



Artigo disponibilizado *on-line*

Revista Ilha Digital

Endereço eletrônico:  
<http://ilhadigital.florianopolis.ifsc.edu.br/>



## METODOLOGIA DE PROJETO DE RETIFICADORES COM FILTRO CAPACITIVO

Clóvis Antônio Petry<sup>1</sup>

**Resumo:** Neste artigo apresenta-se o estudo e a metodologia de projeto de retificadores de meia onda e onda completa com filtro capacitivo. Empregados em todas as fontes de alimentação, seja lineares seja chaveadas, os retificadores são conversores de tensão alternada para contínua, comumente usando filtro capacitivo, o que torna sua análise e dimensionamento complexos. A modelagem e o equacionamento do circuito para posterior projeto e especificação dos componentes se tornam tarefas dispendiosas, pois os circuitos utilizam elementos não-lineares, o que faz com que as correntes e tensões no circuito também sejam não-lineares. Assim, neste trabalho se apresenta uma metodologia simples e que dispensa o uso de abacos, permitindo o projeto e escolha dos componentes com base em equações de baixa ordem e complexidade, facilitando o uso por estudantes e projetistas.

**Palavras-chave:** Retificador. Filtro capacitivo. Metodologia de projeto. Eletrônica de potência.

**Abstract:** *This paper introduces the study and design methodology for half and full wave rectifiers with capacitive filter. Used in all power supplies such linear or switching, rectifiers are converters from alternate current to continuous current that normally used capacitive filters, what demands difficulty for its analysis and designing. Those difficulties occurs because the converters are essentially composed by non linear elements such diodes or switching semiconductors, so currents and voltages are non linear and analysis became complex and hard to realize. In this context, this paper presents and simple design methodology that dispenses the usage of abacus allowing the analysis and design with simple e low order expressions, that is interesting for designers and students.*

**Keywords:** *Rectifier. Capacitive filter. Design methodology Power electronics.*

<sup>1</sup> Professor do DAELN, campus Florianópolis, do IFSC <petry@ifsc.edu.br>.

### 1. INTRODUÇÃO

O uso de equipamentos eletrônicos nas residências, comércio e indústria tem aumentado a cada dia, com a proliferação de aplicações com as mais diversas finalidades, dentre elas: médicas, fabris, segurança, comunicação, entretenimento etc.

O estágio de entrada, do ponto de vista do fornecimento de energia, de grande parte dos equipamentos eletrônicos é um circuito retificador, tanto em fontes lineares quanto em fontes chaveadas.

Estes circuitos retificadores, genericamente denominados de conversores corrente alternada para corrente contínua (ca-cc), empregam dispositivos semicondutores não-lineares, que podem ser diodos, tiristores ou interruptores chaveados em alta

frequência, no caso de MOSFETs (*metal-oxide-semiconductor-field-effect-transistor*) e IGBTs (*insulated-gate-bipolar-transistor*).

A análise matemática destes circuitos, em função das não-linearidades dos componentes envolvidos, se torna complexa, exigindo uma abordagem simplificada com fins de projeto e especificação de componentes (BARBI, 2005, 2006).

Uma alternativa para se evitar a análise dispendiosa dos circuitos dos retificadores é utilizar os simuladores de circuitos eletrônicos, obtendo-se então as amplitudes e formas de onda de interesse.

Por outro lado, a alternativa de utilizar simuladores é pouco prática para fins de projeto, quando um mesmo produto precisa ser alterado, ou então durante a fase de especificação de

componentes, onde comumente se torna necessária a alteração de variáveis, visando a otimização do projeto ou a redução de seu custo final.

De outro modo, existe a possibilidade de uma análise mais completa, como, por exemplo, as realizadas em Pressman (1998) ou Barbi (2005), mas que levam a elaboração de ábacos, dificultando a posterior etapa de projeto de circuitos em virtude de exigir a consulta a estes ábacos para a especificação dos componentes do conversor.

Assim, neste trabalho se pretende apresentar uma metodologia simples e com bons resultados para circuitos retificadores monofásicos.

