

# RETIFICADORES

Por Leandro Teodoro  
17 fev 2012

*Nas páginas a seguir serão abordados os tipos básicos de retificadores e suas características principais. Também será abordado o filtro com o capacitor e cuidados para seu dimensionamento.*

## 1. INTRODUÇÃO

Os retificadores são circuitos eletrônicos que transformam a energia elétrica alternada em contínua. A energia contínua é necessária para grande maioria dos circuitos eletrônicos. Sendo retirada de fontes de potência como as baterias e pilhas, ou retificando a energia elétrica alternada quando o dispositivo eletrônico é conectado na tomada da rede elétrica.

Os retificadores comentados abaixo podem ser de três tipos: retificador de meia onda, de onda completa e ponte retificadora.

## 2. RETIFICADOR DE MEIA ONDA

O circuito básico para retificação em meia onda é apresentado na figura 1. Este tipo de retificador tem como característica principal a condução em somente metade do ciclo do sinal senoidal pelo diodo semicondutor. Assim sendo, a frequência de saída no sinal igual a entrada.

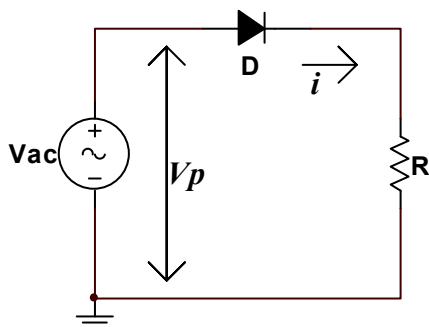


Figura 1 - Retificador de meia onda

As formas de onda da tensão da fonte  $V_{ac}$  e a corrente do circuito

são representadas pelos gráficos abaixo.

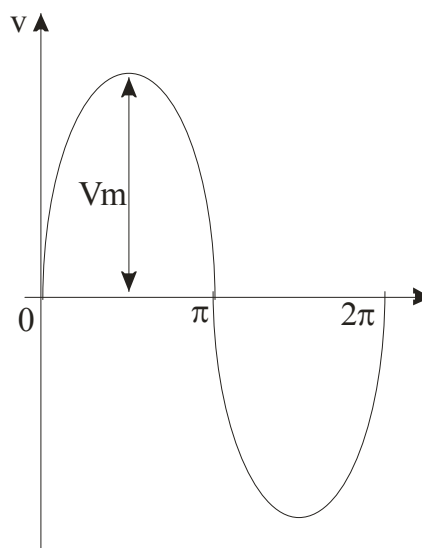


Figura 2- Forma de onda da tensão da fonte

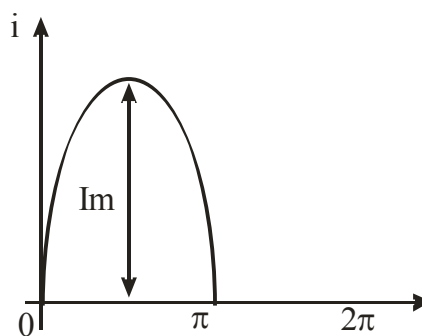


Figura 3 - Forma de onda da corrente

Como foi mencionado, o objetivo do retificador é transformar a energia elétrica alternada em contínua. Matematicamente isso é realizado igualando as áreas do sinal senoidal de corrente alternada e contínua. Assim, encontrando um valor correspondente para a área do sinal contínuo. É usado como base 1 ciclo do sinal, ou seja,  $360^\circ$  elétricos de tempo ( $2\pi$ ).

