

Sumário

Introdução	5
Comparação entre circuitos retificadores	6
Parâmetros de desempenho	6
Tensão de saída	6
Percentual de ondulação	7
Fator de regulação	9
Pesquisa de defeitos em fontes com filtro	10
Limites de operação do diodo	12
Tensão inversa sobre o diodo	12
Corrente média através do diodo	13
Corrente máxima através do diodo	14
Fórmulas para circuitos retificadores	15
Apêndice	20
Questionário	20
Bibliografia	20



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

Um requisito básico para que um aparelho eletrônico tenha um desempenho ótimo é a correta escolha e dimensionamento da fonte de alimentação. A fonte precisa ter condições de suprir a tensão e corrente necessárias ao bom funcionamento do equipamento, mesmo sob condições adversas de operação.

O propósito deste fascículo é analisar os parâmetros de importância na escolha do tipo de fonte de alimentação. Serão discutidos alguns aspectos referentes ao dimensionamento dos componentes, com o objetivo de capacitar o leitor a optar corretamente pelo modelo de circuito adequado a cada situação.



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

- * Circuitos retificadores.
- * Filtros em fontes de alimentação.

Comparação entre circuitos retificadores

PARÂMETROS DE DESEMPENHO

A retificação de *ca* pode ser feita em meia onda ou em onda completa, com ou sem filtro, com cada uma das configurações tendo características próprias. Os desempenhos obtidos a partir das diferentes formas de retificação, podem ser comparados analisando-se o comportamento da **tensão de saída com carga**, o **percentual de ondulação** e o **fator de regulação**, definidos nas seções seguintes.

TENSÃO DE SAÍDA

Na ausência de um resistor de carga, os circuitos retificadores de meia onda e de onda completa com filtro capacitivo, exibem uma tensão de saída que não varia no tempo, conforme ilustrado na **Fig.1**.

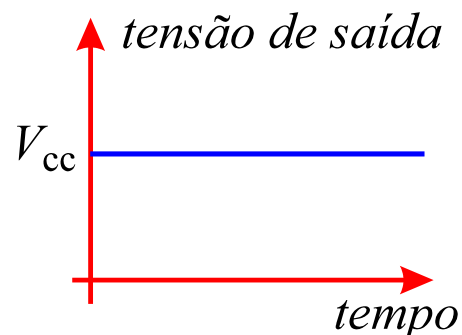


Fig.1 Tensões de saída dos retificadores de onda completa e meia onda, na ausência de carga.

Entretanto, quando carga é conectada aos terminais de saída, os circuitos fornecem tensões de saída distintas, conforme mostrado na **Fig.2**. Como pode ser aí observado, em meia onda a ondulação é praticamente duas vezes maior do que na retificação em onda completa. Isso ocorre pelo fato de em meia onda o tempo de descarga do capacitor ser quase o dobro daquele obtido na retificação em onda completa.

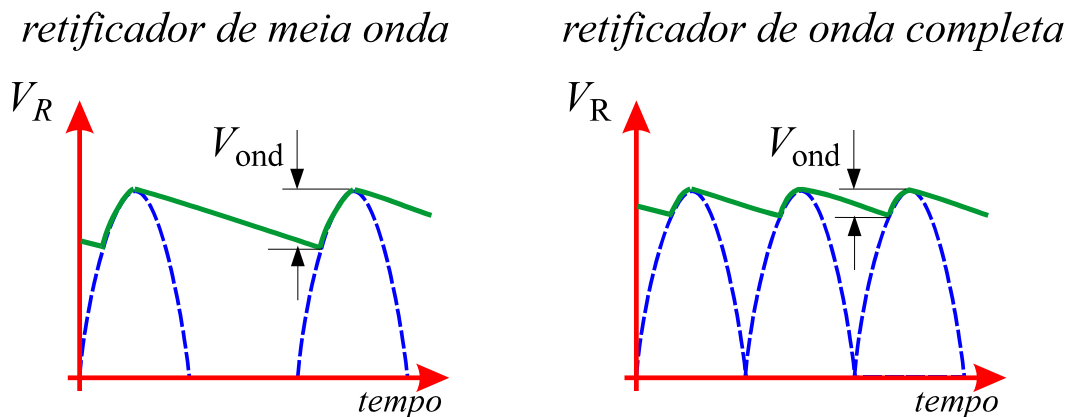


Fig.2 Gráficos das tensões no capacitor de saída dos retificadores de onda completa e de meia onda.

