

Sumário

Introdução	5
Regulação de tensão em fontes de alimentação	6
Circuitos reguladores	8
Regulação série com transistor	9
Princípio de funcionamento	9
Estabilização	10
Regulação	12
Diodo compensador	13
Dissipação de potência no regulador série	15
Encapsulamento	15
Dissipadores de calor	18
Montagem do transistor no dissipador	19
Otimização da transferência de calor	21
Apêndice	22
Questionário	22
Bibliografia	22



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

A partir da descoberta do transistor, sua utilização difundiu-se muito rapidamente. O grande número de vantagens que o transistor apresentava em relação à válvula fez que em muito pouco tempo aquele componente semiconductor fosse largamente utilizado na maioria dos circuitos eletrônicos.

Uma aplicação importante do transistor refere-se ao seu uso na regulação de fontes de alimentação. Essa é uma técnica largamente utilizada na maioria dos circuitos eletrônicos em uso hoje em dia.

Este fascículo tratará do princípio de funcionamento das fontes reguladas a transistor e também do uso de dissipadores de calor, visando a capacitar o leitor a utilizar, montar e reparar fontes reguladas a transistor.



Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- Filtros em fontes de alimentação.
- Regulação de tensão a diodo Zener.
- Transistor bipolar: relação entre parâmetros de circuito.

Regulação de tensão em fontes de alimentação

A necessidade de projetar e montar fontes reguladas de boa qualidade provém do fato de as fontes não reguladas nem sempre atenderem aos requisitos exigidos na maioria das aplicações. Existem fundamentalmente duas razões pelas quais as fontes não reguladas são inadequadas em certas aplicações:

Regulação pobre: Como resultado de uma regulação pobre, verifica-se uma variação na tensão de saída quando a carga é alterada. A influência de uma regulação pobre no desempenho de uma fonte *cc* pode ser observada através de dois gráficos: um correspondente a uma fonte ideal e o outro, a uma fonte real, conforme ilustrado na **Fig.1**.

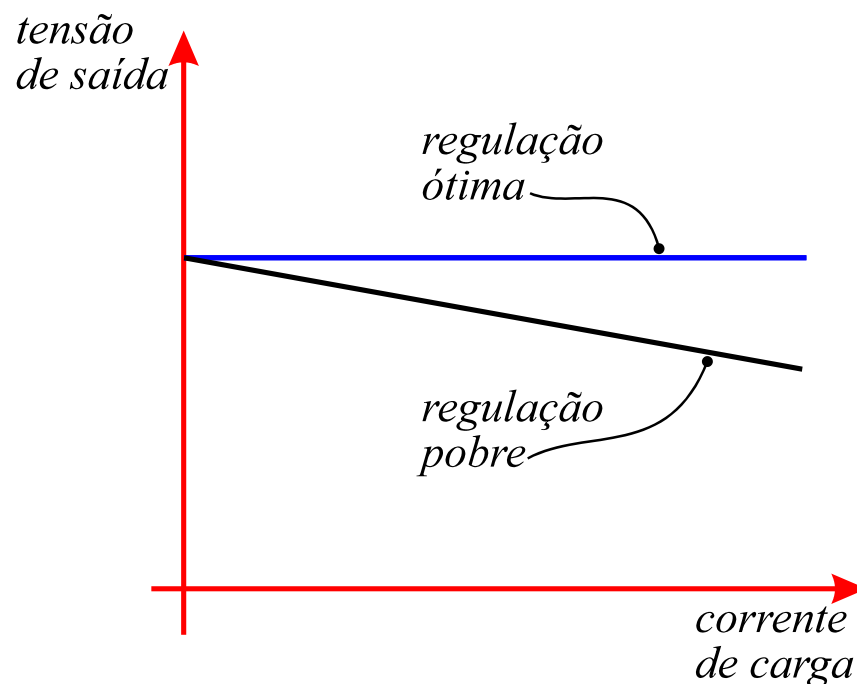


Fig.1 Dependência da tensão de saída com a corrente de carga para uma fonte ideal e uma fonte real.

Estabilização pobre: Nas fontes não reguladas, a tensão de saída acompanha as variações na tensão de entrada, conforme ilustrado na **Fig.2**.

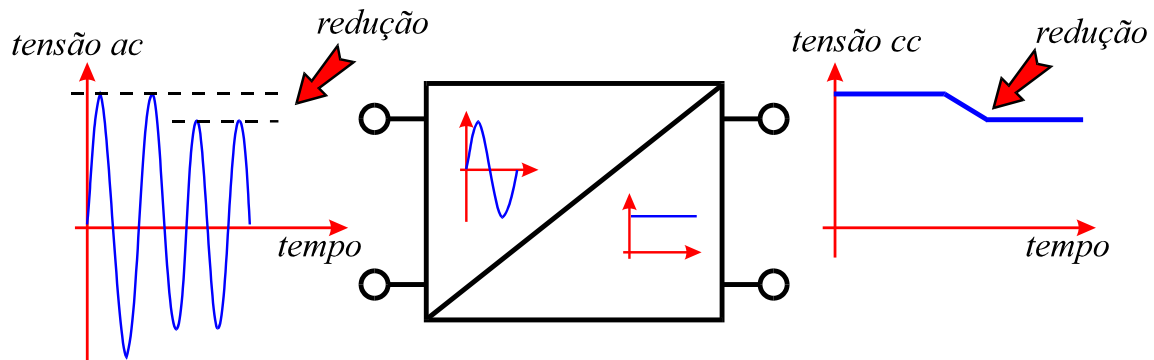


Fig.2 Redução na tensão de saída provocada por uma redução no nível de entrada.