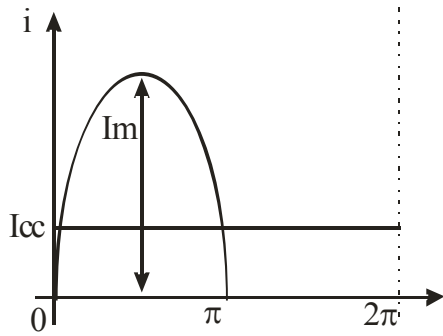


Figura 4 - Sinal alternado e contínuo da corrente

A área do sinal de corrente contínua (cc) é representada por:

$$\text{Área}_{cc} = I_{cc} \times 2\pi$$

O valor instantâneo da corrente  $i$  vale:

$$i = I_m \sin(\omega t)$$

Fazendo  $\alpha = \omega t$ , temos:

$$i = I_m \sin \alpha$$

A área do sinal senoidal da corrente (ac) é dada por:

$$\text{Área}_{ac} = \int_0^{2\pi} i \, d\alpha$$

Substituindo:

$$\text{Área}_{ac} = \int_0^{2\pi} I_m \sin \alpha \, d\alpha$$

Observe que não existe sinal alternado no intervalo entre  $\pi$  e  $2\pi$ . Então o limite superior da integral será alterado para  $\pi$ , pois não há efetividade calcular a área de um sinal nulo.

$$\text{Área}_{ac} = \int_0^{\pi} I_m \sin \alpha \, d\alpha$$

Igualando as áreas cc e ac:

$$2\pi I_{cc} = \int_0^{\pi} I_m \sin \alpha \, d\alpha$$

$$I_{cc} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_m \sin \alpha \, d\alpha \quad (\text{eq. 1})$$

$$I_{cc} = \frac{1}{2\pi} I_m \int_0^{\pi} \sin \alpha \, d\alpha$$

$$I_{cc} = -\frac{1}{2\pi} I_m (\cos \pi - 1)$$

$$I_{cc} = \frac{I_m}{\pi}$$

A equação 1 é conhecida como valor médio da corrente. O amperímetro de corrente contínua é construído para indicar este valor. Matematicamente o valor médio é definido como a área de um ciclo da curva pelo seu período. Para uma senoide completa não existe valor médio, pois o semiciclo positivo é igual ao semiciclo negativo.

A tensão contínua na saída do diodo é dada por:

$$V_{cc} = I_{cc} R$$

$$V_{cc} = I_{cc} R = \frac{I_m R}{\pi} = \frac{V_p}{\pi}$$

$$V_{cc} = 0,318 V_p \quad (\text{eq. 2})$$

Sendo  $V_p$  a tensão de pico na saída da fonte ac.

A equação 2 vale para o retificador senoidal de meia onda.

Até agora o diodo é considerado como ideal. Para incluir a queda de tensão deste componente nos cálculos, o diodo será aproximado para uma chave aberta quando polarizado inversamente, e quando polarizado diretamente uma chave fechada com uma barreira de potencial  $V_D$ . A resistência de corpo do diodo, que é da ordem de décimos de ohm, será desconsiderada por ser muito

menor que a resistência de carga na maioria dos circuitos práticos. Assim sendo, a eq. 2 será modelada para:

$$V_{cc} = 0,318V_p - V_D$$

Sendo:

$V_D$  - queda de tensão no diodo

A barreira de potencial  $V_D$  (forward voltage) varia com a corrente direta e temperatura no diodo (anexo A).

### 3. RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA

O retificador de onda completa é caracterizado por conduzir em ambos os semiciclos da senóide de entrada e por possuir dois diodos, cada um conduzindo um semiciclo. Por esse fato a frequência de saída do retificador será o dobro da frequência de entrada. Outra característica é o uso da tomada central do enrolamento secundário do transformador (centertrap). O circuito retificador de onda completa é mostrado abaixo.

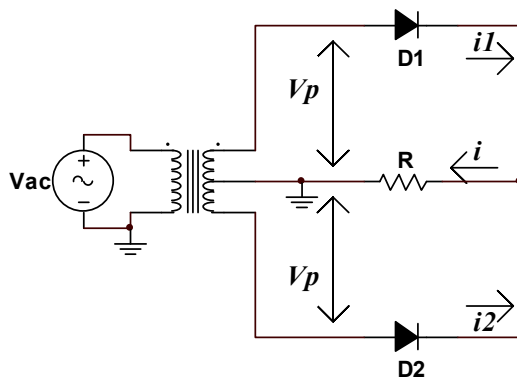


Figura 5 - Retificador de onda completa

As formas de onda deste tipo de retificador são mostradas nas figuras a seguir:

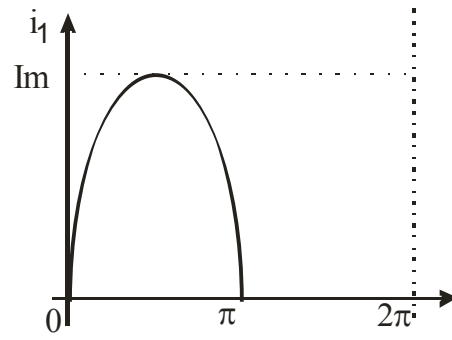


Figura 6 - Corrente no diodo D1

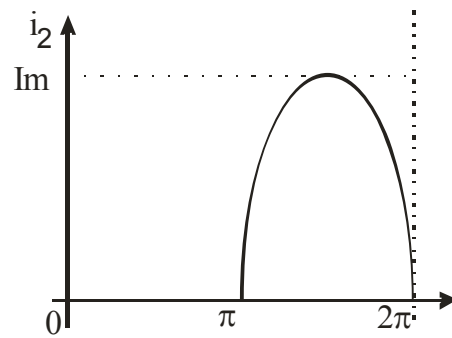


Figura 7 - Corrente no diodo D2

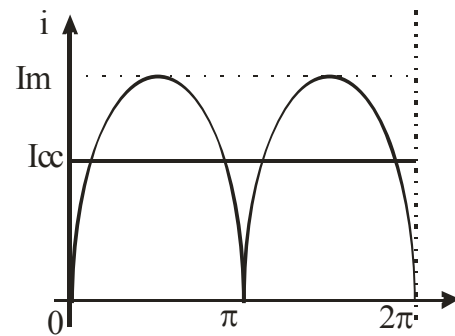


Figura 8 - Corrente na carga R

Observe que pelo fato da condução em ambos os semiciclos, o período da corrente na carga diminui para  $\pi$ . No intervalo de  $\pi$  a  $2\pi$  o ciclo se repete. Então, para o cálculo da área será usado o intervalo de 0 a  $\pi$  (eq. 3).

$$\text{Área}_{cc} = I_{cc} \times \pi$$

$$\text{Área}_{ac} = \int_0^{\pi} I_m \sin \alpha \, d\alpha$$

$$I_{cc} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} I_m \sin \alpha \, d\alpha \quad (\text{eq. 3})$$

$$I_{cc} = \frac{2I_m}{\pi}$$

A tensão contínua na saída dos diodos é dada por:

$$V_{cc} = I_{cc}R$$

Para o retificador senoidal de onda completa é válido:

$$V_{cc} = I_{cc}R = \frac{2I_m R}{\pi} = \frac{2V_p}{\pi}$$

$$V_{cc} = 0,636V_p \text{ (eq. 4)}$$

Considerando a queda de tensão no diodo:

$$V_{cc} = 0,636V_p - V_D$$

#### 4. PONTE RETIFICADORA

A ponte retificadora também é um retificador de onda completa, mas com um par de diodos conduzindo a cada semiciclo do sinal de entrada. Com esta configuração de diodos não é necessário usar a tomada central do transformador. Assim sendo, a tensão de pico do secundário do transformador não é dividida, e se podem usar transformadores menores.

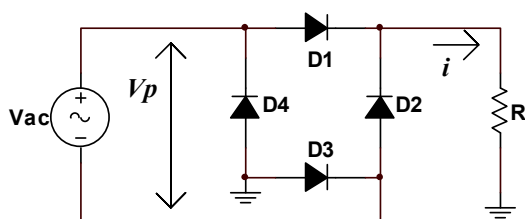


Figura 9 - Retificador em ponte

Para o primeiro semiciclo da senóide (positivo) de entrada os diodos D1 e D3 conduzem, formando o primeiro semiciclo positivo na carga.

