

CAPÍTULO 2

Fontes de Tensão e Corrente

Prof. Dr. Sebastião Gomes dos Santos Filho

2.1 INTRODUÇÃO

No Capítulo 1 sobre retificadores foram introduzidos os filtros capacitivo e indutivo-capacitivo.

Na maioria das aplicações práticas, a estabilidade da tensão de saída de um bloco retificador com filtro não é satisfatória devido a sua sensibilidade a variações da tensão de entrada, do valor da carga conectada a saída, e ondulações devidas ao processo de filtragem.

Torna-se, então necessário introduzir circuitos reguladores, cuja função é melhorar a estabilidade da tensão de saída (regulação) a fim de que esta permaneça constante independente de outras flutuações. A figura 1 mostra o diagrama de blocos de uma fonte de tensão regulada.



Figura 1: Diagrama de blocos de uma fonte de tensão regulada

Além dos reguladores de tensão, existem também os reguladores de corrente, cuja função é manter a corrente de saída constante, independente de variações no valor da carga conectada na saída ou da ondulação da tensão de entrada.

Neste Capítulo vamos estudar circuitos reguladores de tensão e corrente utilizando transistor bipolar.

2.2 CARACTERÍSTICAS DE UM CIRCUITO REGULADOR

Um circuito regulador de tensão (ou corrente) normalmente é alimentado por uma fonte não regulada que fornece uma tensão contínua (CC) com uma componente alternada sobreposta. Como resultado, na saída do circuito regulador temos uma tensão ou corrente contínua (CC) regulada com a componente alternada bastante atenuada, como mostra a figura 2. O parâmetro mais importante de um circuito regulador é a *regulação* ou *estabilização*, que mede a variação da saída regulada (tensão ou corrente) como resultado de mudanças em um ou vários parâmetros do circuito. A seguir definiremos diversos termos para as fontes de tensão sendo que eles devem ser reinterpretados para fontes de corrente.

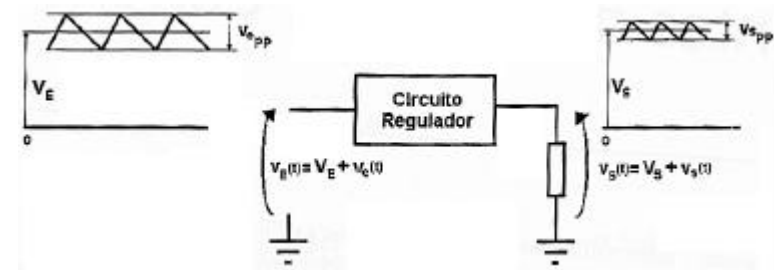


Figura 2: Variáveis a serem consideradas na análise de um circuito regulador

A regulação de uma fonte é denominada mais adequadamente de *regulação estatística total* e é a máxima variação na tensão de saída resultante dos efeitos conjugados da variação simultânea de todos os parâmetros do circuito. A tensão estabilizada de saída (V_S) é dependente de três variáveis independentes: corrente de saída (I_S), tensão de entrada (V_E) e temperatura de operação (T):

$$V_S = f(I_S; V_E; T) \quad (1)$$

A variação total da tensão de saída em função das três variações parciais é expressa por:

$$dV_S = \frac{\partial V_S}{\partial I_S} \cdot dI_S + \frac{\partial V_S}{\partial V_E} \cdot dV_E + \frac{\partial V_S}{\partial T} \cdot dT \quad (2)$$

onde as derivadas parciais representam respectivamente a resistência de saída do regulador (R_S), o coeficiente de regulação (A_S) e o coeficiente de temperatura (α_T). Considerando-se a expressão anterior de forma simplificada, podemos substituir diferenciais por diferenças e obteremos então:

$$\Delta V_S = R_S \cdot \Delta I_S + A_S \cdot \Delta V_E + \alpha_T \cdot V_S \cdot \Delta T \quad (3)$$

Das três parcelas apresentadas na equação acima, nos preocuparemos apenas com as duas primeiras parcelas, **regulação quanto a tensão de entrada** e **regulação quanto a corrente de saída**, sendo que aquela que reflete a influência da temperatura não será analisada.