O trabalho está organizado nos seguintes tópicos:

**Retificador monofásico de meia onda** – onde se apresenta o funcionamento, equacionamento, metodologia de projeto e resultados de simulação do retificador monofásico de meia onda;

**Retificador monofásico de onda completa em ponte** – é apresentado o funcionamento, equacionamento, metodologia de projeto e resultados de simulação do retificador monofásico de onda completa em ponte;

**Retificador monofásico ponte completa dobrador de tensão** – onde se apresentam as diferenças no projeto deste conversor em relação aos retificadores de meia onda e onda completa;

**Projeto com tensão de entrada variável** – considerações a respeito do projeto nesta situação de operação;

**Corrente de partida de circuitos retificadores com filtro capacitivo** – considerações sobre como limitar a corrente de partida nos conversores cc-ca;

**Considerações finais** – discussão dos resultados obtidos e possibilidades de continuidade do trabalho;

**Referências bibliográficas** – literatura consultada para desenvolvimento do trabalho.

## 2. RETIFICADOR MONOFÁSICO DE MEIA ONDA

### 2.1. Apresentação do conversor

O circuito do retificador monofásico de meia onda é mostrado na Figura 1. Este retificador consiste na utilização de apenas um diodo e filtro capacitivo na saída.

As principais formas de onda do retificador de meia onda são mostradas na Figura 2. Para este conversor, têm-se duas etapas distintas de funcionamento, durante o semiciclo positivo da tensão da rede:

- $0 \leq t \leq t_1$  - o diodo está bloqueado e a carga recebe energia do capacitor;

- $t_1 \leq t \leq t_2$  - o diodo está conduzindo e o capacitor é carregado com a energia vinda da rede. Este intervalo é denominado de  $t_c$  na Figura 2;
- $t_2 \leq t \leq \pi$  - o diodo está bloqueado e a carga recebe energia do capacitor.

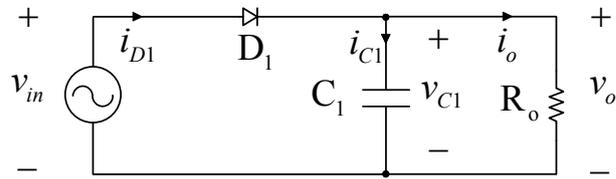


FIGURA 1 – Circuito do retificador monofásico de meia onda.

No semiciclo negativo da tensão da rede, ou seja, no tempo de  $\pi$  até  $2\pi$ , o diodo permanece bloqueado, e a carga recebe energia do capacitor.

A tensão máxima no capacitor de filtro é denominada de  $V_{C1max}$  e a tensão mínima de  $V_{C1min}$ . A corrente que circula pelo diodo é considerada, simplificada, com forma triangular e possui valor de pico denominado de  $I_{D1max}$ .

O intervalo no qual ocorre transferência de energia da rede para o capacitor, quando o diodo conduz, é denominado de tempo de condução ( $t_c$ ).

A corrente na carga é considerada contínua e sem ondulação, com valor constante  $I_o$ .

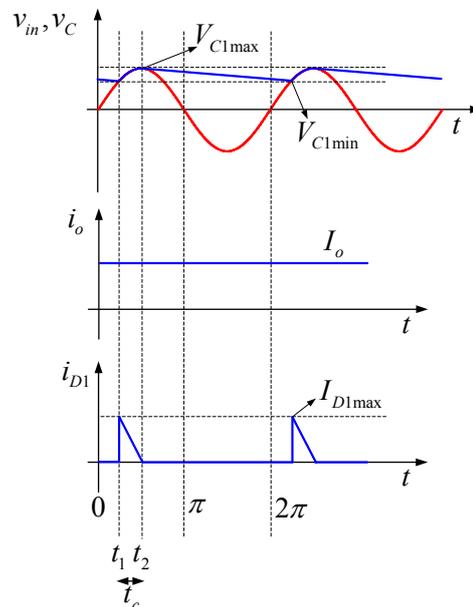


FIGURA 2 – Formas de onda para o retificador de meia onda.

### 2.2. Análise matemática do retificador

A análise simplificada apresentada neste trabalho é baseada em UNITRODE (1986) e Barbi (2005). Naqueles trabalhos, a forma de onda da

corrente foi considerada retangular, concluindo-se posteriormente que a mesma seria triangular.