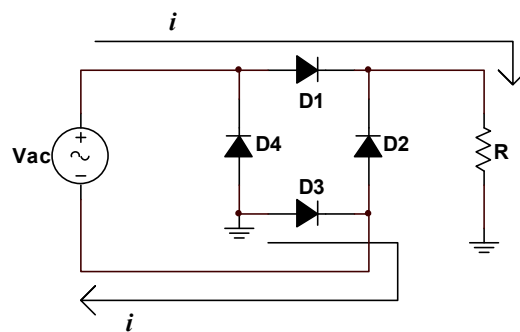


Figura 10 - Condução no semiciclo positivo

No segundo semiciclo (negativo) da senóide de entrada os diodos D2 e D4 conduzem, formando o segundo semiciclo positivo na carga.

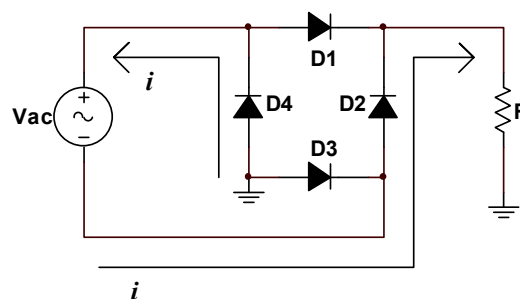


Figura 11 - Condução no semiciclo negativo

Da mesma forma que o retificador de onda completa, como o retificador em ponte conduz em ambos os semiciclos, a frequência do sinal de saída é o dobro do sinal de entrada.

Para a análise das áreas, são válidas as mesmas do circuito de onda completa:

$$V_{cc} = 0,636V_p \text{ (eq. 4)}$$

Como dois diodos conduzem ao mesmo tempo a cada semiciclo, para incluir a queda de tensão nos diodos nos cálculos temos:

$$V_{cc} = 0,636V_p - 2V_D$$

#### 5. FILTRO COM CAPACITOR

Com o objetivo de reduzir a oscilação de tensão na carga, faz-se uso do filtro com capacitor. Este capacitor é colocado em paralelo com a carga, com o intuito de

acumular energia quando o diodo conduz e suprir a carga quando o diodo está cortado.

Para exemplificar os efeitos do filtro com capacitor adotemos o circuito abaixo baseado no retificador de meia onda.

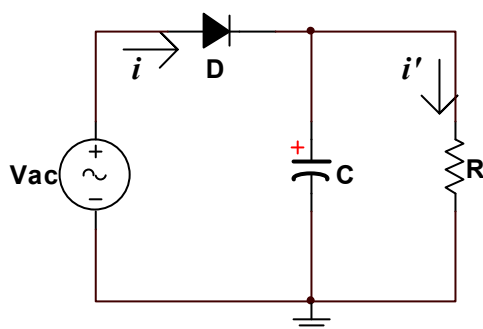


Figura 12 - Filtro com capacitor

Neste circuito temos  $i$  a corrente no diodo,  $i'$  a corrente na carga e o capacitor de filtro  $C$ . Vamos adotar que a fonte de tensão seja  $V_{ac} = 10V$  de pico/60Hz e uma carga  $R = 20\Omega$ .

Em um primeiro momento analisaremos as formas de onda sem o capacitor de do circuito.

Xa: 16.67m Xb: 0.000 a-b: 16.67m freq: 60.00  
Yc: 9.086 Yd: -57.14m c-d: 9.143

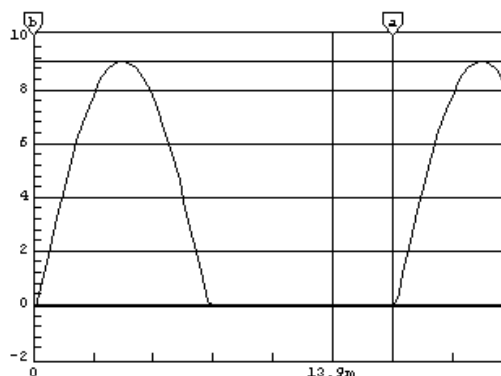


Figura 13 - Tensão na carga

Nota-se a forma de onda característica de um retificador de meia onda, sem suavização das oscilações da tensão na carga. Pois não existe nenhum capacitor para suprir a carga quando o diodo entra em corte no segundo semiciclo.