2.2.1 Regulação de Entrada

A regulação quanto a tensão de entrada mede as variações na tensão de saída quando variamos o nível CC na entrada do regulador ou a tensão CA de alimentação na entrada da fonte, isto é, na entrada do retificador (figura 1). Em especificações tradicionais, para facilitar a caracterização da fonte, a regulação de entrada é dividida em duas componentes, a *regulação de linha* e a *rejeição de ripple*. Note porém que estas duas parcelas têm um significado mais restritivo que a regulação de entrada e portanto não refletem todas as variações observadas pela regulação de entrada.

2.2.1.1 Regulação de Linha (R_{Li})

Para circuitos reguladores, esta característica refere-se à estabilidade da tensão de saída em relação a variações CC numa suposta tensão de entrada CC livre de ondulações (ripple), mantendo-se a resistência de carga constante (plena carga).

$$R_{Li} = \frac{\Delta V_S}{\Delta V_E} \Big|_{R_L = \text{cte}} \quad (4)$$

2.2.1.2 Rejeição de Ripple (RR)

Esta característica mede, para uma determinada carga de saída, a atenuação ou diminuição da ondulação (ripple) de entrada ao passar pelo circuito regulador.

$$RR = \frac{\text{Ripple de Saída}}{\text{Ripple de Entrada}} \cong \frac{\frac{V_{PPS}}{V_S}}{\frac{V_{PPE}}{V_E}} \quad \text{ou} \quad RR(\text{dB}) = 20 \log \left[\frac{\text{Ripple de Saída}}{\text{Ripple de Entrada}} \right] \quad (5)$$

Para ondulação triangular:

$$\text{Ripple de Saída} = \frac{\text{Valor Eficaz da Componente Alternada de Saída}}{\text{Tensão Contínua de Saída}} = \frac{\frac{V_{PPS}}{2\sqrt{3}}}{V_S} \quad (6)$$

$$\text{Ripple de Entrada} = \frac{\text{Valor Eficaz da Componente Alternada de Entrada}}{\text{Tensão Contínua de Entrada}} = \frac{\frac{V_{PPE}}{2\sqrt{3}}}{V_E} \quad (7)$$

V_{PPS} = tensão pico a pico da componente alternada de saída

V_{PPE} = tensão pico a pico da componente alternada de entrada

e portanto neste caso:

$$RR(\text{dB}) = 20 \log \left[\frac{V_{PPS} \cdot V_E}{V_{PPE} \cdot V_S} \right] \quad (8)$$

Deve-se tomar muito cuidado ao comparar-se a regulação de carga e rejeição de ripple em especificações de fontes pois não existe um conjunto de procedimentos consensual para sua determinação.

2.2.2 Regulação de Carga (RC)

Esta característica mede a variação da tensão de saída quando a resistência de carga varia de um valor mínimo (situação de plena carga) a um valor máximo (para fontes de tensão normalmente carga infinita, ou em aberto), considerando a tensão de entrada e a temperatura constantes.

$$RC = \frac{V_S \Big|_{R_L = R_{L\text{máx}}} - V_S \Big|_{R_L = R_{L\text{mín}}}}{V_S \Big|_{R_L = R_{L\text{máx}}}} \cdot 100\% \quad (9)$$

É importante observar que dois reguladores podem ter exatamente o mesmo valor para regulação de carga e no entanto comportarem-se de forma totalmente diferente em condições dinâmicas, isto é, quando cargas transientes são aplicadas.

O procedimento habitual para medir a regulação de carga é ajustar o valor da carga correspondente à mínima corrente (em geral zero), medir o valor da tensão de saída, ajustar o valor da carga para a máxima corrente e medir o valor da tensão de saída. As medidas são realizadas com intervalo suficiente para que o regulador se estabilize para cada um dos valores de corrente de saída.

Infelizmente, na prática muitas das cargas são menos pacientes. Se um regulador não consegue responder rapidamente a variações na corrente de saída (sua resposta em frequência é limitada), variações instantâneas na tensão de saída vão ocorrer. Essa variação instantânea causada por uma carga pode afetar o desempenho dos circuitos alimentados e, se tivermos vários circuitos alimentados ao mesmo tempo (que podemos encarar como várias cargas) a variação instantânea causada por uma carga pode afetar as outras através da fonte de alimentação. Isto é muito comum em circuitos digitais.