Assim, neste trabalho, apresentar-se-á a análise considerando a forma de onda triangular, como será feito a seguir.

A energia transferida da rede para o capacitor durante o intervalo de condução do diodo ( $t_c = t_2 - t_1$ ) durante o semiciclo positivo da rede é dada por (1).

$$W_{in} \cong \frac{1}{2} \cdot C_1 \cdot (V_{C1max}^2 - V_{C1min}^2) \quad [1]$$

Já a energia transferida para a carga durante um ciclo da rede será dada por (2)

$$W_{in} = \frac{P_{in}}{f_r} \quad [2]$$

A frequência da rede de energia elétrica é denominada de  $f_r$ .

Igualando-se as expressões (1) e (2), obtém-se (3).

$$C_1 = 2 \cdot \frac{P_{in}}{f_r \cdot (V_{C1max}^2 - V_{C1min}^2)} \quad [3]$$

A tensão mínima no capacitor de filtro pode ser determinada pela expressão (4).

$$V_{C1min} = V_{C1max} \cdot \cos(2\pi \cdot f_r \cdot t_c) \quad [4]$$

Isolando-se  $t_c$ , obtém-se (5).

$$t_c = \frac{\arccos\left(\frac{V_{C1min}}{V_{C1max}}\right)}{2\pi \cdot f_r} \quad [5]$$

A tensão média, aproximada, na saída do retificador é dada por (6).

$$V_{omed} = V_{C1med} = \frac{V_{C1max} + V_{C1min}}{2} \quad [6]$$

O cálculo exato, considerando a integral da forma de onda de tensão no capacitor, leva a uma expressão mais complexa, com um erro de menos de 1% em relação ao valor aproximado. Assim, pode-se utilizar a expressão (6) sem acarretar em erro significativo.

A tensão máxima, desconsiderando a queda de tensão no diodo, será dada por (7).

$$V_{C1max} = \sqrt{2} \cdot V_{inef} \quad [7]$$

Considerando a ondulação de tensão sobre o capacitor (*ripple*), denominada de  $\Delta V_{C1}$ , se tem (8) e (9).

$$\Delta V_{C1} = \frac{\Delta\%}{100} \cdot V_{C1max} \quad [8]$$

$$V_{C1min} = V_{C1max} - \Delta V_{C1} \quad [9]$$

A ondulação de tensão ( $\Delta\%$ ) foi especificada como um percentual da tensão máxima (de pico) na rede.

A corrente na carga pode ser determinada por (10).

$$I_o = I_{omed} = I_{oef} = \frac{V_{omed}}{R_o} = \frac{V_{C1med}}{R_o} \quad [10]$$

A potência processada pelo circuito, desconsiderando as perdas nos seus elementos, será dada por (11).

$$P_{in} = P_o = V_{omed} \cdot I_o \quad [11]$$

De outro modo, a energia elétrica transferida da rede para o capacitor durante a condução do diodo é dada em (12).

$$\Delta Q = \frac{I_{D1max} \cdot t_c}{2} = C_1 \cdot \Delta V_{C1} \quad [12]$$

Por conseguinte, a corrente máxima pode ser obtida com (13).

$$I_{D1max} = \frac{2 \cdot C_1}{t_c} \cdot (V_{C1max} - V_{C1min}) \quad [13]$$

A corrente no diodo é dada por (14).

$$i_{D1} = i_{C1} + i_o \quad [14]$$

Além disso, o valor eficaz desta corrente será dado por (15).

$$I_{D1ef}^2 = I_{D1med}^2 + I_{D1caef}^2 \quad [15]$$

O valor eficaz da corrente no diodo ( $I_{D1ef}^2$ ) é composto pela soma quadrática de seu valor médio ( $I_{D1med}^2$ ) e do valor eficaz de sua parcela alternada ( $I_{D1caef}^2$ ).