Agora vamos inserir um capacitor de  $220\mu F$ .

Xa: 8.333m Xb: 0.000 a-b: 8.333m freq: 120.0  
Yc: 11.09 Yd: 1.943 c-d: 9.143

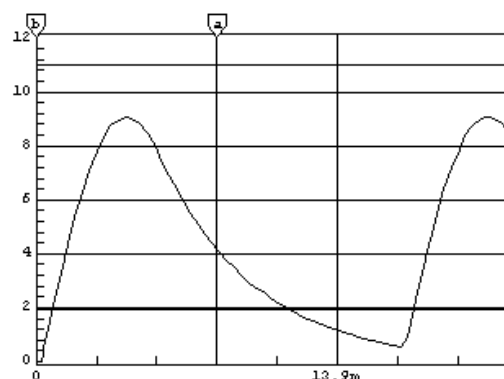


Figura 14 - Tensão na carga com  $C=220\mu F$

Com um capacitor de  $220\mu F$  acontece uma ligeira melhora na oscilação. O capacitor entrega à carga, no segundo semiciclo, a energia acumulada no primeiro semiciclo.

Abaixo é mostrada a forma de onda da tensão na carga com um capacitor de filtro de  $2200\mu F$ , dez vezes maior que o anterior.

Xa: 24.86m Xb: 16.52m a-b: 8.333m freq: 120.0  
Yc: 9.143 Yd: 5.514 c-d: 2.629

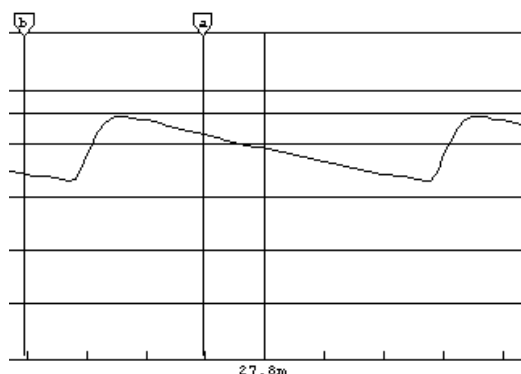


Figura 15 - Tensão na carga com  $C=220\mu F$

A melhoria da filtragem é significativa, diminuindo a oscilação na carga. Um capacitor de maior valor pode acumular uma maior energia para ser entregue a carga no momento de corte do diodo.

Abaixo são apresentados os gráficos de corrente no diodo e corrente na carga para  $C=220\mu F$ .

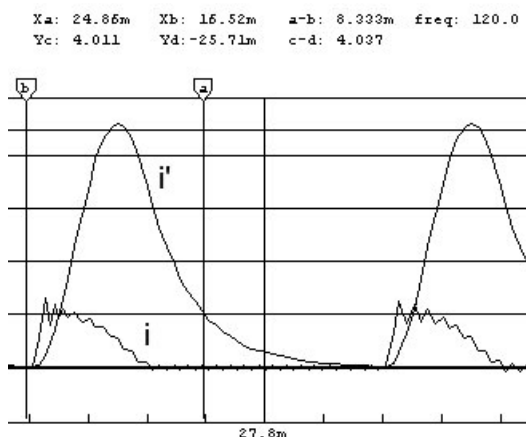


Figura 16 - Correntes  $i$  e  $i'$  com  $C=220\mu F$

Como esperado o diodo conduz no semiciclo positivo, corrente  $i$ , conforme mostra a figura acima.

Agora vamos observar estas mesmas correntes com o capacitor de filtro de  $2200\mu F$ .

