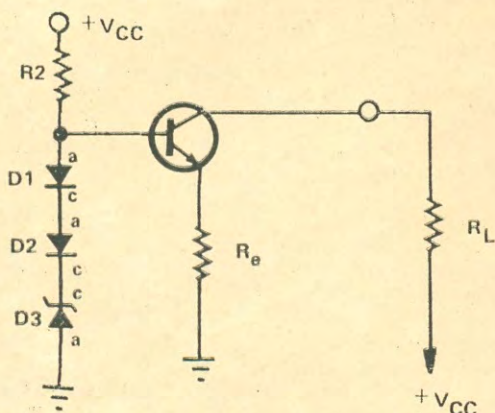


FIG. 8 — A inclusão de dois diodos, em série com o zener, irá compensar as variações na tensão deste, e também as de  $V_{BE}$  do transistor, ambas causadas pela mudança na temperatura.

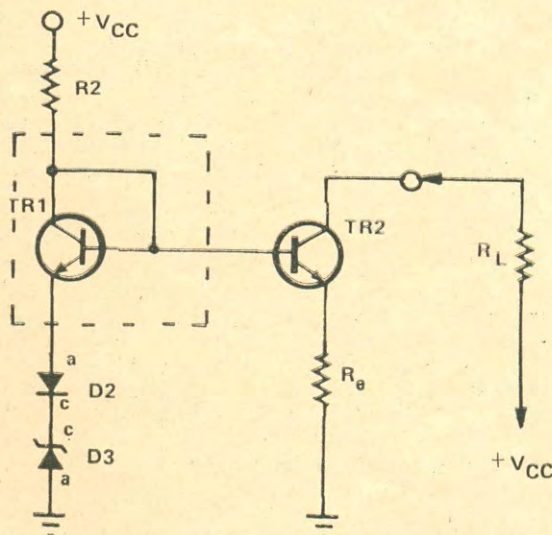


FIG. 9 — Para compensar, de forma mais eficiente, as variações de  $V_{BE}$  de TR2 em função da temperatura, utiliza-se a junção base/emissor de TR1, que deverá ser um transistor idêntico a TR2. Este circuito se destina a geradores de corrente constante de grande precisão.

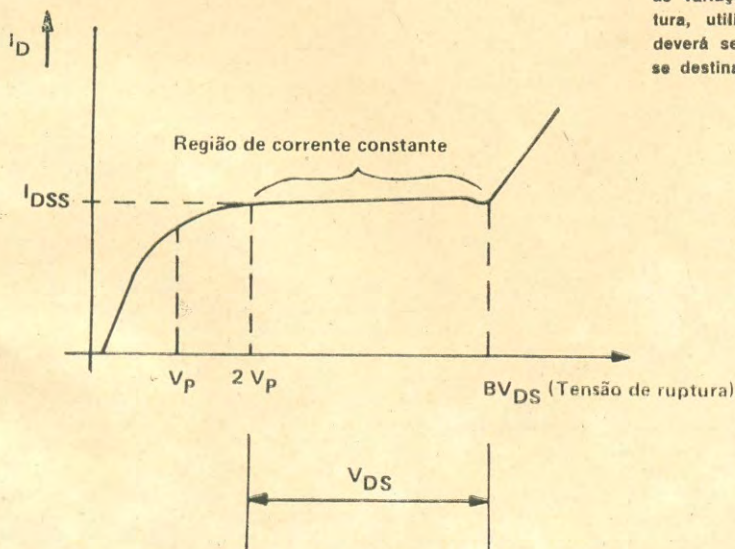


FIG. 10 — Curva característica típica de um T.E.C.

quando se necessita de geradores de corrente de grande precisão. Na Fig. 9 notamos que o diodo D1 foi substituído pela junção base/emissor do transistor TR1, o qual deve ser igual a TR2. Isto é feito para garantirmos que a variação de temperatura que vai compensar TR2 seja idêntica, pois, sendo iguais os transistores, eles deverão ter o mesmo coeficiente de temperatura.

#### UM GERADOR DE CORRENTE CONSTANTE COM TRANSISTOR DE EFEITO DE CAMPO (T.E.C.)

Embora o T.E.C. seja um dispositivo comandado por tensão,



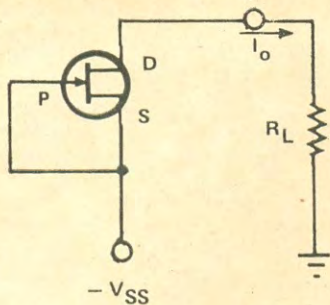


FIG. 11 — Circuito de um gerador de corrente constante que utiliza um T.E.C.

sua curva característica mostra que ele é um gerador de corrente natural. Para relembrar, mostramos na Fig. 10 a curva característica típica de um T.E.C.

