



kroton
paixão por educar

GRADUAÇÃO PRESENCIAL
1º semestre- 2016

Eletrônica I
Eng^a Elétrica– 4º/ 5ºsemestres

Prof^o. Ms.Cristiano Malheiro

cmalheiro@anhanguera.com
cmalheiro@aedu.com

<http://cristianotm.wix.com/aulas>

1



Aula 10

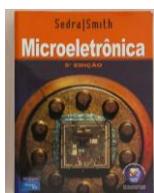
Bibliografia Básica



1. CRUZ, Eduardo Cesar Alves. **Eletrônica Aplicada**. 2ª edição. Rio de Janeiro: Érica, 2013. (11 exemplares)

<http://187.86.214.60/pergamum/biblioteca/index.php?id=ANHAN>

5.	<input type="checkbox"/>	Eletrônica aplicada - 2 / 2008 - (E-book)
	on-line	CRUZ, Eduardo Cesar Alves. Eletrônica aplicada. 2. São Paulo Erica 2008 1 recurso online ISBN 9788536505367.
		Exemplares Marc



2. SMITH, Kenneth C.; SEDRA, Adel S. **Microeletrônica**. 5ª ed. São Paulo: Pearson- Prentice Hall, 2007, v. 1. (19 exemplares)



3. BOYLESTAD, Robert L. NASHELSKY, L. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**. 12ª edição. São Paulo: Pearson, 2013. (17 exemplares)

2

kroton
paixão por educar



Aula 10

Retificadores com Filtro (pág.

O procedimento mais simples para reduzir o *ripple* da tensão de saída dos circuitos retificadores é a conexão de capacitores de filtro.

2.5.1. Retificador de Meia Onda com Filtro Capacitivo

Considere o circuito retificador de meia onda com carga resistiva mostrado na Figura 2.48 no qual foi ligado em paralelo com a carga um *capacitor de filtro*.

Se o capacitor não tivesse sido ligado, a forma de onda da tensão na carga seria a senoidal retificada em meia onda, como a apresentada na Figura 2.49(a).

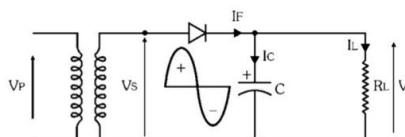


Figura 2.48 - Retificador de meia onda com filtro capacitivo.



Aula 10

Retificadores com Filtro

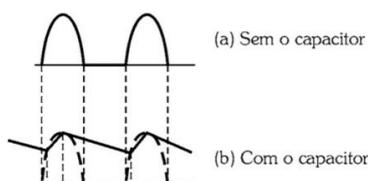


Figura 2.49 - Formas de onda na carga.

Conforme já vimos, essa forma de onda possui um *fator de ripple* de 120%, ou seja, há mais componente alternada do que contínua.

Quando se coloca um capacitor em paralelo com a carga, a forma de onda passa a ser a apresentada em linha cheia na Figura 2.49(b).

Observe que essa tensão também não é constante, mas ela varia entre um valor mínimo, que não é mais zero, e um valor máximo, que é igual ao valor de pico da onda senoidal.



Aula 10

Retificadores com Filtro

Para entender como essa forma de onda é gerada, vamos supor que o capacitor esteja inicialmente descarregado. Assim, o primeiro ciclo de tensão senoidal carrega-o até o valor de pico.

A partir daí, ele se descarrega e se carrega na mesma frequência da tensão retificada (60Hz), conforme apresenta detalhadamente a Figura 2.50.



Aula 10

Retificadores com Filtro

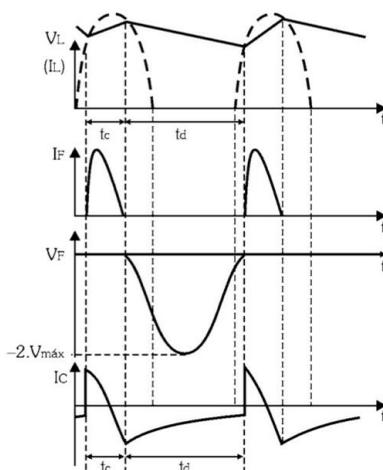


Figura 2.50 - Formas de onda na carga e no diodo com filtro capacitivo.