Como a tensão *cc* na saída de ambos os circuitos é relacionada a tensão de ondulação pela expressão

$$V_{cc} = V_{m\acute{a}x} - \frac{V_{ond}}{2} \quad (1)$$

conclui-se que a menor ondulação na retificação de onda completa implica em uma tensão *cc* superior àquela obtida com a retificação em meia onda.

PERCENTUAL DE ONDULAÇÃO

A ondulação é uma característica presente na tensão de saída de todas as fontes de alimentação. Isso ocorre devido à não-existência de um filtro capacitivo ideal que possa eliminar a componente alternada presente na saída.

Como a qualidade de uma fonte de alimentação pode ser avaliada pelo grau de ondulação na tensão de saída, esse atributo pode ser quantificado definindo-se um **percentual de ondulação**. Este parâmetro é definido como o valor eficaz da componente alternada relativa à tensão *cc*, com ambos os valores

medidos na saída da fonte. O percentual de ondulação assim definido é expresso matematicamente na forma

$$\% \text{ ond} = \frac{V_{\text{ondef}}}{V_{\text{cc}}} \times 100 \quad (2)$$

onde:

- $\% \text{ ond} \Rightarrow$ representa o percentual de ondulação;
- $V_{\text{ondef}} \Rightarrow$ representa o valor eficaz da componente alternada;
- $V_{\text{cc}} \Rightarrow$ representa a tensão cc de saída com carga máxima.

Os percentuais de ondulação para os dois tipos de fontes retificadoras, sem filtro capacitivo, assumem valores fixos que independem da carga. Estes percentuais são os seguintes:

- Retificador de meia onda sem filtro $\Rightarrow \% \text{ ond} = 121\%$
- Retificador de onda completa sem filtro $\Rightarrow \% \text{ ond} = 48\%$

Esses números indicam que fontes retificadoras de meia onda e onda completa sem filtro de saída têm um percentual de ondulação muito elevado. Isso limita o emprego dessas configurações a circuitos que não necessitam de tensões contínuas muito puras.

O uso do filtro capacitivo na saída das fontes retificadoras reduz o percentual de ondulação sensivelmente devido ao efeito de armazenamento de carga elétrica do capacitor. Nessa situação, o percentual de ondulação torna-se dependente das especificações do filtro, da carga e do tipo de circuito de retificação.

Nas fontes retificadoras com filtro de saída, a tensão de ondulação V_{ond} definida na **Fig.2** se relaciona com o valor efetivo correspondente pela expressão aproximada

$$V_{\text{ondef}} = \frac{V_{\text{ond}}}{\sqrt{12}} \quad (3)$$

Inserindo a **Eq.(3)** na **Eq.(2)**, permite que o percentual de ondulação seja expresso na forma

$$\% \text{ ond} = \frac{V_{\text{ond}}}{V_{\text{cc}} \times \sqrt{12}} \times 100 \quad (4)$$

As fontes de alimentação de boa qualidade têm um percentual de ondulação em torno de 5%. O exemplo a seguir ilustra o emprego da **Eq.(4)**.

Exemplo 1: Uma fonte retificadora fornece, com carga máxima, uma tensão *cc* de 11 V. Sabendo-se que a tensão de ondulação é 1,5 V, determine o percentual de ondulação da fonte.

Utilizando os valores, $V_{cc} = 11 \text{ V}$ e $V_{\text{ond}} = 1,5 \text{ V}$ na **Eq.(4)**, obtém-se,

$$\% \text{ ond} = \frac{1,5}{11 \times \sqrt{12}} \times 100 = \frac{1,5}{38,11} \times 100 = 0,039 \times 100$$

$$\Rightarrow \% \text{ ond} = 3,9\%$$

O valor obtido indica que essa fonte poderia ser considerada de boa qualidade.

FATOR DE REGULAÇÃO

O fator de regulação é um parâmetro que expressa a capacidade de uma fonte de manter a tensão *cc* de saída constante na presença de variações da corrente de carga. O fator de regulação é definido matematicamente pela expressão

$$R\% = \frac{V_{cc} (s/c) - V_{cc}}{V_{cc}} \times 100 \quad (5)$$

onde :

- $R\% \Rightarrow$ representa o valor percentual do fator de regulação;
- $V_{cc}(s/c) \Rightarrow$ representa a tensão *cc* de saída medida na ausência de carga;
- $V_{cc} \Rightarrow$ representa a tensão *cc* de saída medida com carga máxima.