O circuito que utilizaremos para o nosso gerador de corrente está na Fig. 11. Nele se vê que a porta (P) está ligada ao supridouro (S), sendo a carga ligada entre o dreno (D) e a massa. Com esta montagem, tomando-se o cuidado de fazer com que a tensão  $V_{DS}$ , entre o supridouro e o dreno, seja maior que o valor da tensão de corte ("pinch off")  $V_p$ , o T.E.C. operará em sua região de corrente constante, e assim, grandes variações na tensão  $V_{DS}$  terão pouco, ou nenhum, efeito na corrente de dreno, que será a corrente de saída. Conclui-se, assim, que tanto a carga como  $V_{DS}$  poderão variar bastante, mas que ainda manteremos a corrente de saída constante.

Caso se deseje obter um gerador que forneça uma corrente de saída diferente de  $I_{DSS}$  (corrente de dreno para  $V_{PS} = 0$ ), basta fazer uma ligeira implementação no circuito, introduzindo um resistor ( $R_s$ ) entre o supridouro e a fonte  $V_{SS}$ , como se vê na Fig. 12.

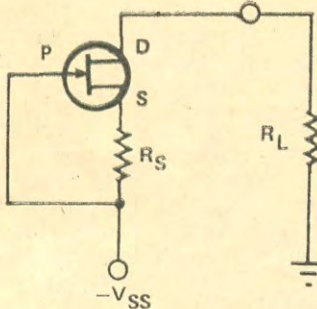


FIG. 12 — Quando se deseja uma corrente de saída com valor diferente de  $I_{DSS}$ , no circuito da Fig. 11, emprega-se um resistor entre o supridouro do T.E.C. e a fonte  $V_{SS}$ .

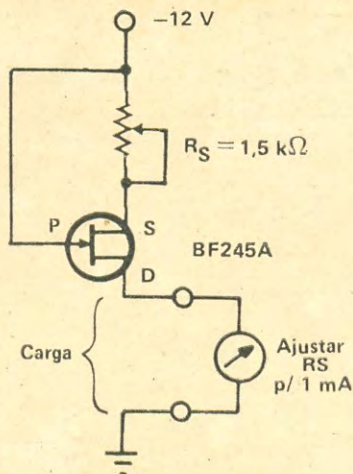


FIG. 13 — Circuito prático de um gerador de corrente constante com T.E.C. (BF245A, da Ibrape).

Para sedimentar os conhecimentos adquiridos devemos, agora, projetar e montar uma fonte de corrente com T.E.C. Para o nosso projeto, escolhemos o T.E.C. BF245A, da Ibrape, que apresenta as seguintes características:

$$BV_{DS} = 25 \text{ V (tensão de ruptura)}$$

$$I_{DSS} = 2 \text{ mA (mín.)}, \text{ e } 6,5 \text{ mA (máx.)}$$

$$V_p = 0,5 \text{ V (mín.) e } 8 \text{ V (máx.)}$$

Devemos ter em mente que a corrente de saída deve ser menor que o valor de  $I_{DSS}$  mínimo do T.E.C. Com base nesta informação, vamos estabelecer que a nossa fonte de corrente deverá fornecer 1 mA para uma carga variando entre zero e 1 kΩ, donde  $V_{RL}$  será, no máximo, igual a 1 V. Por outro lado,  $V_{DS}$  deve ser mantido entre duas vezes  $V_p$  e  $BV_{DS}$ ; logo, precisamos saber o valor de  $V_p$ . Para tal, utilizaremos a média geométrica entre  $V_{p \text{ (mín.)}}$  e  $V_{p \text{ (máx.)}}$ , ou seja:

$$V_p = \sqrt{0,5 \times 8} = 2 \text{ V}$$

Teremos, então, que  $V_{DS}$  deverá estar entre 4 e 25 V. Analisando o circuito da Fig. 12, tiramos a seguinte expressão:

$$V_{SS} = V_{RS} + V_{DS} + V_{RL}$$

Donde concluiremos que poderemos escolher para  $V_{SS}$  o valor de 12 V, que será plenamente com-

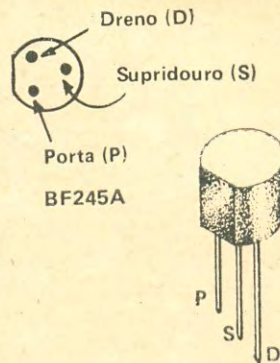


FIG. 14 — Identificação dos terminais do transistor de efeito de campo BF245A (Ibrape).