A finalidade de um regulador de tensão é melhorar o desempenho das fontes de alimentação, fornecendo um valor prestabelecido de tensão na saída, independentemente das variações na corrente de carga ou no nível da tensão *ca*, como mostrado na **Fig.3**.



Fig.3 Efeito de um circuito regulador sobre a tensão de saída de uma fonte retificada.

É importante considerar que não existe um sistema regulador de tensão perfeito. As variações na tensão de entrada sempre provocam pequenas alterações na tensão de saída. Os sistemas reguladores devem funcionar de tal forma que a variação na tensão de saída seja a menor possível.

Circuitos reguladores

Os circuitos reguladores são classificados em dois grupos, segundo a posição do elemento regulador em relação à carga. Um dos grupos é denominado de **regulador paralelo**, pois o elemento regulador é disposto em paralelo com a carga, conforme ilustrado na Fig.4. Um exemplo típico de um circuito pertencente a esse grupo é o regulador a diodo Zener.

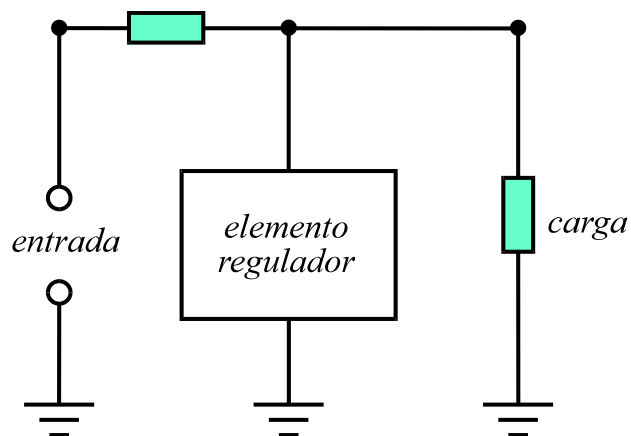


Fig.4 Modelo de um regulador paralelo.

O segundo grupo, denominado de **regulador série**, corresponde a uma configuração em que o elemento regulador fica disposto em série com a carga, como mostrado na Fig.5.

Como ilustrado na Fig.5, na regulação série, variações na tensão de entrada são transferidas para o elemento regulador, com a tensão de saída permanecendo praticamente constante.

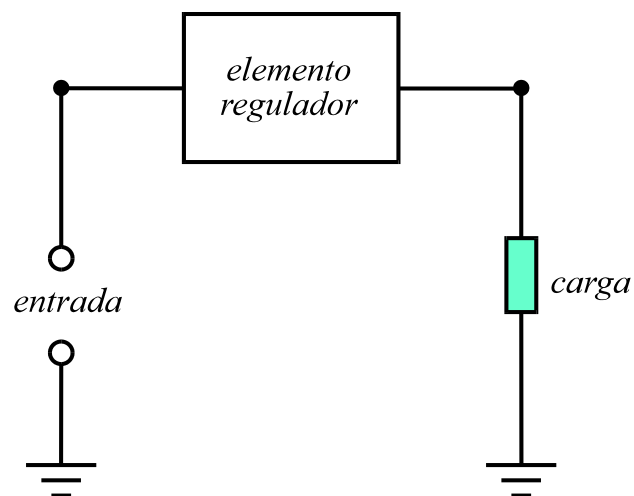


Fig.5 Modelo de um regulador série.

REGULAÇÃO SÉRIE COM TRANSISTOR

Os reguladores de tensão do tipo série com transistor são largamente empregados na alimentação de circuitos eletrônicos por apresentarem uma boa capacidade de regulação. Na **Fig.6** está apresentado o modelo mais simples de um regulador série a transistor.

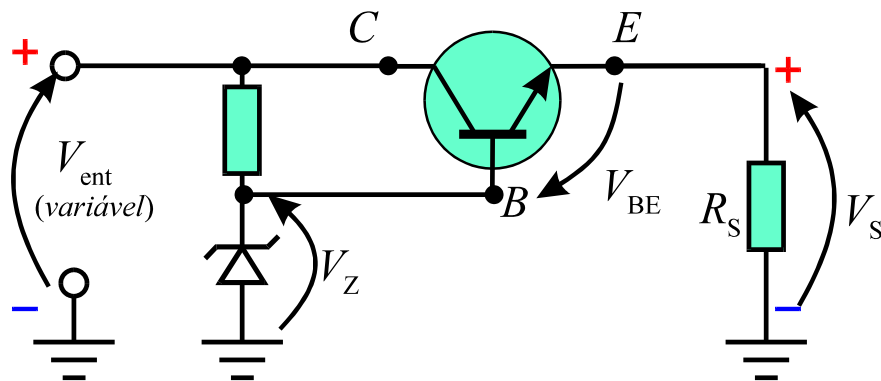


Fig.6 Modelo simples de um regulador série a transistor.