2.2.3 Fator de Rendimento

O Fator de Rendimento (η) determina a parcela da potência fornecida na entrada do circuito que efetivamente é entregue à carga. No caso de circuitos reguladores, pode-se estabelecer que:

$$\eta = \frac{V_S \cdot I_S}{V_E \cdot I_E} \times 100\%$$

2.3 REGULADORES A TRANSISTOR

2.3.1 Relações Básicas do Transistor Bipolar

O transistor de junção consiste em duas junções que estão proximamente interligadas pelo lado N ou pelo lado P, formando um transistor PNP ou NPN, respectivamente. Na figura 3 temos uma representação dos dois tipos de transistores bipolares bem como seus símbolos e os respectivos sentidos da tensão e da corrente.

A região central do transistor é chamada de região de base. Se uma tensão é aplicada entre o coletor e o emissor do transistor, conforme indicado na figura 3, a junção base-emissor ficará diretamente polarizada e a junção base-coletor ficará reversamente polarizada. Como resultado, tomando o transistor NPN como exemplo, elétrons da região N cruzam a base e lacunas da base passam para região N. Os elétrons ao entrar na base difundem através da mesma (praticamente sem se recombinarem) em direção a junção coletor-base reversamente polarizada. Logo que estes elétrons entram na camada de depleção associada com a junção coletor-base, estes são acelerados em direção ao coletor. Se injetarmos uma corrente na base, uma maior quantidade de elétrons serão atraídos e injetados na base em direção ao coletor resultando numa maior corrente de coletor.



Figura 3: Transistor bipolar : (a) NPN (b) PNP

Como resultado do efeito transistor, que foi descrito anteriormente de forma simplificada, podemos estabelecer relações matemáticas que descrevem o funcionamento do transistor na **região de operação linear (também conhecida como normal ou ativa)** ou seja:

$$I_E = I_C + I_B \quad (10)$$

$$\frac{I_C}{I_E} \cong \text{constante} = \alpha \quad (11)$$

$$\frac{I_C}{I_B} \cong \text{constante} = \beta = \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad (12)$$

$$\frac{I_E}{I_B} \cong \text{constante} = \beta + 1 = \frac{1}{1-\alpha} \quad (13)$$

$$V_{CE} = V_{CB} + V_{BE} \text{ p/ Transistor NPN} \quad (14)$$

$$V_{EC} = V_{BC} + V_{EB} \text{ p/ Transistor PNP} \quad (15)$$

Os valores da constante α variam de transistor para transistor, mas de forma geral situa-se na faixa de 0,95 à 1,00. O valor da constante β por sua vez varia de 20 a 1000 na maioria dos transistores. Durante a operação normal do transistor, a junção base-emissor apresenta uma tensão constante cujo valor situa-se na faixa de 0,5V a 0,7V para transistores de silício.

O transistor bipolar apresenta mais duas regiões de operação, nas quais as relações lineares anteriormente apresentadas deixam de ser válidas. Dizemos que o transistor está **saturado**, quando as junções base-emissor e base-coletor estão diretamente polarizadas de modo que a tensão coletor-emissor fica próxima de zero. Por outro lado, dizemos que um transistor está **cortado** quando as junções base-emissor e coletor-base estão ambas reversamente polarizadas e como resultado, a corrente entre o coletor e o emissor é próxima de zero.

Na sua região de operação **normal**, o transistor não pode ultrapassar determinados limites de tensão, corrente e potência que são comumente especificados pelo fabricante. Estes limites são os seguintes:

$I_{Cm\acute{a}x}$	Corrente máxima de coletor
$V_{CEm\acute{a}x}$	Tensão máxima entre coletor e emissor
$P_{Cm\acute{a}x}$	Potência máxima do coletor

Onde a potência máxima de coletor corresponde ao seguinte produto:

$$P_C = V_{CE} \cdot I_C \leq P_{Cm\acute{a}x} \quad (16)$$

A figura 4 mostra a curva característica $I_C \times V_{CE}$ parametrizada em I_B . Neste gráfico, a região ativa de operação fica delimitada pelas regiões de corte e saturação e pelos limites de tensão, corrente e potência.