Aula 10

Retificadores com Filtro

Primeiramente analisemos a tensão na carga V_L . No instante em que se inicia o intervalo de tempo de carga do capacitor (t_c), a tensão no secundário do transformador (linha pontilhada) passa a ser maior que a tensão no capacitor (linha cheia), como indica a Figura 2.51.



Figura 2.51 - Polarização do diodo.

O diodo entra em condução, de modo que a corrente atinge rapidamente o pico, conforme mostra o gráfico da corrente no diodo (I_F), na Figura 2.50.

Voltando à V_L , à medida que o capacitor se carrega, a corrente no diodo diminui, até que, com a carga máxima, ela cessa ($I_F = 0$).



Aula 10

Retificadores com Filtro

Nesse instante, a tensão no secundário do transformador (linha pontilhada) passa a ser menor do que a tensão no capacitor, levando o diodo ao corte. Inicia-se o intervalo de tempo de descarga do capacitor (t_d).

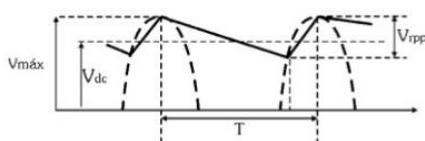


Figura 2.52 - Meia onda filtrada com ripple.

Quanto maior for a constante de tempo do circuito ($\tau = R_L C$), mais lenta é a descarga do capacitor. Isso faz com que a tensão na carga R_L se sustente com um valor médio V_{dc} mais elevado e com uma tensão de *ripple* pico a pico V_{ripp} menor, conforme mostra a Figura 2.52.

Voltando à Figura 2.50, observamos que a tensão no diodo (V_F) é praticamente nula no intervalo de tempo de sua condução.



Aula 10

Retificadores com Filtro

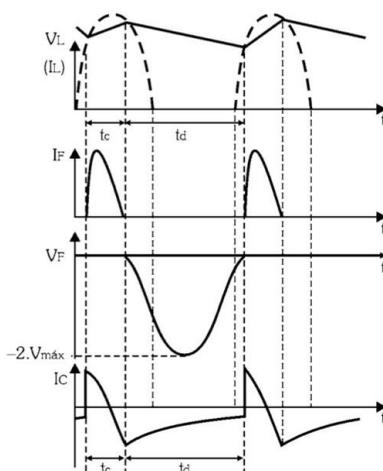


Figura 2.50 - Formas de onda na carga e no diodo com filtro capacitivo.



Aula 10

Retificadores com Filtro

A tensão reversa atinge praticamente o *dobro do valor máximo* no instante de pico do semiciclo negativo do secundário do transformador ($-V_{m\acute{a}x}$). Nesse instante, a tensão no capacitor é quase $+V_{m\acute{a}x}$, como na Figura 2.53.

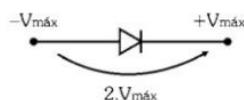


Figura 2.53 - Tensão de pico reversa no diodo.

O resultado é que a tensão na carga deixa de ser pulsante para se tornar quase constante. Quanto menor o *ripple*, melhor é a qualidade da tensão na carga.

A tensão pico a pico do *ripple* (V_{rpp}) é diretamente proporcional à corrente na carga (I_L), mas é inversamente proporcional à sua frequência ($f = 60\text{Hz}$, no Brasil) e ao valor do capacitor (C).



Aula 10

Retificadores com Filtro

Essas relações permitem apresentar uma fórmula prática para o projeto de fonte de alimentação:

$$V_{\text{ripp}} \cong \frac{I_{L\text{máx}}}{f \cdot C} \quad \text{em que: } f = 60\text{Hz}$$

Esta fórmula é aproximada e pode ser usada para um *ripple* máximo de 20% em torno da tensão média na carga (V_L).