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O princípio de funcionamento do regulador série a transistor pode ser compreendido analisando-se as tensões nos vários elementos do circuito mostrado na **Fig.7**. Como pode ser aí observado, a associação diodo Zener/resistor, conectada à tensão de entrada, permite a obtenção de uma tensão constante V_Z independentemente das variações da tensão de entrada.

A tensão constante do diodo Zener, mostrado na **Fig.7**, é aplicada à base do transistor, ou seja, a tensão de base do transistor é dada por

$$V_B = V_Z \quad (1)$$

A tensão na carga é relacionada à tensão base-emissor e a tensão na base pela relação

$$V_S = V_Z - V_{BE} \quad (2)$$

Como mostrado na **Fig.7**, a diferença entre a tensão de entrada e a tensão na carga fica aplicada entre os terminais do coletor e do emissor, ou equivalentemente,

$$V_S = V_{ent} - V_{CE} \quad (3)$$

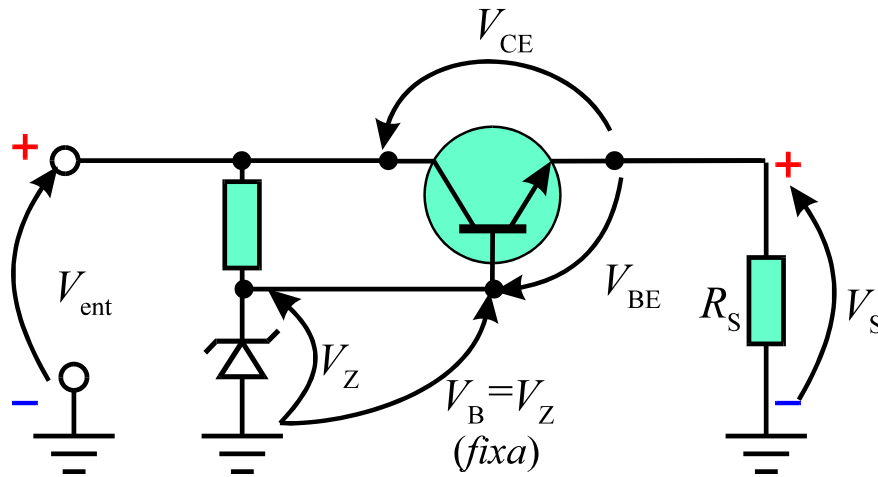


Fig.7 Tensões no regulador série a transistor.

ESTABILIZAÇÃO

No regulador série a transistor, a tensão aplicada à base do transistor corresponde à tensão Zener e pode ser considerada constante. Nessas condições, a tensão na carga também se mantém constante com um valor de 0,2 a 0,7 V inferior à tensão Zener.

Como ilustrado na **Fig.8** as variações na tensão de entrada são assimiladas pelo transistor através de modificações na tensão coletor-emissor. Como pode ser aí observado, a tensão de entrada é sempre superior à tensão de saída. Essa condição é necessária pois garante que a tensão coletor-emissor do transistor possa variar sem alterar a tensão de saída do circuito. Em geral, a tensão de entrada é aproximadamente 50% superior à tensão regulada na saída.