O fator de regulação também é um parâmetro que define a qualidade de uma fonte. Fontes com fator de regulação de até 10% podem ser consideradas de boa qualidade.

O exemplo a seguir ilustra a utilização da **Eq.(5)** na determinação do fator de regulação de uma fonte.

Exemplo 2: Um circuito retificador fornece uma tensão contínua de 6 V quando sem carga. Esse valor se reduz a 5,6 V quando a fonte opera com carga nominal. Qual é o fator de regulação dessa fonte ?

Utilizando os valores, $V_{cc}(s/c) = 6 \text{ V}$ e $V_{cc} = 5,6 \text{ V}$ na **Eq.(5)**, obtém-se

$$R\% = \frac{6 - 5,6}{5,6} \times 100 = \frac{0,4}{5,6} \times 100 = 0,071 \times 100$$

$$\Rightarrow R\% = 7,1\%$$

PESQUISA DE DEFEITOS EM FONTES COM FILTRO

Na retificação de meia onda com filtro, pode-se facilmente determinar se o circuito está funcionando corretamente, **desligando-se a carga**, conforme ilustrado na **Fig.3** e medindo-se :

- A tensão *ca* imediatamente antes do diodo;
- A tensão *cc* de saída.

A fonte estará operando corretamente se os valores medidos V_{cc} e V_{ca} obedecerem à relação

$$V_{cc} = \sqrt{2} V_{ca}$$

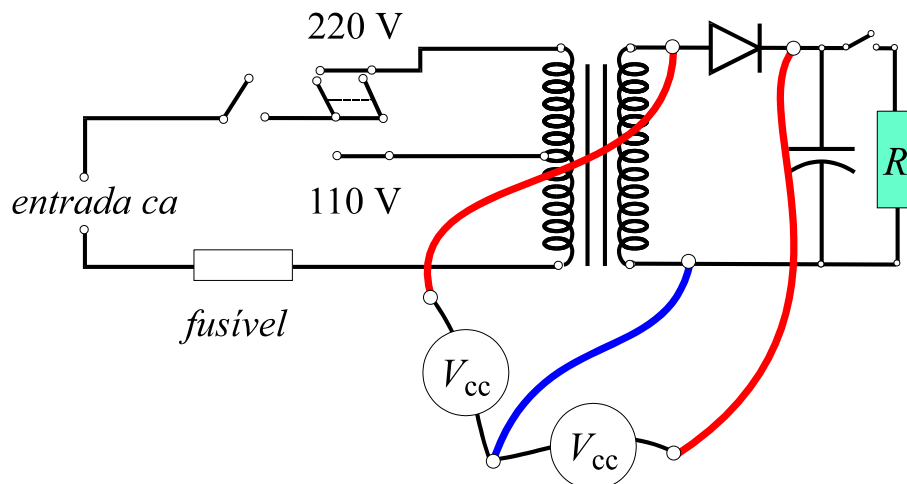


Fig.3 Circuito retificador de meia onda com filtro de saída e parâmetros de medição.

Caso seja constatado algum defeito, testa-se em primeiro lugar o filtro capacitivo, desligando-se um dos seus terminais e medindo-se a capacitância com um ohmímetro. Caso o capacitor esteja em boas condições, testa-se o restante do circuito. Esse último teste deve ser realizado mantendo-se o capacitor desligado do circuito de forma que este opere como um retificador de meia onda sem filtro.

Para o circuito retificador de onda completa, a medição apenas das tensões V_{cc} e V_{ca} não pode ser utilizada para determinar se o circuito está operando adequadamente. Isso ocorre pois diferenças de valores da tensão de saída são difíceis de detectar mesmo que haja a possibilidade de danificação de um dos diodos do circuito.

Devido a essa dificuldade, o teste do retificador de onda completa com filtro de saída deve obedecer ao procedimento mais detalhado descrito no fluxograma da **Fig.4**.

Um defeito no filtro capacitivo, seja pela existência de um curto ou de uma corrente de fuga através de seus terminais, pode causar defeitos nos diodos. Por isso, antes da religação do circuito, deve-se executar a etapa de teste dos diodos, conforme indicado na **Fig.4**.