Portanto, obtém-se (16).

$$I_{D1caef} = \sqrt{I_{D1ef}^2 - I_{D1med}^2} \quad [16]$$

Considerando uma forma de onda triangular para a corrente no diodo, seu valor instantâneo será obtido com (17).

$$i_{D1}(t) = I_{D1max} - \frac{I_{D1max}}{t_c} \cdot t \quad \text{para } t_1 \leq t \leq t_2 \quad [17]$$

O valor médio e o valor eficaz da corrente no diodo serão dados, respectivamente, por (18) e (19).

$$I_{D1med} = \frac{I_{D1max} \cdot t_c}{2 \cdot t_r} \quad [18]$$

$$I_{D1ef} = \frac{I_{D1max}}{3} \cdot \sqrt{3 \cdot \frac{t_c}{t_r}} \quad [19]$$

O período da tensão alternada senoidal da rede de energia elétrica é dado por (20).

$$t_r = \frac{1}{f_r} \quad [20]$$

A corrente eficaz no capacitor, considerando que a corrente de saída ( $i_o$ ) é contínua, será obtida com (21).

$$I_{Cef} = \frac{I_{D1max}}{6 \cdot t_r} \cdot \sqrt{3 \cdot t_c \cdot (4 \cdot t_r - 3 \cdot t_c)} \quad [21]$$

Finalmente, o fator de potência da estrutura será dado por (22), (23), (24) e (25).

$$I_{fef} = I_{D1ef} = \frac{I_{D1max}}{3} \cdot \sqrt{3 \cdot \frac{t_c}{t_r}} \quad [22]$$

$$P_f = P_{in} = P_o = V_{omed} \cdot I_o \quad [23]$$

$$S_f = V_{inef} \cdot I_{fef} \quad [24]$$

$$FP = \frac{P_f}{S_f} = \frac{V_{omed} \cdot I_o}{V_{inef} \cdot I_{fef}} \quad [25]$$

### 2.3. Exemplo numérico e resultado de simulação

Com o objetivo de comprovar a metodologia de análise do retificador de meia onda apresentada, será realizado um exemplo numérico, com as seguintes especificações:

- $V_{inef} = 219,91$  V;
- $P_o = 100$  W;
- $\Delta\% = 10\%$ ;
- $f_r = 50$  Hz.

Os valores calculados, simulados, e o erro comparativo do calculado com o simulado são apresentados na Tabela 1.

O erro ( $\varepsilon$ ) é calculado considerando o valor simulado ( $x_{sim}$ ) como o verdadeiro em relação ao valor calculado ( $x_{cal}$ ), assim, obtém-se (26).

$$\varepsilon = \frac{x_{cal} - x_{sim}}{x_{sim}} \cdot 100\% \quad [26]$$

O capacitor calculado foi mostrado em (27).

$$C_1 = 2,177 \cdot 10^{-4} F \quad [27]$$

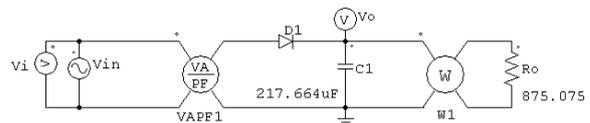
**Tabela 1 - Resultados calculados e simulados do retificador de meia onda.**

Variável	Calculado	Simulado	Erro(%)
$V_{C1max}$	311,00 V	311,00 V	0,00
$\Delta V_{C1}$	31,1 V	28,89 V	-7,66
$V_{C1min}$	279,9 V	282,08 V	0,77
$t_c$	1,436ms	1,434ms	0,3
$V_{C1med}$	295,45 V	298,06 V	0,88
$I_o$	0,338 A	0,339 A	0,28
$I_{D1max}$	9,43 A	9,26 A	-1,82
$I_{D1med}$	0,338 A	0,338 A	0,00
$I_{D1ef}$	1,459 A	1,454 A	-0,33
$I_{C1ef}$	1,419 A	1,414 A	-0,36
$P_o = P_f$	100 W	100,44 W	0,44
$S_f$	320,70 VA	319,85 VA	-0,29
FP	0,312	0,314	0,72

Pelos resultados apresentados, nota-se que o erro é significativo apenas na ondulação de tensão sobre o capacitor de filtro.

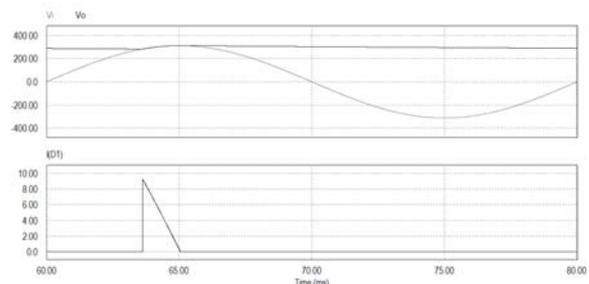
Neste caso, o erro cometido é no sentido conservativo, ou seja, para a ondulação de tensão no capacitor se tem na prática um valor menor, o que é desejável.