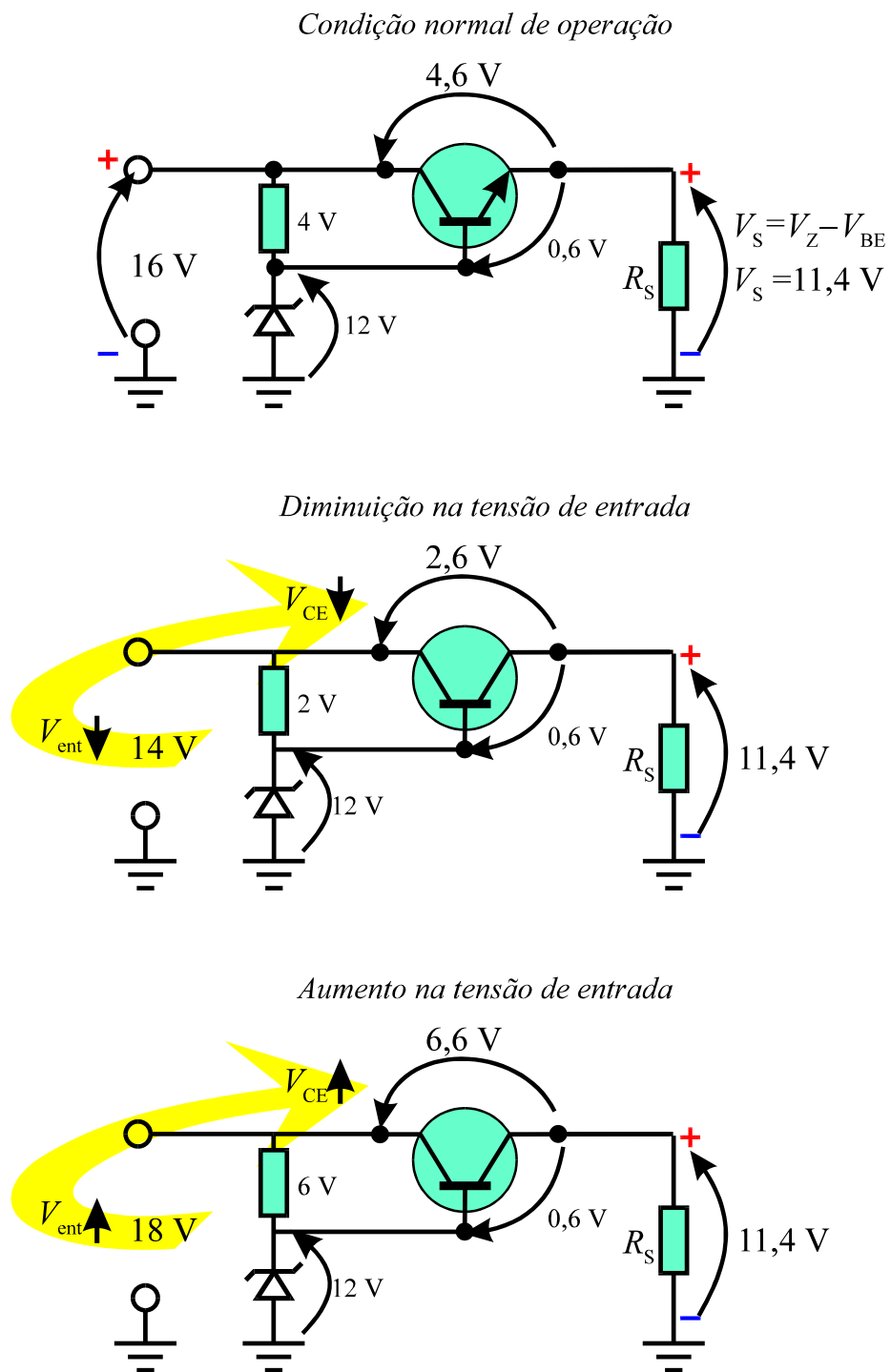


Fig.8 Exemplo ilustrando as modificações nas tensões no regulador decorrentes de variações na tensão de entrada.

REGULAÇÃO

A observação do comportamento das correntes do circuito permite analisar a forma como o regulador reage às variações na corrente de carga.

As correntes do circuito regulador estão mostradas na **Fig.9**, onde se considera que a corrente de carga esteja inicialmente em um valor I_S . Considera-se que a corrente de coletor seja igual à corrente de carga, devido à aproximação

$$I_S = I_E \approx I_C$$

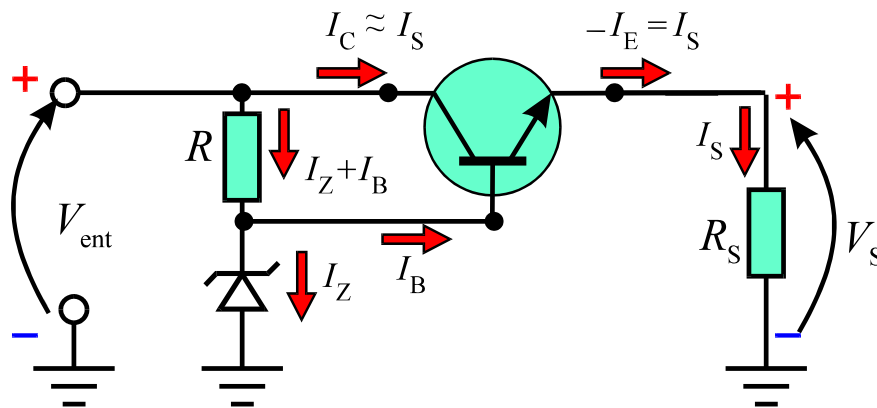
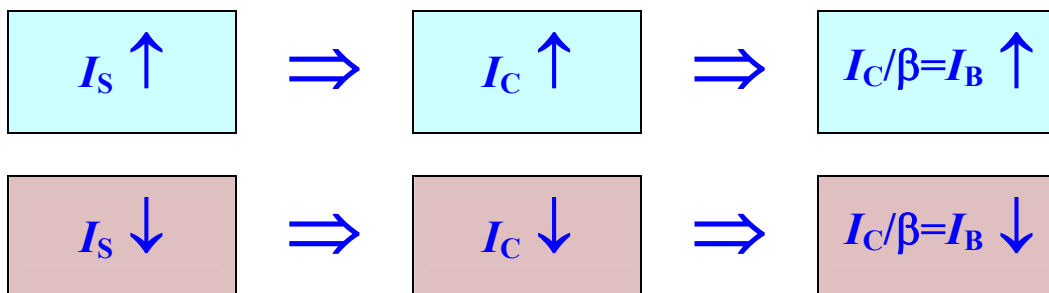


Fig.9 Correntes no regulador série a transistor.

Como se pode observar na **Fig.9**, a corrente de base necessária para que o transistor forneça a corrente de carga é obtida da combinação resistor/diodo Zener. Qualquer modificação no valor da carga altera a corrente de coletor o que produz uma variação na corrente de base na mesma proporção.