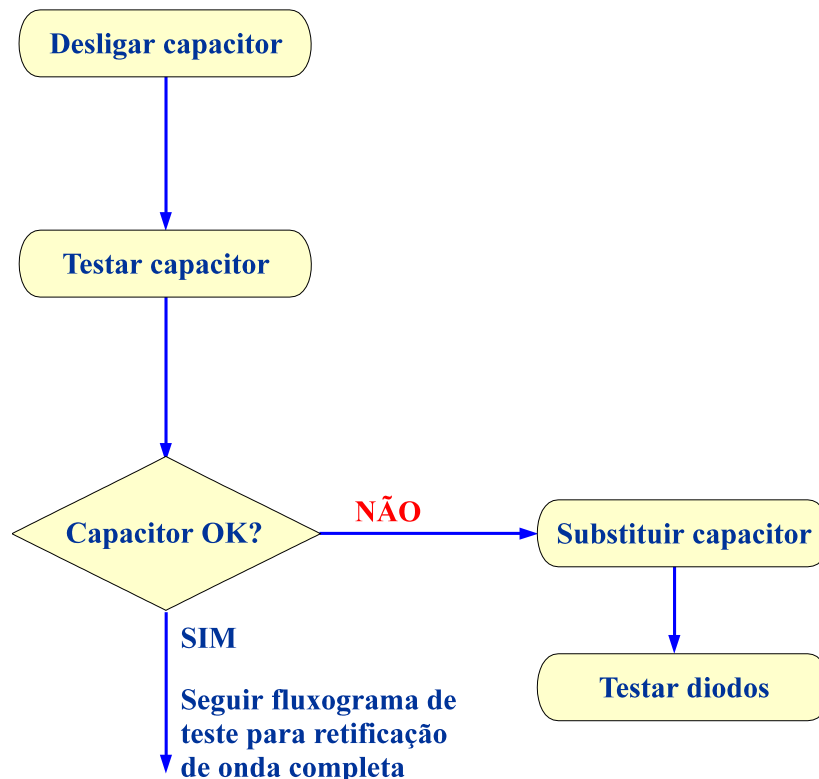


Fig.4 Fluxograma ilustrativo do procedimento de teste de um retificador de onda completa com filtro capacitivo.

LIMITES DE OPERAÇÃO DO DIODO

Os limites de operação de diodos em um circuito retificador são estabelecidos pela corrente de condução e pela tensão inversa através de seus terminais. Esses parâmetros são analisados nas seções seguintes.

TENSÃO INVERSA SOBRE O DIODO

O diodo de um circuito retificador está sujeito a um regime intermitente de ciclos de condução e bloqueio. Durante semiciclos de condução, a tensão sobre o diodo assume um valor típico que depende do material semiconductor. Na **Fig.5** estão indicados os valores típicos obtidos para o caso dos diodos de silício e de germânio.

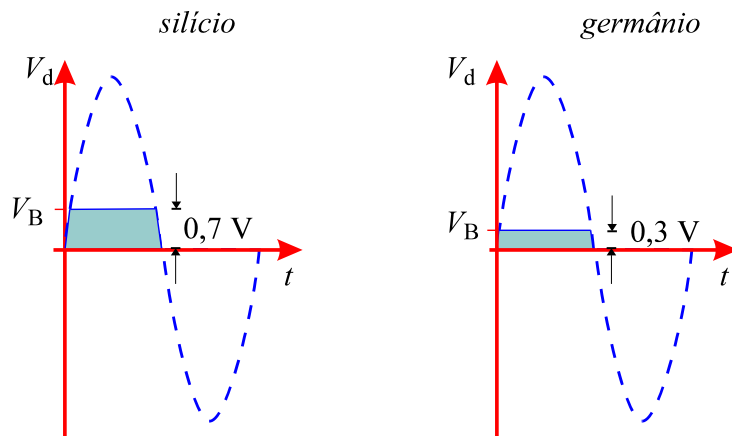


Fig.5 Tensão aplicada nos diodos de silício e de germânio durante o regime de condução.

Durante os semiciclos em que o diodo opera no regime de bloqueio, a forma senoidal da tensão *ca* é reproduzida através dos terminais do diodo, conforme mostrado na **Fig.6**. Como pode ser aí observado, é apenas durante esses semiciclos que a tensão através do diodo pode atingir o valor máximo $V_{m\acute{a}x}$ da tensão *ca*.