O circuito simulado no *software* de simulação numérica PSIM (<http://www.powersimtech.com>) está mostrado na Figura 3.



**FIGURA 3 – Circuito simulado.**

Os resultados de simulação são mostrados na Figura 4.



**FIGURA 4 – Resultados de simulação.**

O resistor de carga foi calculado por (28). O seu valor é fundamental para que os valores calculados e simulados sejam condizentes.

$$R_o = \frac{V_{omed}}{I_o} = 875,075 \Omega \quad [28]$$

### 3. RETIFICADOR MONOFÁSICO DE ONDA COMPLETA

O circuito do retificador monofásico de onda completa é mostrado na Figura 5. Este retificador consiste na utilização de uma ponte completa de diodos, formada por quatro diodos discretos ou por um módulo com os quatro diodos integrados. O capacitor de filtro da tensão de saída também é parte imprescindível do conversor.

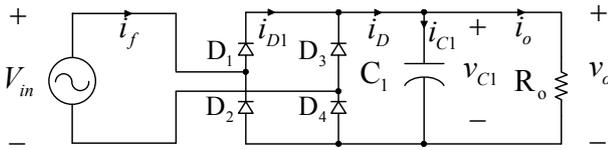


FIGURA 5 – Circuito do retificador monofásico de onda completa em ponte.

As principais formas de onda do retificador de meia onda são mostradas na Figura 6.

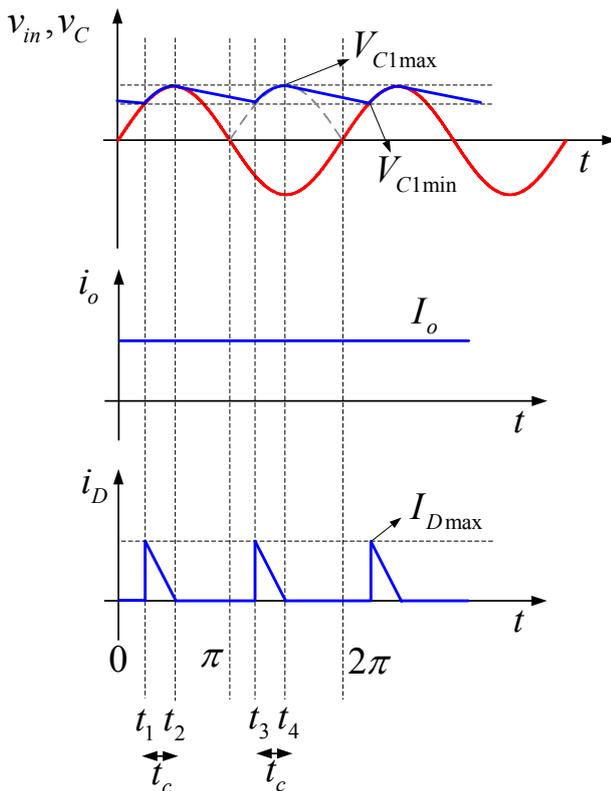


FIGURA 6 – Formas de onda para o retificador de onda completa em ponte.

Para este conversor, têm-se quatro etapas distintas de funcionamento, durante um período da tensão da rede:

- $0 \leq t \leq t_1$  - os diodos estão bloqueados e a carga recebe energia do capacitor;

- $t_1 \leq t \leq t_2$  - os diodos  $D_1$  e  $D_4$  estão conduzindo e o capacitor é carregado com a energia vinda da rede. Este intervalo é chamado de  $t_c$  na Figura 6;
- $t_2 \leq t \leq \pi$  - os diodos estão bloqueados e a carga recebe energia do capacitor;
- $\pi \leq t \leq t_3$  - os diodos estão bloqueados e a carga recebe energia do capacitor;
- $t_3 \leq t \leq t_4$  - os diodos  $D_2$  e  $D_3$  estão conduzindo e o capacitor é carregado com a energia vinda da rede. Este intervalo é chamado de  $t_c$  na Figura 6;
- $t_4 \leq t \leq 2\pi$  - os diodos estão bloqueados e a carga recebe energia do capacitor.