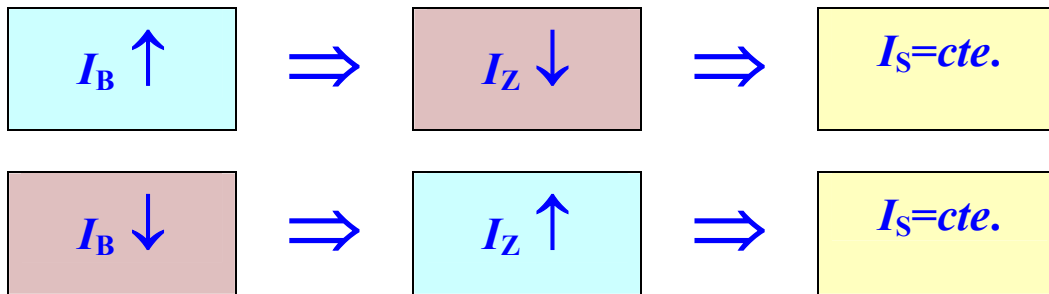
Fixando-se o valor da tensão de entrada V_{ent} , a corrente no resistor R da **Fig.9**

$$I_R = \frac{V_{ent} - V_Z}{R} \quad (4)$$

permanece fixa, devido ao valor constante da tensão V_Z . Da **Fig.9** tem-se que

$$I_R = I_B + I_Z \quad (5)$$

e as variações em I_B e I_Z ocorrem em sentidos opostos de forma a manter I_R no seu valor constante.



Dessa forma, cabe ao diodo Zener liberar mais ou menos corrente para a base do transistor de forma a manter a corrente de carga constante.

Verifica-se que no regulador série, a condição fundamental para manter a tensão de saída constante é o efeito regulador do diodo Zener. A tensão sobre o diodo deve manter-se no valor V_Z independentemente de variações na carga ou na tensão de entrada.

DIODO COMPENSADOR

A tensão de saída no regulador série pode ser obtida da **Eq.(2)**, que está reproduzida a seguir:

$$V_S = V_Z - V_{BE} \quad (2)$$

A **Eq.(2)** mostra que a tensão de saída é sempre inferior à tensão Zener por uma quantidade igual à tensão base-emissor. Para compensar esse decréscimo na tensão de saída, é prática comum adicionar um **diodo compensador**, diretamente polarizado, em série com o diodo Zener, como mostrado na **Fig.10**.

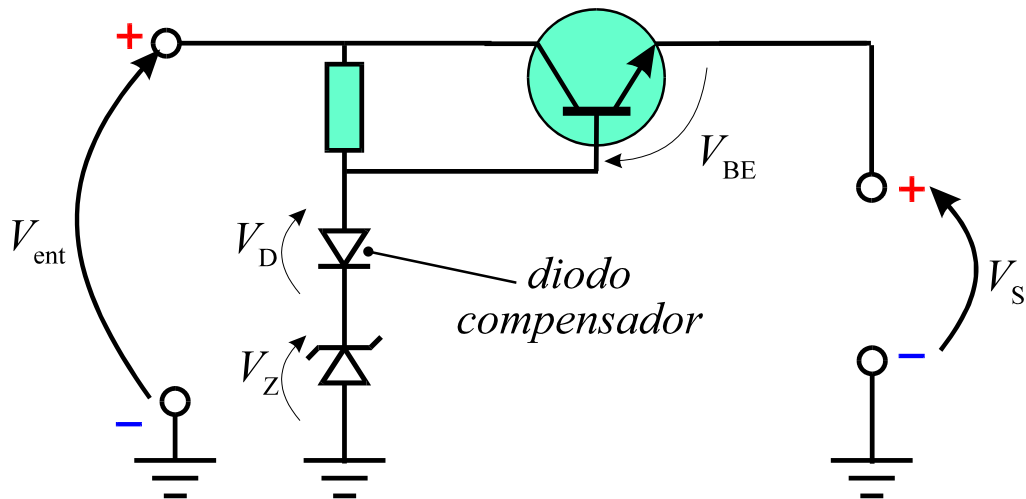


Fig.10 Regulador série com diodo compensador.

Com a adição do diodo, a tensão aplicada à base do transistor torna-se

$$V_B = V_Z + V_D \quad (6)$$

onde V_D é a queda de tensão no diodo diretamente polarizado. A tensão de saída nessa nova configuração torna-se

$$V_S = V_Z + V_D - V_{BE} \quad (7)$$

Sendo o diodo constituído do mesmo semiconductor utilizado na fabricação do transistor, tem-se que

$$V_D - V_{BE} = 0$$

e a Eq.(7) fornece

$$V_S = V_Z \quad (8)$$

Dissipação de potência no regulador série

Os reguladores de tensão sempre apresentam elementos que dissipam potência em forma de calor. No circuito regulador série a transistor, o elemento responsável pela maior porção da potência dissipada é o transistor.

Dado que a potência dissipada no transistor pode ser obtida da expressão aproximada

$$P_C = V_{CE} I_C \quad (9)$$

com base na **Eq.(3)** e na aproximação $I_C \approx I_S$, tem-se que

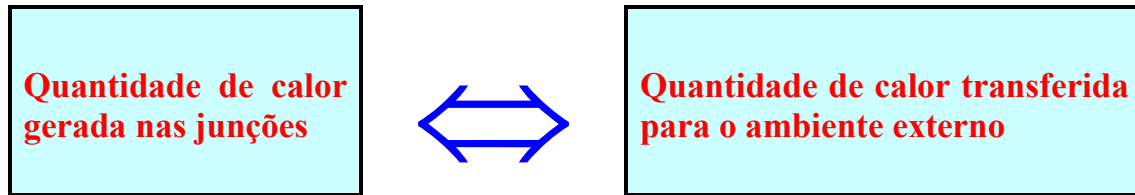
$$P_C = (V_{ent} - V_S) I_S \quad (10)$$

Os transistores utilizados nos circuitos reguladores são em geral transistores de potência, dimensionados de forma que a dissipação real não provoque o **disparo térmico** que produz a danificação do componente.