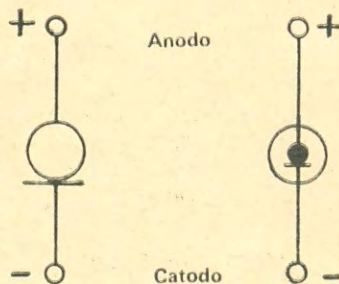


FIG. 15 — Simbologia empregada para representar diodos de corrente constante, ou diodos T.E.C.

patível com as condições exigidas. Resta, apenas, calcular  $R_s$ , o que será feito pela equação:

$$R_s = V_{PS}/I_o$$

$V_{PS}$ , por sua vez, será calculada pela expressão:

$$V_{PS} = V_p (1 - \sqrt{I_o/I_{DSS}})$$

Mais uma vez, como  $I_{DSS}$  varia entre 2 e 6,5 mA, usaremos a média geométrica entre estes dois valores, obtendo-se:

$$I_{DSS} = \sqrt{2 \times 6,5} = 3,6 \text{ mA}$$

Eis, portanto, que

$$V_{PS} = 2 (1 - \sqrt{1/3,6}) = 0,95 \text{ V}$$

Temos, finalmente:

$$R_s = 0,95/1 \text{ mA} = 950 \Omega$$

Obtido este valor, montamos o circuito utilizando um potenciômetro de 1,5 kΩ, e ajustamos a corrente de saída em 1 mA.



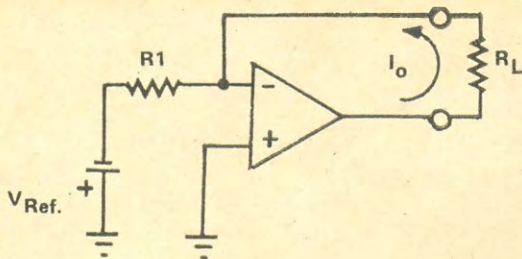


FIG. 16 — Configuração típica de um gerador de corrente constante com amplificador operacional.

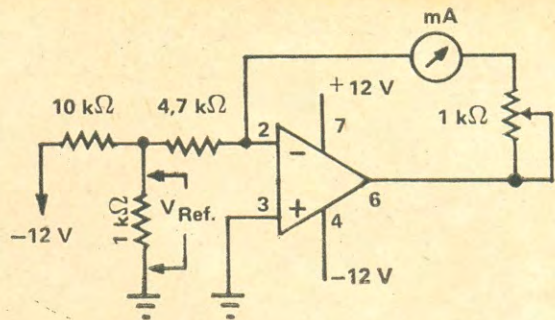


FIG. 17 — Circuito prático de um gerador de corrente constante que utiliza o operacional integrado 741.

$$V_{ref} = 1 \text{ k}\Omega \frac{12 \text{ V}}{10 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega} \approx 1,1 \text{ V}$$

$$I_o = \frac{1,1 \text{ V}}{4,7 \text{ k}\Omega} = 0,23 \text{ mA (Independente da carga)}$$

A configuração final é vista na Fig. 13, enquanto que, na Fig. 14, temos a disposição dos terminais do BF245A.

### DIODOS DE CORRENTE CONSTANTE

Similarmente aos diodos de tensão constante, ou seja, diodos zener, temos já disponível no mercado (não no Brasil, por enquanto) um semiconductor especial, que realiza a mesma função que a obtida com componentes discretos na Fig. 13. São eles denominados **diodos de corrente constante** ou **diodos T.E.C.** O símbolo deste componente é um dos apresentados na Fig. 15. Estes diodos podem ser encontrados em uma ampla faixa de valores, na região dos miliampères e microampères.

### GERADORES DE CORRENTE CONSTANTE COM AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

Uma fonte de corrente constante, de boa qualidade, pode ser obtida com um amplificador operacional (amp op), de acordo com a configuração mostrada na Fig. 16. Usando-se este circuito, a corrente na carga será dada pela fórmula:

$$I_o = V_{ref}/R1$$

Observe que o sentido da corrente na carga vai depender da polaridade da tensão de referência.

O desempenho deste gerador de corrente pode ser comprovado com o circuito que sugerimos na Fig. 17, no qual utilizamos o amplificador operacional integrado 741. Com este operacional e

os valores indicados para os demais componentes obtivemos bons resultados, para correntes da ordem de 0,23 mA. Para correntes maiores que 5 mA, será necessário utilizar transistores adicionais.

#### Finalizando...

Na prática, você irá certamente encontrar circuitos mais elaborados, com amp ops, e até mesmo reguladores de tensão adaptados para servir como geradores de corrente constante. Não os apresentaremos aqui, pois isto tornaria o trabalho muito extenso. Nossa intenção foi a de dar ao leitor uma visão geral de um tipo de circuito que, embora tenha muitas aplicações na Eletrônica, se encontra ainda pouco difundido.

Esperamos ter alcançado nosso objetivo!

o o o — o — (OR 1713)

LINHA COMPLETA DE PEÇAS E COMPONENTES

# PHILIPS

REVENDEDOR  
AUTORIZADO

Eletrônica *Servi-Som* Ltda.

Rua Aurora 253 — Tel.: 221-7317  
S. Paulo — SP — C.E.P. 01209