A tensão máxima no capacitor de filtro é denominada de  $V_{C1max}$ , e a tensão mínima de  $V_{C1min}$ . A corrente que circula pelos diodos é considerada, simplificada, com forma triangular e possui valor de pico denominado de  $I_{D1max}$ .

O intervalo no qual ocorre transferência de energia da rede para o capacitor, quando os diodos conduzem, é denominado de tempo de condução ( $t_c$ ).

A corrente na carga é considerada contínua e sem ondulação, com valor constante  $I_o$ .

#### 3.1. Análise matemática do retificador

A análise simplificada apresentada neste trabalho é baseada em UNITRODE (1986) e Barbi (2005). Naqueles trabalhos, a forma de onda da corrente foi considerada retangular, concluindo-se posteriormente que mesma seria triangular.

Assim, neste trabalho apresentar-se-á a análise considerando a forma de onda triangular, como será feito a seguir.

A energia transferida da rede para o capacitor durante o intervalo de condução dos diodos ( $t_c = t_2 - t_1$ ) durante cada semiciclo é dada por (29).

$$\frac{W_{in}}{2} \cong \frac{1}{2} \cdot C_1 \cdot (V_{C1max}^2 - V_{C1min}^2) \quad [29]$$

Já a energia transferida para a carga durante um ciclo da rede será dada por (30).

$$W_{in} = \frac{P_{in}}{f_r} \quad [30]$$

A frequência da rede de energia elétrica é denominada de  $f_r$ .

Igualando-se as expressões (29) e (30), obtém-se (31).

$$C_1 = \frac{P_{in}}{f_r \cdot (V_{C1max}^2 - V_{C1min}^2)} \quad [31]$$

A tensão mínima no capacitor de filtro pode ser determinada pela expressão (32).

$$V_{C1\min} = V_{C1\max} \cdot \cos(2\pi \cdot f_r \cdot t_c) \quad [32]$$

Isolando-se  $t_c$ , obtém-se (33).

$$t_c = \frac{\arccos\left(\frac{V_{C1\min}}{V_{C1\max}}\right)}{2\pi \cdot f_r} \quad [33]$$

A tensão média, aproximada, na saída do retificador é dada por (34).

$$V_{omed} = V_{C1med} = \frac{V_{C1\max} + V_{C1\min}}{2} \quad [34]$$

O cálculo exato, considerando a integral da forma de onda de tensão no capacitor, leva a uma expressão mais complexa, com um erro de menos de 1% em relação ao valor aproximado. Assim, pode-se utilizar a expressão (34) sem acarretar em erro significativo.

A tensão máxima, desconsiderando a queda de tensão nos diodos será dada por (35).

$$V_{C1\max} = \sqrt{2} \cdot V_{inef} \quad [35]$$

Considerando uma ondulação de tensão sobre o capacitor (*ripple*), denominada de  $\Delta V_{C1}$ , se tem (36) e (37).

$$\Delta V_{C1} = \frac{\Delta\%}{100} \cdot V_{C1\max} \quad [36]$$

$$V_{C1\min} = V_{C1\max} - \Delta V_{C1} \quad [37]$$

A ondulação de tensão ( $\Delta\%$ ) foi especificada como um percentual da tensão máxima (de pico) na rede.

A corrente na carga pode ser determinada por (38).

$$I_o = I_{omed} = I_{oef} = \frac{V_{omed}}{R_o} = \frac{V_{C1med}}{R_o} \quad [38]$$

A potência processada pelo circuito, desconsiderando as perdas nos seus elementos, será dada por (39).

$$P_{in} = P_o = V_{omed} \cdot I_o \quad [39]$$

De outro modo, a energia elétrica transferida da rede para o capacitor durante a condução dos diodos é dada pela expressão (40).

$$\Delta Q = \frac{I_{D\max} \cdot t_c}{2} = C_1 \cdot \Delta V_{C1} \quad [40]$$

Por conseguinte, a corrente máxima pode ser obtida com (41).