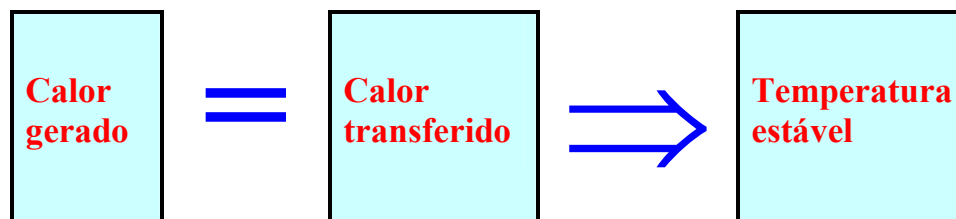
ENCAPSULAMENTO

Os componentes semicondutores de um circuito dissipam potência nas junções em forma de calor. Em muitos casos a quantidade de calor gerada nas junções chega a provocar uma elevação de temperatura considerável no encapsulamento externo do componente. Para evitar a destruição do dispositivo, é muito importante que as temperaturas nas junções não atinjam a temperatura de fusão do material semicondutor.

A temperatura das junções de um dispositivo semicondutor depende fundamentalmente da relação:



Quando a quantidade de calor gerada nas junções é **totalmente** transferida, através do encapsulamento, para o ambiente externo, a temperatura das junções mantém-se estável.



Se, no entanto, a quantidade de calor transferida para o ambiente externo for **menor** que aquela gerada nas junções, existirá uma elevação de temperatura no material semicondutor.



Devido aos efeitos provenientes da geração de calor, o encapsulamento do dispositivo tem grande importância, pois é através dele que o calor é escoado das junções para o ambiente externo.

O material utilizado na fabricação do encapsulamento sempre apresenta uma certa oposição ao fluxo de calor. Um parâmetro utilizado para avaliar esse grau de oposição é o que se denomina de **resistência térmica** do material.



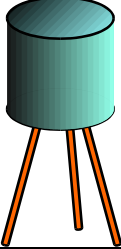
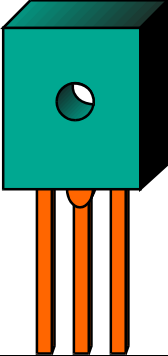
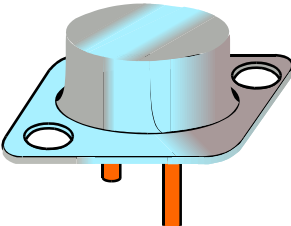
Resistência térmica é um parâmetro que mede o grau de oposição ao fluxo de calor através do material.

A resistência térmica é representada pelo parâmetro R_{th} e medida em unidades de °C/W (grau centígrado por Watt).

Quanto menor for a resistência térmica do encapsulamento entre a junção geradora de calor e o meio ambiente, mais facilmente o calor será dissipado. Por essa razão, os transistores de potência são fabricados com encapsulamento metálico, de baixa resistência térmica.

A **Tabela 1** lista alguns tipos comuns de encapsulamentos, juntamente com suas características físicas e térmicas. O parâmetro R_{thja} na terceira coluna da **Tabela 1** representa a resistência térmica entre a junção e o ambiente externo.

Tabela 1 Tipos comuns de encapsulamentos e suas características.

Encapsulamento	Características	R_{thja} (°C/W)	Transistor
TO-1	<ul style="list-style-type: none"> Corpo cilíndrico metálico 	290	AC188
TO-126	<ul style="list-style-type: none"> Corpo plástico Uma face metálica 	110	BD135
TO-3	<ul style="list-style-type: none"> Corpo metálico ligado eletricamente ao coletor 	6	2N3055

DISSIPADORES DE CALOR

Os dissipadores de calor são dispositivos metálicos acoplados aos dispositivos semicondutores com o objetivo de facilitar a transferência de calor do interior do componente para o ambiente externo. A **Fig.11** mostra o aspecto de um dissipador e a forma de acoplamento a um transistor de corpo cilíndrico.

O dissipador reduz a resistência térmica entre a junção e o meio-ambiente, possibilitando assim operar o dispositivo semicondutor a uma potência mais elevada que aquela limitada pelo encapsulamento do componente.

O transistor AC188, por exemplo, apresenta uma resistência térmica de $290\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$ entre a junção e o ambiente externo. Utilizando-se um dissipador acoplado ao corpo do transistor, conforme mostrado na **Fig.12**, a área de transferência de calor entre o componente e o ambiente externo aumenta. Esse aumento de área provoca uma redução substancial da resistência térmica entre a junção e o ambiente externo.

Usando essa técnica, a resistência térmica do transistor AC188 pode diminuir para um valor de até $70\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$. Essa redução permite que o transistor possa operar a um nível de potência até quatro vezes superior àquele permitido na ausência do dissipador, sem que isso provoque uma maior elevação de temperatura do componente.