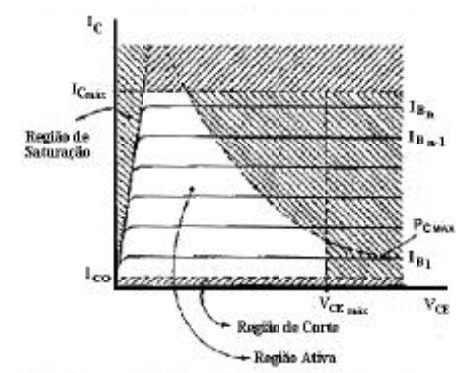


Figura 4: Região ativa de operação do transistor

2.3.2 Diodo Zener

O diodo zener é um dispositivo especialmente projetado para operar reversamente polarizado em uma região de ruptura controlada por efeito zener. Para que o efeito zener ocorra, devemos ter uma junção P-N abrupta com concentrações de dopantes elevadas em cada lado da junção. Como resultado, a barreira de potencial torna-se bastante abrupta de modo que a aplicação de uma pequena tensão reversa (alguns volts) é suficiente para provocar o tunelamento dos elétrons diretamente da faixa de valência para a faixa de condução. Assim, numa tensão de zener característica, observa-se um aumento substancial da corrente reversa. A figura 5 mostra a curva característica $I_D \times V_D$ de um diodo zener típico.

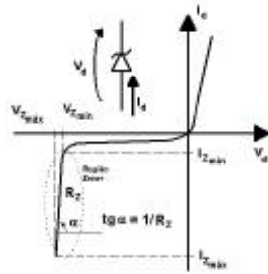


Figura 5: Curva característica $I_D \times V_D$ do diodo zener

O diodo zener ideal possui uma resistência interna R_Z nula e tensão de operação característica $V_Z = V_{Zmin} = V_{Zmax}$ enquanto que o diodo real apresenta uma resistência interna R_Z da ordem de décimos de ohms até no máximo alguns ohms. A tensão de ruptura, também chamada de tensão zener (V_Z), é característica do diodo. Esta tensão apresenta valores desde alguns volts, até dezenas de volts para os diodos zener comerciais.

Normalmente, o fabricante especifica no manual de operação a corrente máxima que pode circular através do diodo (I_{Zmax}), a corrente mínima que deve circular através do diodo (I_{Zmin}) para que ele ainda esteja na região zener, a resistência interna (R_Z), a tensão zener para dada corrente de operação, potência máxima que o diodo pode dissipar (P_Z) e a sensibilidade de tensão zener com a temperatura (S). O valor da corrente máxima no zener pode ser obtido aproximadamente a partir de potência máxima do diodo zener (normalmente é um valor arredondado) como segue:

$$I_{Zmax} = \frac{P_{Zmax}}{V_Z} \quad (17)$$

O valor da corrente mínima do diodo, de modo que a tensão zener ainda seja constante em primeira aproximação, é geralmente tomado como sendo igual a 5% da corrente máxima permissível (I_{Zmax}).

$$I_{Zmin} = 5\% \cdot I_{Zmax}$$

2.3.3 Fonte Regulada com Diodo Zener

A característica do diodo zener de manter uma tensão constante entre seus terminais pode ser utilizada na obtenção de uma fonte de tensão regulada. A figura 6 abaixo mostra uma fonte regulada utilizando diodo zener e resistor.

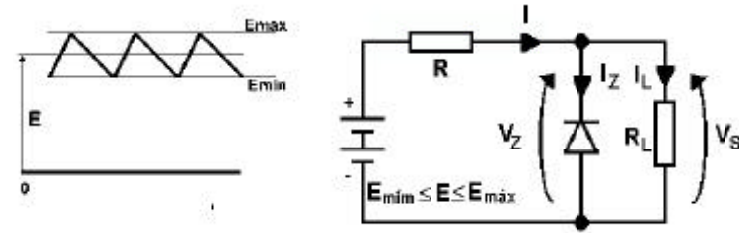


Figura 6: Fonte regulada com diodo zener e resistor

A bateria “E” na figura 6 representa uma fonte não regulada cuja tensão varia na faixa entre E_{min} e E_{max} . Podemos então calcular a resistência R que vai limitar a corrente máxima através do diodo e também a resistência de carga mínima (R_{Lmin}) que corresponde a corrente máxima que a saída da fonte pode fornecer.