Para a determinação do capacitor de filtro, deve-se lembrar que, além da escolha de um valor comercial mais próximo do valor calculado, a sua tensão de isolamento deve ser superior à tensão de pico do secundário do transformador.

Observando a Figura 2.52, podemos tirar também uma fórmula aproximada que relaciona a tensão média na carga (V_L) com o *ripple*:

$$V_L = V_{\text{dc}} \cong V_{\text{máx}} - \frac{V_{\text{ripp}}}{2} \quad \text{em que: } V_{\text{máx}} = V_{\text{Smáx}} - 0,6$$



Aula 10

Retificadores com Filtro

Especificações do Diodo

Para especificar o diodo, é preciso calcular a corrente média máxima, a corrente de surto e a tensão reversa máxima.

A corrente média no diodo é a soma das correntes médias no capacitor (I_C) e na carga (I_L).

No circuito, o capacitor trabalha carregando e descarregando, ou seja, a corrente ora é positiva ora é negativa, de modo que o seu valor médio pode ser desconsiderado.

O seu valor de pico deve ser observado, análise que faremos mais adiante.

Podemos considerar como referência para especificar a corrente média máxima no diodo o valor da corrente média máxima na carga.

$$I_{F\text{máx}} > I_{L\text{máx}}$$



Aula 10

Retificadores com Filtro

Em relação à tensão reversa de pico, conforme já vimos, ela é o dobro da tensão máxima, portanto:

$$V_{Rm\acute{a}x} > 2.V_{m\acute{a}x}$$

A corrente de surto no diodo é outro fator importante quando se acrescenta um capacitor de filtro ao retificador, conforme veremos a seguir.

Corrente de Surto

Na Figura 2.50 vimos que o intervalo de tempo de condução do diodo é pequeno, correspondente apenas ao tempo de carga do capacitor do valor mínimo ao máximo do *ripple*.



Aula 10

Retificadores com Filtro

A corrente de carga do capacitor pode atingir valores de pico um tanto elevados, de modo que não se deve escolher diodos que operem muito próximos de sua máxima capacidade de corrente.

Há, no entanto, no retificador com filtro capacitivo, um outro problema que, se não for levado em conta, pode danificar o diodo. Trata-se da *corrente direta de surto* (*surge peak forward current*), cuja nomenclatura mais comum encontrada nos manuais é IFSM.

A corrente de surto tem uma duração muito pequena e é produzida apenas no momento em que o circuito é ligado.

Consideremos que, ao ligarmos o circuito, o capacitor de filtro esteja completamente descarregado.



Aula 10

Retificadores com Filtro

Nesse estado, no início do processo de carga o capacitor comporta-se como um curto-circuito. As únicas resistências que atuam como limitadoras da corrente de carga são a *resistência do enrolamento do secundário do transformador* (r_{tr}) e a *resistência direta do diodo* (r_d), ambas de valores muito baixos, conforme a Figura 2.54.

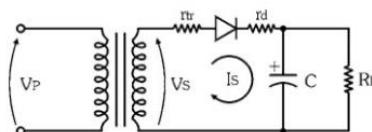


Figura 2.54 - Corrente de surto ao ligar o circuito.

Isso faz com que essa corrente inicial, denominada *corrente de surto* do circuito (I_s), possa atingir um valor de pico muitíssimo elevado. O pior caso ($I_{smáx}$) ocorre quando o circuito é ligado no instante em que a tensão do secundário do transformador encontra-se no seu valor de pico ($V_{máx}$).

Normalmente, se o capacitor de filtro é menor do que $1000\mu\text{F}$, o impacto da corrente de surto é muito pequeno; caso contrário, é preciso considerá-lo.



Aula 10

Retificadores com Filtro

Nesse caso, deve-se medir a resistência do secundário do transformador com um ohmímetro (r_{tr}) e calcular o valor aproximado da resistência direta do diodo (r_d) por meio de suas especificações $I_{Fmáx}$ e $V_{Fmáx}$ e pela seguinte fórmula:

$$r_d \cong \frac{V_{Fmáx} - 0,6}{I_{Fmáx}}$$

A corrente de surto máxima vale:

$$I_{smáx} = \frac{V_{máx}}{r_d + r_{tr}}$$

Por fim, o diodo escolhido deve ter:

$$I_{FSM} > I_{smáx}$$



Aula 10

Retificadores com Filtro

Exercício:

Projete uma fonte de alimentação com tensão de saída $V_L = 12V$, capacidade de corrente $I_{L,máx} = 500mA$ e *ripple* máximo de $\pm 10\%$.