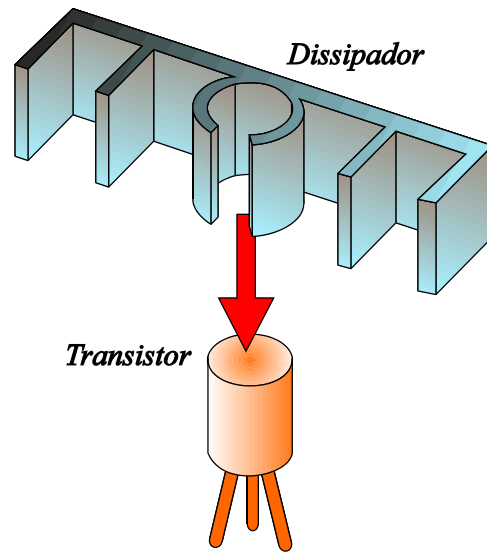


Fig.11 Dissipador para acoplamento a um transistor de corpo cilíndrico.

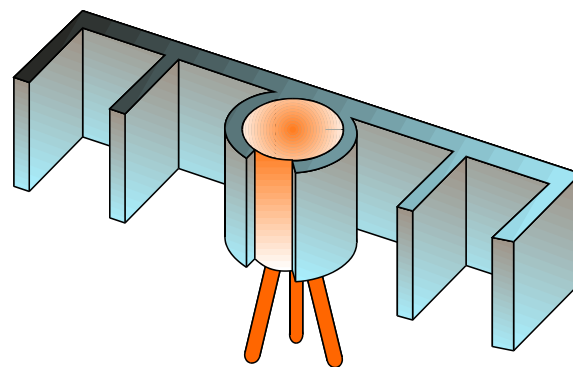


Fig.12 Transistor de corpo cilíndrico com dissipador de calor.

MONTAGEM DO TRANSISTOR NO DISSIPADOR

Existe no comércio uma grande variedade de formas e dimensões de dissipadores, com uma ampla gama de valores de resistência térmica. A **Fig.13** mostra um tipo comum de dissipador, para fixação do transistor TO-3.

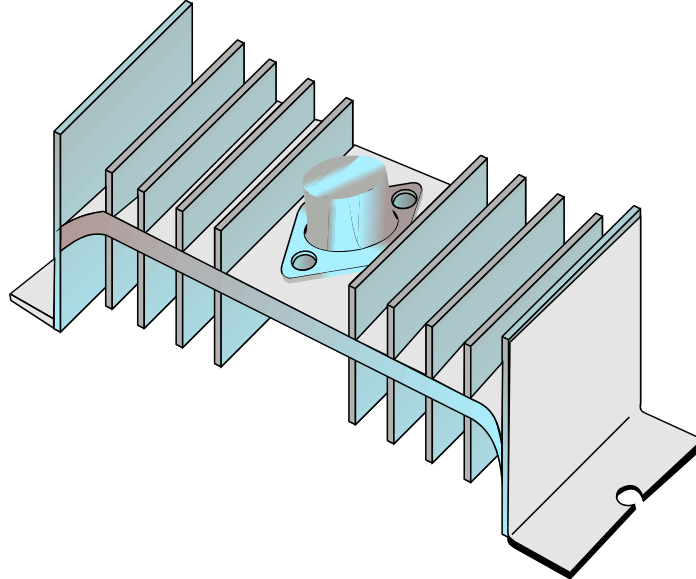


Fig.13 Dissipador para fixação do transistor TO-3.

No caso de transistores com coletor em contato elétrico com o encapsulamento, as duas situações seguintes devem ser consideradas:

Encapsulamento em contato elétrico com o dissipador

Essa situação pode ocorrer se o dissipador estiver isolado eletricamente do circuito e o transistor pode ser afixado diretamente ao dissipador, na forma mostrada na **Fig.14**.

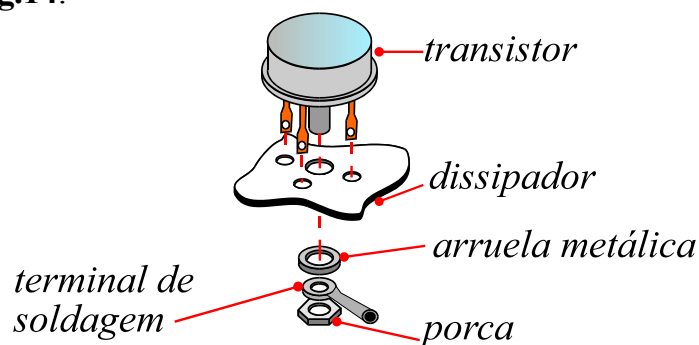


Fig.14 Forma de fixação de um transistor a um dissipador que esteja isolado eletricamente do circuito.

Encapsulamento isolado eletricamente do dissipador

Quando for necessário isolar eletricamente o transistor do dissipador, utiliza-se um isolante elétrico delgado de mica que, dependendo de quão fina seja a espessura utilizada, pode apresentar uma resistência térmica tipicamente baixa entre 2 e 4 °C/W. Devem-se também utilizar arruelas de passagem isolantes para evitar o contato elétrico dos parafusos de fixação ao dissipador. A **Fig.15** mostra em detalhes a forma de fixação do transistor TO-3 ao dissipador para obtenção de isolamento elétrico entre os dois componentes.