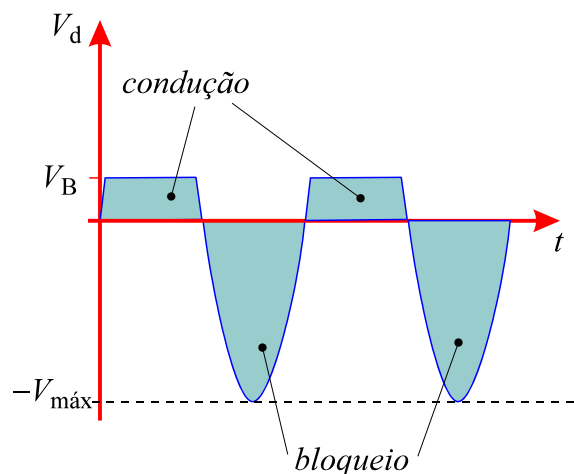


Fig.6 Tensão aplicada aos terminais do diodo durante os dois regimes de operação.

O folheto técnico fornecido pelo fabricante, estabelece o valor máximo de tensão inversa que o componente pode suportar a partir da especificação do parâmetro **VRWM**. Esta sigla é a abreviação na língua inglesa do termo, **tensão inversa de trabalho máxima**. Valores do parâmetro VRWM de alguns diodos disponíveis comercialmente estão mostrados na **Tabela 1**.

Tabela 1 Valores típicos do parâmetro VRWM para alguns diodos comerciais.

DIODO	VRWM
1N4004	400V
SKE 1/12	1200V
BY 127	1250V

CORRENTE MÉDIA ATRAVÉS DO DIODO

Cada diodo compondo um circuito retificador conduz corrente em ciclos intermitentes, como ilustrado na **Fig.7**. Esses pulsos de corrente se traduzem em um valor médio I_{cc} para a corrente que flui através do diodo e, conseqüentemente, através da carga.

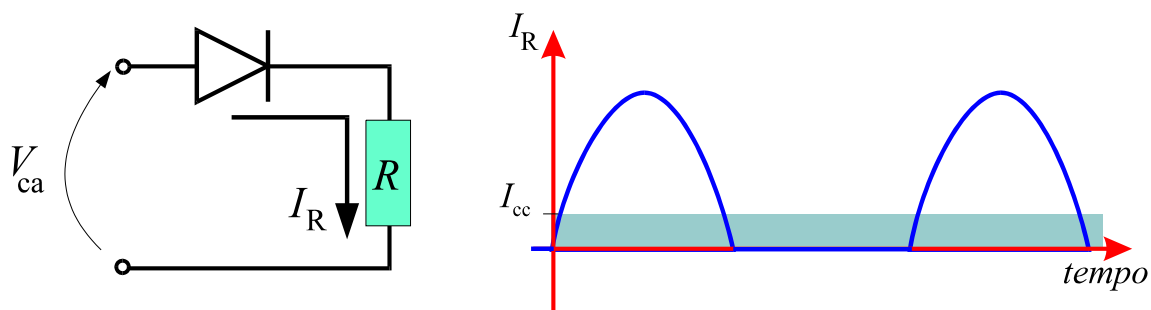


Fig.7 Circuito retificador simples e pulsos de corrente através do diodo.

O folheto técnico fornecido pelo fabricante, estabelece o **valor máximo da corrente média** que o componente pode suportar a partir da especificação do parâmetro I_{FAV} . A sigla FAV é a abreviação do termo inglês *forward average* que, traduzido para a língua portuguesa, torna-se *média direta*.

Valores do parâmetro I_{FAV} de alguns diodos disponíveis comercialmente estão mostrados na **Tabela 2**.

Tabela 2 Valores típicos do parâmetro I_{FAV} para alguns diodos comerciais.

DIODO	I_{FAV}
1N4004	1 A
SKE 1/12	1,3 A
BY 127	1 A

CORRENTE MÁXIMA ATRAVÉS DO DIODO

Em circuitos retificadores com filtro capacitivo, o diodo retificador conduz apenas durante um pequeno intervalo de tempo, que corresponde ao tempo de carregamento do capacitor, conforme ilustrado no primeiro gráfico da Fig.8.

Durante o curto espaço de tempo em que o diodo conduz, o capacitor recebe toda a carga liberada durante o período de descarga. Isso faz que a corrente durante o regime de condução do diodo se torne bastante elevada.

O segundo gráfico da Fig.8 ilustra a dependência no tempo da corrente através do diodo. Como pode ser aí observado, a corrente atinge um valor de pico em cada intervalo em que há condução através do diodo. Os catálogos e manuais de diodos sempre fornecem o máximo valor da corrente de pico para operação normal do componente.