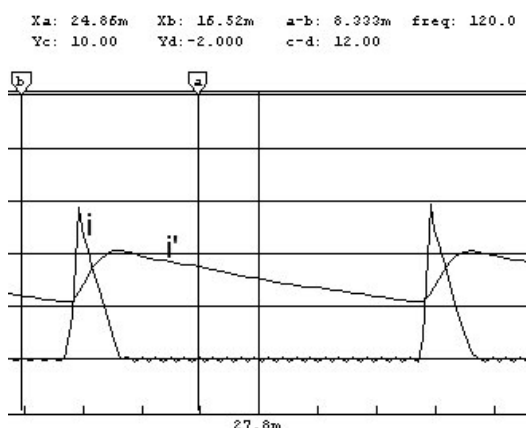


Figura 17 - Correntes  $i$  e  $i'$  com  $C=2200\mu F$

Note que quando se aumenta o valor do capacitor com o intuito de diminuir a oscilação de tensão na carga (filtragem), também provoca um aumento expressivo na corrente no diodo. Deve-se tomar cuidado, pois mesmo com a corrente média esteja dentro dos limites da corrente nominal do diodo, a corrente de pico pode ser excessiva.

Note na figura 17 que com a adição do capacitor de filtro o tempo de condução do diodo é muito menor que o tempo de duração de um semiciclo.

Para o cálculo inicial do valor do capacitor de filtro pode-se usar a equação abaixo:

$$V_R = \frac{I}{fC} \quad (eq. 5)$$

Sendo:

$V_R$  – tensão de ondulação de pico a pico

$I$  – corrente cc na carga

$f$  – frequência de saída do retificador

$C$  – valor do capacitor de filtro

A equação 5 é válida para valores de ondulações de pico a pico menores que 20% da tensão da carga. Usualmente são escolhidos valores menores que 10% para ondulação. [2]

## 6. CORRENTE DE SURTO

Olhando para a figura 12, no momento que a fonte ac é ligada no circuito, o capacitor de filtro está descarregado e funcionará como um curto-circuito. A corrente que flui pelo diodo e o capacitor só é limitada pela resistência interna do diodo e a resistência do enrolamento do secundário do transformador (representado pela fonte ac). No pior caso, o circuito é energizado quando a tensão da rede encontra-se no seu valor máximo. A figura abaixo mostra a corrente de surto para um capacitor de filtro de  $2200\mu F$ .

Xa: 16.59m Xb: 0.000 a-b: 16.59m freq: 60.26  
Yc: 8.971 Yd: -57.14m c-d: 9.029

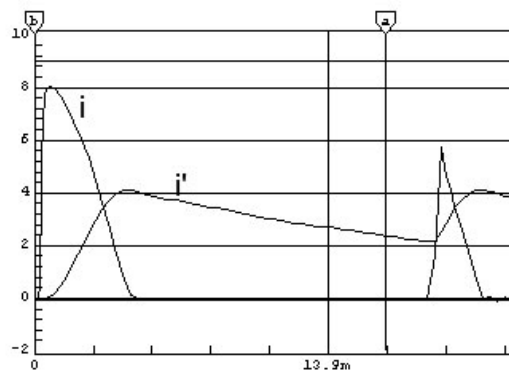


Figura 18 - Corrente de surto

A corrente de surto diminui conforme o capacitor se carrega. O diodo escolhido deve suportar essa corrente. Por exemplo, o 1N4007

resiste a 30A de corrente de surto em 8,3ms (anexo A).

## CONCLUSÃO

O projetista pode escolher qual o tipo de retificador atende as necessidades do circuito, porém o retificador de onda completa e em ponte são mais utilizados por aproveitarem ambos os semiciclos do sinal de entrada. O capacitor de filtro deve ser dimensionado para estar dentro dos limites de oscilação de tensão que o circuito alimentado exige, porém tomando cuidado para não exceder a corrente máxima média e de pico do diodo.

## REFERÊNCIAS

- [1] ELETRÔNICA VOL I, Milman - Halkias, Editora McGraw-Hill
- [2] ELETRÔNICA VOL I, Malvino, Albert Paul, Editora Perarson, 4ª Edição