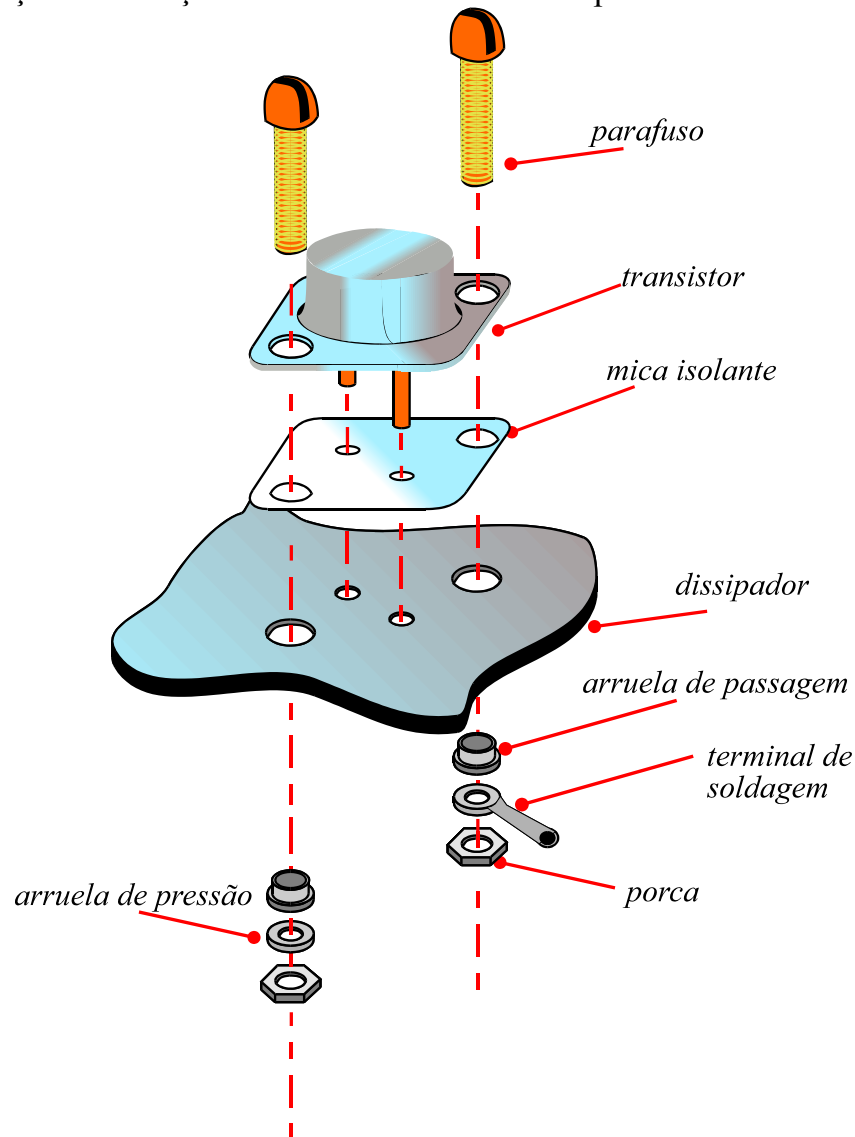


Fig.15 Forma de fixação de um transistor a um dissipador com uma lâmina intermediária de mica para evitar o contato elétrico entre os componentes.

OTIMIZAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Algumas providências podem ser tomadas para otimizar-se a transferência de calor entre a junção semicondutora e o ambiente externo, tais como:

- Estabelecer a maior área de contato possível entre o componente semicondutor e o dissipador.
- Afixar firmemente o componente ao dissipador, através de parafusos.
- Untar as regiões de contato entre componente e mica e entre mica e dissipador utilizando graxa de silicone, eliminando possíveis bolhas de ar que aumentam a resistência térmica.
- Usar dissipadores enegrecidos.
- Aumentar a área do dissipador.
- Posicionar o dissipador de forma que na montagem final as aletas fiquem orientadas na posição vertical.
- Utilizar refrigeração forçada, através de ventiladores, ou circulação de água ou óleo no interior do dissipador.
- Afastar os dissipadores e os dispositivos semicondutores de elementos que também sofram aquecimento, tais como transformadores e resistores de potência.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Qual a principal finalidade de um regulador em uma fonte de alimentação?
2. Que componente pode ser empregado para se fazer um regulador paralelo?
3. No regulador série transistorizado como se comporta a corrente no diodo Zener perante variações na corrente de carga?
4. Qual a função do diodo compensador em um regulador série transistorizado?
5. Qual a finalidade dos dissipadores de calor acoplados a componentes semicondutores?
6. Cite cinco providências que devem ser tomadas para otimizar a transferência de calor entre um componente semicondutor e o ambiente externo.

BIBLIOGRAFIA

CIPELLI, Antônio Marco Vicari & SANDRINI, Valdir João. Teoria do desenvolvimento de Projetos de Circuitos Eletrônicos . 7.ed. São Paulo, Érica, 1983. 580p.

FIGINI, Gianfranco. Eletrônica Industrial: Circuitos e aplicações. São Paulo, Hemus, 1982.