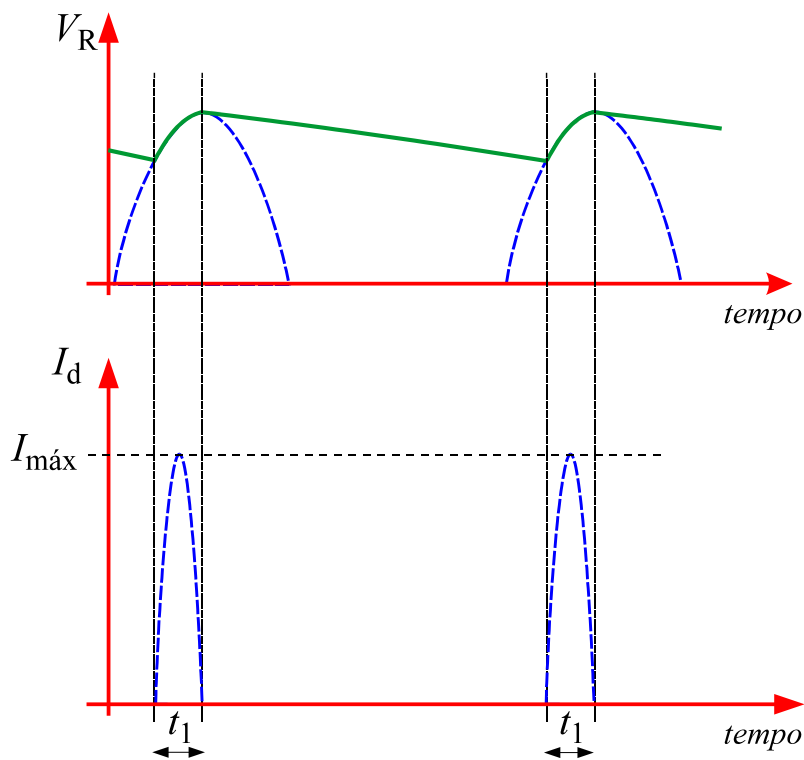


Fig.8 (a) Tensão de saída de um circuito retificador de meia onda com filtro capacitivo. **(b)** Dependência no tempo da corrente através do diodo.

Por ser dependente de vários parâmetros do circuito retificador, o valor da corrente de pico é difícil de ser determinado matematicamente. Porém, é sempre importante levar em consideração que quanto maior for a capacitância do filtro, tanto maior será o valor de pico da corrente através do diodo.

FÓRMULAS PARA CIRCUITOS RETIFICADORES

A **Tabela 3** fornece um resumo das equações utilizadas no cálculo dos principais parâmetros de fontes retificadoras. Os parâmetros aí utilizados são definidos a seguir:

- V_{cc}^* = Tensão *cc* na saída, desconsiderando a queda de tensão nos diodos.
- V_{cc} = Tensão *cc* na saída com carga máxima, e considerando a queda de tensão nos diodos.
- $V_{máx}$ = Tensão máxima *ca* aplicada a cada diodo.
- V_B = Queda de tensão típica em um diodo (0,3V ou 0,7V).
- V_{ond} = Tensão de ondulação medida entre os picos da forma de onda.
- % ond = Percentual de ondulação.
- $R\%$ = Fator de regulação.
- $V_{cc}(s/c)$ = Tensão de saída sem carga.
- V_{RWM} = Tensão inversa de trabalho máxima em cada diodo.
- $I_{máx}$ = Corrente de carga máxima em mA.
- R = Resistência da carga em Ω .
- C = Capacitância do filtro em μF .
- I_R = Corrente de carga.
- I_{cc} = Corrente média através do diodo.

As expressões para as tensões de saída relacionadas na **Tabela 3** não levam em consideração a resistência interna dos transformadores. Essa resistência pode causar diferenças da ordem de 10% a menos nos valores calculados para as tensões de saída.

Os valores para as tensões inversas máximas, obtidos através das equações da **Tabela 3** são valores reais de operação dos diodos. Portanto, o diodo escolhido para compor um dado circuito retificador deve ser especificado com um valor de **tensão inversa de trabalho máxima** maior do que aquele calculado com o uso das expressões da **Tabela 3**.

Os circuitos numerados na primeira coluna da **Tabela 3** são definidos a seguir :

- Circuito 1: Retificador de meia onda sem filtro.
- Circuito 2: Retificador de onda completa com derivação central sem filtro.
- Circuito 3: Retificador de onda completa em ponte sem filtro.
- Circuito 4: Retificador de meia onda com filtro capacitivo.
- Circuito 5: Retificador de onda completa com derivação central e filtro capacitivo.
- Circuito 6: Retificador de onda completa em ponte com filtro capacitivo.