A resistência R deve ser dimensionada de forma que mesmo na situação em que a resistência de carga é infinita, não seja ultrapassada a corrente máxima através do diodo, portanto:

$$\frac{E_{max} - V_Z}{R} \leq I_{Zmax}, \text{ ou } R \geq \frac{E_{max} - V_Z}{I_{Zmax}} \quad (18)$$

Para calcular o valor da corrente máxima na carga (I_{Lmax}) ou o valor mínimo da resistência de carga (R_{Lmin}), temos que considerar a pior condição em relação a fonte não regulada, que ocorre quando o valor de “E” é mínimo. Nestas condições temos:

$$I_1 = \frac{E_{min} - V_Z}{R}$$

Quando a carga é mínima (I_{Lmax}) temos que a maior parte de I_1 destina-se à carga. Nesta condição deve-se garantir que $I_1 \geq I_{Zmin}$. Logo:

$$I_{Lmax} = \frac{E_{min} - V_Z}{R} - I_{Zmin} \quad (19)$$

O valor da resistência mínima de carga será então:

$$R_{Lmin} = \frac{V_Z}{I_{Lmax}} \quad (20)$$

O diodo zener na região de operação reversa pode ser modelado como uma bateria de valor V_Z em série com uma resistência de valor R_Z (o valor V_Z pode ser obtido a partir dos valores nominais V_{Znom} , I_{Znom} e R_Z fornecidos no manual do fabricante do diodo zener, como ilustra a figura 7). A figura 7 mostra o circuito equivalente a ser analisado. As mudanças na tensão de entrada V_E e da sensibilidade da tensão zener V_Z com a temperatura supondo que R_L e R_Z apresentem valores fixos. Nesta situação demonstra-se que a seguinte expressão:

$$\Delta V_S = \frac{\Delta V_E}{1 + R \cdot \frac{R_Z + R_L}{R_Z \cdot R_L}} + T_c \cdot \Delta T \cdot V_{Znom} \quad (21)$$

onde T_c é chamado coeficiente de temperatura que é tipicamente da ordem de 0,05%/C.

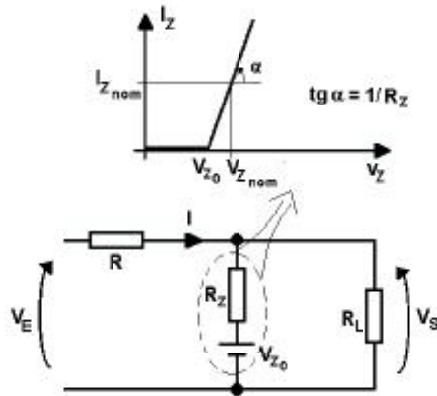


Figura 7: Circuito Equivalente do Regulador de Tensão com diodo zener

2.3.4 Fonte Regulada com Transistor e Diodo Zener

Na figura 8 é mostrado um regulador série de tensão em que o transistor, além de permitir multiplicar a corrente de carga, funciona como um resistor variável em série com o resistor de carga a fim de que a tensão de saída se mantenha constante, por imposição de projeto. Neste circuito foi mantido o diodo zener como regulador, mas foi introduzido o transistor entre o resistor de carga e diodo zener. Comparado ao caso exposto no item anterior, a corrente desviada para a base do transistor é $\beta+1$ vezes menor que a corrente na carga (uma vez que o transistor opera na região normal).