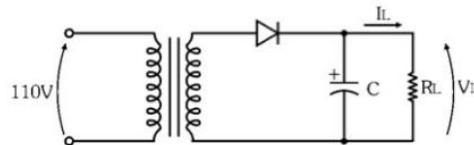


Figura 2.55 - Fonte de 12V x 500mA com retificador de meia onda.

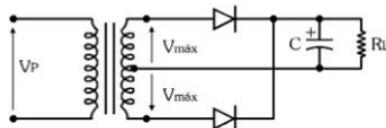


Aula 10

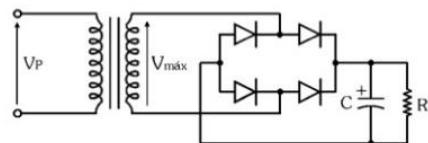
Retificadores com Filtro

2.5.2. Retificadores de Onda Completa com Filtro Capacitivo

Considere os circuitos retificadores de onda completa com carga resistiva e capacitor de filtro mostrados na Figura 2.56.



(a) Retificador com ponto neutro



(b) Retificador em ponte



Aula 10

Retificadores com Filtro

Nesses dois circuitos, a tensão retificada na carga sofre a ação do capacitor nos dois semiciclos, conforme a Figura 2.57.

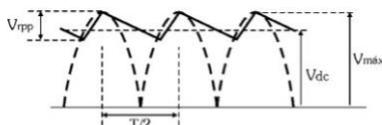


Figura 2.57 - Onda completa filtrada com ripple.

Em relação à tensão reversa máxima nos diodos, no retificador com ponto neutro ela é $2.V_{máx}$, enquanto no retificador em ponte ela é $V_{máx}$.

A frequência da tensão na carga é o dobro da frequência da rede, em função da retificação de onda completa, de modo que o valor pico a pico da tensão de *ripple* (V_{ripp}) é:

$$V_{ripp} \cong \frac{I_{Lmáx}}{f \cdot C} \quad \text{em que } f = 120\text{Hz}$$



Aula 10

Retificadores com Filtro

A tensão de isolamento do capacitor deve também ser superior à tensão de pico do secundário do transformador.

A relação entre a tensão média da carga (V_L) e o *ripple* é dada aproximadamente por:

$$V_L \cong V_{máx} - \frac{V_{ripp}}{2}$$

Especificações do Diodo

Nos dois circuitos, a corrente média nos diodos é a metade da corrente média na carga, já que cada um deles conduz apenas em um semiciclo. Assim:

$$I_{Fmáx} > \frac{I_{Lmáx}}{2}$$

A tensão reversa máxima dos diodos deve ser:

$$V_{Rmáx} > 2.V_{máx} \quad (\text{retificador com ponto neutro})$$

$$V_{Rmáx} > V_{máx} \quad (\text{retificador em ponte})$$



Aula 10

Retificadores com Filtro

A corrente de surto, no pior caso, é:

$$I_{Sm\acute{a}x} = \frac{V_{m\acute{a}x}}{r_d + r_r} \quad (\text{retificador com ponto neutro})$$

$$I_{Sm\acute{a}x} = \frac{V_{m\acute{a}x}}{2 \cdot r_d + r_r} \quad (\text{retificador em ponte})$$

Portanto, o diodo escolhido deve ter: $I_{FSM} > I_{Sm\acute{a}x}$



Aula 10

Retificadores com Filtro

Exercício:

Projete uma fonte de alimentação com as mesmas características da projetada anteriormente (12V x 500mA com $\pm 10\%$ de *ripple*), utilizando um retificador de onda completa em ponte.