$$I_{D\max} = \frac{2 \cdot C_1}{t_c} \cdot (V_{C1\max} - V_{C1\min}) \quad [41]$$

A corrente na saída da ponte retificadora, ou seja, no conjunto de diodos, é dada por (42).

$$i_D = i_{C1} + i_o \quad [42]$$

Além disso, o valor eficaz desta corrente será dado por (43).

$$I_{Def}^2 = I_{Dmed}^2 + I_{Dcaef}^2 \quad [43]$$

O valor eficaz da corrente na saída da ponte retificadora ( $I_{Def}^2$ ) é composto pela soma quadrática de seu valor médio ( $I_{Dmed}^2$ ) e do valor eficaz de sua parcela alternada ( $I_{Dcaef}^2$ ). Portanto, obtém-se (44).

$$I_{Dcaef} = \sqrt{I_{Def}^2 - I_{Dmed}^2} \quad [44]$$

Considerando uma forma de onda triangular para a corrente nos diodos, seu valor instantâneo será dado por (45).

$$i_D(t) = I_{D\max} - \frac{I_{D\max}}{t_c} \cdot t \quad \text{para } t_1 \leq t \leq t_2 \quad [45]$$

O valor médio e o valor eficaz da corrente na saída da ponte retificadora serão dados, respectivamente, por (46) e (47).

$$I_{Dmed} = \frac{I_{D\max} \cdot t_c}{t_r} \quad [46]$$

$$I_{Def} = \frac{I_{D\max}}{3} \cdot \sqrt{6 \cdot \frac{t_c}{t_r}} \quad [47]$$

O período da tensão alternada senoidal da rede de energia elétrica é dado por (48).

$$t_r = \frac{1}{f_r} \quad [48]$$

A corrente eficaz no capacitor, considerando que a corrente de saída ( $i_o$ ) é contínua, será dada por (49).

$$I_{Cef} = \frac{I_{D\max}}{3 \cdot t_r} \sqrt{3 \cdot t_c \cdot (2 \cdot t_r - 3 \cdot t_c)} \quad [49]$$

Por sua vez, a corrente média nos diodos será a metade da corrente média da saída da ponte retificadora, resultando em (50).

$$I_{D1med} = \frac{1}{2} \cdot \frac{I_{D\max} \cdot t_c}{t_r} \quad [50]$$

Já a corrente eficaz em cada diodo será dada por (51).

$$I_{D1ef} = \frac{I_{Dmax}}{3} \cdot \sqrt{3 \cdot \frac{t_c}{t_r}} \quad [51]$$

Finalmente, o fator de potência da estrutura será dada por (52), (53), (54) e (55).

$$I_{fef} = I_{Def} = \frac{I_{Dmax}}{3} \cdot \sqrt{6 \cdot \frac{t_c}{t_r}} \quad [52]$$

$$P_f = P_{in} = P_o = V_{omed} \cdot I_o \quad [53]$$

$$S_f = V_{inef} \cdot I_{fef} \quad [54]$$

$$FP = \frac{P_f}{S_f} = \frac{V_{omed} \cdot I_o}{V_{inef} \cdot I_{fef}} \quad [55]$$

### 3.2. Exemplo numérico e resultados de simulação

Com o objetivo de comprovar a metodologia de análise do retificador de onda completa em ponte apresentada, será realizado um exemplo numérico, com as seguintes especificações:

- $V_{inef} = 219,91 \text{ V}$ ;
- $P_o = 100 \text{ W}$ ;
- $\Delta\% = 10\%$ ;
- $f_r = 50 \text{ Hz}$ .

Os valores calculados, simulados, e o erro comparativo do calculado com o simulado são apresentados na Tabela 2.