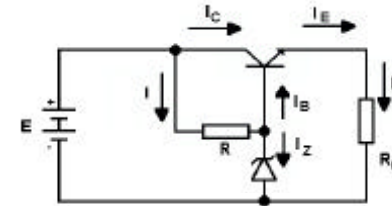


Figura 8: Regulador série de tensão com transistor e diodo zener

Analisando a malha de saída deste regulador, a tensão de saída é dada por:

$$V_S = V_Z - V_{BE} = V_Z - 0,6 \quad (22)$$

Como na análise feita no item anterior, a corrente máxima na base do transistor é obtida através de expressão 19. Portanto a corrente máxima na carga será $\beta+1$ vezes maior, ou seja:

$$I_L' = I_E = (\beta + 1) \cdot I_B \quad (23)$$

O valor de corrente obtido pela expressão 23 é o valor máximo considerando a fonte a partir do diodo zener. No entanto conforme já vimos, o transistor apresenta uma corrente máxima de coletor que não pode ser ultrapassada. Também não devem ser ultrapassados os limites de potência máxima de coletor e tensão máxima entre coletor e emissor. Devemos, portanto, impor as seguintes condições:

$$I_L' \leq I_{Cm\ddot{a}x} \quad (24) \quad V_{CE} \leq V_{CEm\ddot{a}x} \quad (25) \quad I_L''' \leq \frac{P_{Cm\ddot{a}x}}{V_{CE}} \quad (26)$$

onde a tensão entre coletor e emissor é dada por: $V_{CE} = E_{m\ddot{a}x} - (V_Z - V_{BE})$ (27)

e a tensão $E_{m\ddot{a}x}$, corresponde ao valor máximo da bateria "E".

A corrente máxima na carga será portanto o mínimo valor obtido das expressões 23, 24 e 25. Ou seja,

$$I_{Lm\ddot{a}x} = \min(I_L', I_L'', I_L''') \quad (28)$$

O valor mínimo da resistência de carga será portanto:

$$R_{Lm\ddot{a}x} = \frac{V_S}{I_{Lm\ddot{a}x}} \quad (32)$$

2.3.5 Fonte de Corrente a Transistor

A figura 9 mostra o circuito de um regulador de corrente utilizando transistor e diodo zener. Neste regulador, a queda de tensão sobre a resistência R_E é constante uma vez que a junção base-emissor está diretamente polarizada com queda de tensão igual à $0,6V$ pois o transistor bipolar está operando na região normal, por imposição de projeto. Portanto, a corrente de emissor e dada por:

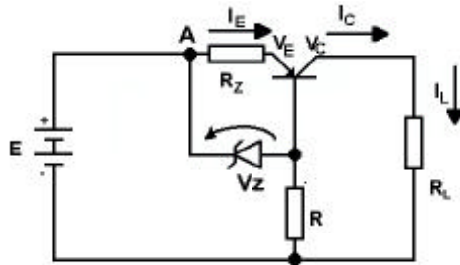


Figura 9: Fonte de corrente com transistor e diodo zener

$$I_E = \frac{V_Z - V_{BE}}{R_E} \quad (30)$$

Considerando que a corrente de coletor é praticamente igual a corrente de emissor a corrente no resistor de carga será constante e igual a I_E (expressão 30).

Neste tipo de regulador, ao contrário do regulador de tensão, temos a limitação de resistência máxima de carga. A queda de tensão sobre o resistor R_B é dada por:

$$V_{R_B} = E - V_Z \quad (31)$$

O circuito deixa de ser uma fonte de corrente no instante em que a queda de tensão sobre o resistor de carga supera a queda de tensão sobre o resistor R_B . Nesta situação, a junção coletor-base passa a ficar diretamente polarizada e o transistor entra na região de saturação. O valor máximo de resistência de carga pode ser obtida na condição em que a queda de tensão coletor-base se anula ($V_{R_L} = V_{R_B}$).

$$R_{L_{máx}} = \frac{E - V_Z}{I_L} \quad (32)$$

2.4 BIBLIOGRAFIA

1. **Linear/Switchmode Voltage Regulator Handbook: Theory and Practice**, Motorola, 1982.
2. A.M.V. Cipelli e W.J. Sandrini, **Teoria e Desenvolvimento de Projetos de Circuitos Eletrônicos**, Ed. Érica, 13^a Ed., 1986.
3. O. Ferenczi, **Power Supplies: Part A - Linear Power Supplies, DC-DC Converters**. Elsevier, 1987.