Tabela 3 Fórmulas utilizadas no cálculo de parâmetros dos circuitos retificadores.

Circuito	V_{cc}^*	V_{cc}	% ond	R%	C (μF)	V_{RWM}	I_{cc}
1	$\frac{V_{m\acute{a}x}}{\pi}$	$\frac{V_{m\acute{a}x} - V_B}{\pi}$	121%	—	—	$V_{m\acute{a}x}$	$\frac{V_{cc}}{R}$
2	$\frac{2V_{m\acute{a}x}}{\pi}$	$2 \frac{V_{m\acute{a}x} - V_B}{\pi}$	48%	—	—	$2V_{m\acute{a}x}$	$\frac{V_{cc}}{2R}$
3	$\frac{2V_{m\acute{a}x}}{\pi}$	$2 \frac{V_{m\acute{a}x} - 2V_B}{\pi}$	48%	—	—	$V_{m\acute{a}x}$	$\frac{V_{cc}}{2R}$
4	$V_{m\acute{a}x} - \frac{V_{ond}}{2}$	$V_{m\acute{a}x} - \left(V_B + \frac{V_{ond}}{2} \right)$	$\frac{100V_{ond}}{\sqrt{12}V_{cc}}$	$100 \frac{V_{cc}(s/c) - V_{cc}}{V_{cc}}$	$\frac{16,6 I_{m\acute{a}x}}{V_{ond}}$	$2V_{m\acute{a}x}$	$\frac{V_{cc}}{2R}$
5	$V_{m\acute{a}x} - \frac{V_{ond}}{2}$	$V_{m\acute{a}x} - \left(V_B + \frac{V_{ond}}{2} \right)$	$\frac{100V_{ond}}{\sqrt{12}V_{cc}}$	$100 \frac{V_{cc}(s/c) - V_{cc}}{V_{cc}}$	$\frac{8,33 I_{m\acute{a}x}}{V_{ond}}$	$2V_{m\acute{a}x}$	$\frac{V_{cc}}{2R}$
6	$V_{m\acute{a}x} - \frac{V_{ond}}{2}$	$V_{m\acute{a}x} - \left(2V_B + \frac{V_{ond}}{2} \right)$	$\frac{100V_{ond}}{\sqrt{12}V_{cc}}$	$100 \frac{V_{cc}(s/c) - V_{cc}}{V_{cc}}$	$\frac{8,33 I_{m\acute{a}x}}{V_{ond}}$	$V_{m\acute{a}x}$	$\frac{V_{cc}}{2R}$

A seguir são apresentados dois exemplos de utilização das fórmulas listadas na **Tabela 3**.

Exemplo 3: Determinar os parâmetros de operação de um circuito retificador de onda completa em ponte, sem filtro que utiliza diodos de silício, para uma tensão de entrada $V_{ca} = 8 \text{ V}$ e uma carga de 27Ω .

Tensão de saída:

Com $V_{ca} < 20\text{V}$, deve-se considerar as quedas de tensão nos diodos

Portanto,

$$V_{cc} = \frac{2}{\pi}(V_{\text{máx}} - 2V_B) = \frac{2}{\pi}(\sqrt{2}V_{ca} - 2V_B) = \frac{2}{\pi}(\sqrt{2} \times 8 - 2 \times 0,7)$$

$$V_{cc} = \frac{2}{\pi}(1,41 \times 8 - 1,4) = \frac{2}{\pi}(1,41 \times 8 - 1,4) = \frac{2 \times 9,9}{3,14} = \frac{19,8}{3,14}$$

$$\Rightarrow V_{cc} = 6,3 \text{ V}$$

Percentual de ondulação:

De acordo com a **Tabela 3**, tem-se que $\% \text{ ond} = 48\%$

Tensão inversa de trabalho em cada diodo:

Utilizando a **Tabela 3**, $V_{\text{RWM}} = V_{\text{máx}}$ e, portanto,

$$\Rightarrow V_{\text{RWM}} = 11,3 \text{ V}$$

Corrente média em cada diodo:

$$I_{cc} = \frac{V_{cc}}{2R} = \frac{6,3}{2 \times 27} = \frac{6,3}{54} = 0,117 \text{ A}$$

$$\Rightarrow I_{cc} = 117 \text{ mA}$$

Com base no que foi calculado, poder-se-iam utilizar diodos com as seguintes características:

$$V_{\text{RWM}} = 25 \text{ V}, I_{\text{FAV}} = 200 \text{ mA}$$

Exemplo 4: Determinar os parâmetros de operação de um circuito retificador de onda completa com derivação central em ponte, com filtro de saída, que utiliza diodos de silício, para uma tensão de entrada $V_{ca} = 35 \text{ V}$, que produza um máximo de corrente média na carga de 230 mA e uma tensão de ondulação de 5 V.