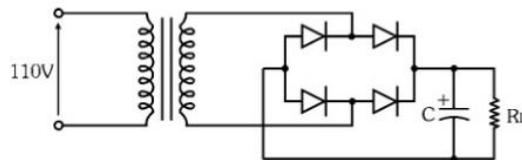


Figura 2.58 - Fonte 12V x 500mA com retificador em ponte.



Aula 10

Retificadores com Filtro

2.6. Dobrador de Tensão

Uma outra aplicação do diodo é o circuito *dobrador de tensão* mostrado na Figura 2.59.

Quando a tensão de entrada está no semiciclo positivo, o diodo D_1 conduz e carrega o capacitor C_1 com o valor de pico da tensão em relação à terra, que tem a polaridade indicada na Figura 2.59.

Ainda nesse semiciclo, o diodo D_2 está cortado, pois o seu catodo está polarizado positivamente.

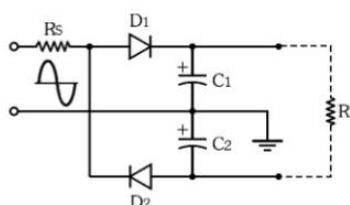


Figura 2.59 - Dobrador de tensão.

23

kroton
paixão por educar



Aula 10

Retificadores com Filtro

No momento em que a tensão de entrada passa ao semiciclo negativo, o diodo D_1 corta por estar agora reversamente polarizado, D_2 conduz por estar agora diretamente polarizado e C_2 carrega-se com o valor de pico da tensão aplicada com a mesma polaridade de C_1 , conforme mostra a Figura 2.60.

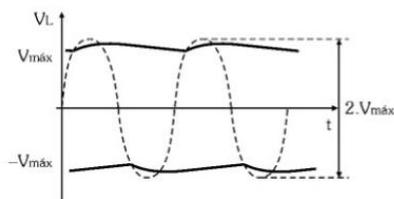


Figura 2.60 - Tensão na saída do circuito.

Em relação à terra, C_1 fica carregado com $V_{máx}$ e C_2 com $-V_{máx}$, totalizando na saída a tensão $2.V_{máx}$, como podemos notar no gráfico de V_L .

24

kroton
paixão por educar



Aula 10

Retificadores com Filtro

Em relação à terra, C_1 fica carregado com $V_{m\acute{a}x}$ e C_2 com $-V_{m\acute{a}x}$, totalizando na saída a tensão $2.V_{m\acute{a}x}$, como podemos notar no gráfico de V_L .

Caso o valor de R_L seja muito grande, praticamente não há consumo de corrente. Desta forma a tensão contínua de saída pode ser considerada $2.V_{m\acute{a}x}$.

Caso o valor de R_L seja muito pequeno, há um *ripple* na tensão de saída.

Nesse circuito, a corrente de surto pode comprometer muito o comportamento do diodo, de modo que, se necessário, deve-se acrescentar uma resistência limitadora R_s , conforme aparece no circuito da Figura 2.59. O seu valor, no entanto, deve ser no máximo 10 % do valor de R_L .



Aula 10

Retificadores com Filtro

Exercício

2.4) Considere o circuito da Figura 2.64 e calcule o *ripple* V_{rpp} e a tensão média V_L na carga R_L .

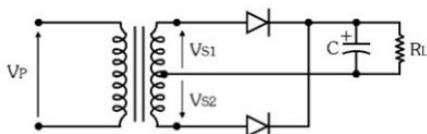


Figura 2.64 - Retificador com ponto neutro e filtro capacitivo.

Dados:

- $V_P = 110V$
- $V_{S1} = V_{S2} = 15V$
- $R_L = 100\Omega$
- $C = 1000\mu F$



kroton
paixão por educar

Bibliografia desta aula:

1. CRUZ, Eduardo Cesar Alves. **Eletrônica Aplicada**. 2ª edição. Rio de Janeiro: Erica, 2013.
2. http://professorpetry.com.br/Ensino/Repositorio/Docencia_CEFET/Referenciais/2007_1/AuTa_16.pdf

27



kroton
paixão por educar