Tensão de saída:

Com $V_{ca} > 10 \text{ V}$, a queda de tensão em cada diodo pode ser desprezada.

Portanto,

$$V_{cc} = V_{\text{máx}} - \frac{V_{\text{ond}}}{2} = \sqrt{2} V_{ca} - \frac{V_{\text{ond}}}{2} = 1,41 \times 35 - \frac{5}{2} = 49,4 - 2,5$$

$$\Rightarrow V_{cc} = 46,9 \text{ V}$$

Percentual de ondulação:

De acordo com a **Tabela 3**, tem-se que

$$\% \text{ ond} = \frac{V_{\text{ond}}}{\sqrt{12} V_{cc}} \times 100 = \frac{100 \times 5}{3,46 \times 46,9} = \frac{500}{162,2}$$

$$\Rightarrow \% \text{ ond} = 3,1\%$$

Fator de regulação:

$$R\% = 100 \times \frac{V_{cc} \text{ (s/c)} - V_{cc}}{V_{cc}}$$

Para o retificador de onda completa, $V_{cc} \text{ (s/c)} = V_{\text{máx}} = 35 \text{ V}$, portanto

$$R\% = 100 \times \frac{49,4 - 46,9}{46,9} = \frac{100 \times 2,5}{46,9} = \frac{250}{46,9} \Rightarrow R\% = 5,3\%$$

Cálculo do filtro capacitivo:

Para o retificador de onda completa,

$$C = 8,33 \times \frac{I_{\text{máx}}}{V_{\text{ond}}} = 8,33 \times \frac{230}{5} = 8,33 \times 46 \Rightarrow C = 383 \mu\text{F}$$

Para esse circuito, pode-se utilizar um capacitor de $470\mu\text{F}$, 63V , disponível comercialmente.

Tensão inversa de trabalho em cada diodo:

Utilizando a **Tabela 3**, $V_{\text{RWM}} = 2V_{\text{máx}}$ e, portanto,

$$\Rightarrow V_{\text{RWM}} = 98,8 \text{ V}$$

Corrente média em cada diodo:

Para o retificador de onda completa, a corrente média em cada diodo é a metade da corrente média através da carga

Portanto,

$$I_{\text{cc}} = \frac{I_{\text{R}}}{2} = \frac{230}{2}$$

$$\Rightarrow I_{\text{cc}} = 115 \text{ mA}$$

Com base no que foi calculado, poder-se-iam utilizar diodos com as seguintes características:

$$V_{\text{RWM}} = 150 \text{ V} , I_{\text{FAV}} = 200 \text{ mA}$$

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Como se comparam as tensões de ondulação dos retificadores de meia onda e de onda completa, ambos com filtro de saída?
2. O que é percentual de ondulação?
3. Quais os valores do percentual de ondulação de fontes retificadoras de meia onda e de onda completa, sem filtro de saída?
4. Qual a expressão que relaciona a tensão de ondulação com o seu valor efetivo?
5. O que é fator de regulação e qual a expressão que o define? O que representa cada termo da expressão?
6. Qual o teste básico para determinação do correto funcionamento de uma fonte retificadora de meia onda com filtro de saída?
7. Que parâmetros são utilizados para caracterizar os limites de operação de um diodo?

BIBLIOGRAFIA

ARNOLD, Robert & Brandt, Hans. Retificadores semicondutores não controlados. São Paulo. E.P.U, 1975, 49pp. il. (Eletrônica Industrial, 1)

CIPELLI, Antônio Marco Vicari & Sandrini, Waldir João. Teoria e desenvolvimento de projetos de circuitos eletrônicos. 7.^a ed., São Paulo, Érica, 1983, 580pp.

DEGEM SYSTEMS. Fontes de alimentação eletrônicas. Israel, Eletrônica Modular, Hemus, c1976, 49pp. il.

FIGINI, Gianfranco. Eletrônica Industrial. Circuitos e aplicações. São Paulo , Hemus, c1982, 366pp.

SENAI/Departamento Nacional. Reparador de circuitos eletrônicos; eletrônica básica II. Rio de Janeiro, Divisão de Ensino e Treinamento, c1979 (Coleção Básica Senai, Módulo 1).