O erro ( $\varepsilon$ ) é calculado considerando o valor simulado ( $x_{sim}$ ) como o verdadeiro em relação ao valor calculado ( $x_{cal}$ ), assim, obtém-se (56).

$$\varepsilon = \frac{x_{cal} - x_{sim}}{x_{sim}} \cdot 100\% \quad [56]$$

O capacitor calculado está mostrado em (57).

$$C_1 = 1,088 \cdot 10^{-4} \text{ F} \quad [57]$$

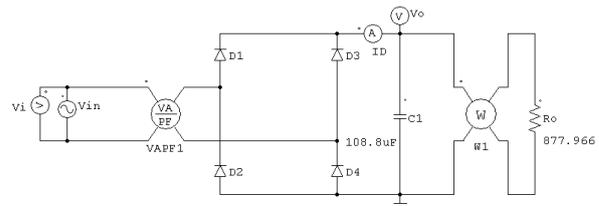
Pelos resultados apresentados, nota-se que o erro é significativo na ondulação de tensão sobre o capacitor de filtro e no fator de potência da estrutura.

Em ambos os casos, o erro cometido é no sentido conservativo, ou seja, para a ondulação de tensão no capacitor se tem na prática um valor menor, o que é desejável. Já para o fator de potência, o valor obtido na prática é maior do que o valor calculado, o que também é desejável.

**Tabela 2 - Resultados calculados e simulados do retificador de onda completa em ponte.**

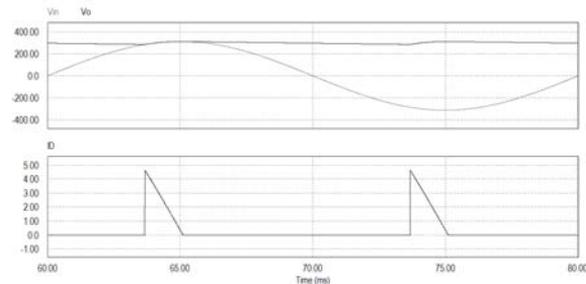
Variável	Calculado	Simulado	Erro(%)
$V_{C1max}$	311,00 V	311,00 V	0,00
$\Delta V_{C1}$	31,1 V	26,81 V	-16,00
$V_{C1min}$	279,9 V	284,27 V	1,54
$t_c$	1,436ms	1,442ms	0,45
$V_{C1med}$	295,45 V	298,06 V	0,88
$I_o$	0,338 A	0,339 A	0,55
$I_{Dmax}$	4,71 A	4,63 A	-1,81
$I_{Dmed}$	0,338 A	0,339 A	0,55
$I_{Def}$	1,031 A	1,032 A	0,03
$I_{C1ef}$	0,974 A	0,973 A	-0,14
$I_{D1med}$	0,169 A	0,1694 A	0,16
$I_{D1ef}$	0,729 A	0,727 A	-0,25
$P_o = P_f$	100 W	101,26 W	1,24
$S_f$	226,83 VA	227,23 VA	0,17
FP	0,441	0,468	5,8

O circuito simulado no *software* de simulação numérica PSIM (<http://www.powersimtech.com>) está mostrado na Figura 7.



**FIGURA 7 – Circuito simulado.**

Os resultados de simulação são mostrados na Figura 8.



**FIGURA 8 – Resultados de simulação.**

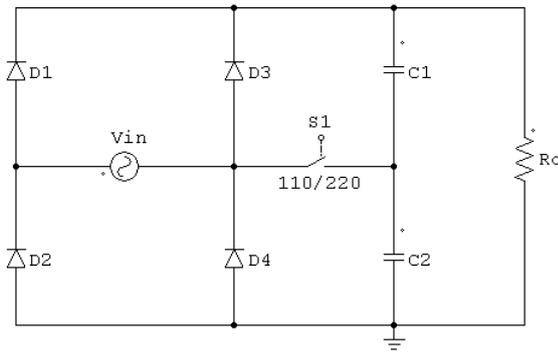
O resistor de carga foi calculado pela Equação (58). O seu valor é fundamental para que os valores calculados e simulados sejam condizentes.

$$R_o = \frac{V_{omed}}{I_o} = 877,966 \Omega \quad [58]$$

### 4. RETIFICADOR MONOFÁSICO PONTE COMPLETA DOBRADOR DE TENSÃO

O retificador monofásico ponte completa dobrador de tensão é utilizado frequentemente em equipamentos que operam com duas tensões de

alimentação, ou seja, bivolt. O circuito deste retificador é mostrado na Figura 9.



**FIGURA 9 – Circuito do retificador monofásico de onda completa dobrador de tensão.**

A chave  $S_1$  tem a finalidade de fazer a seleção da tensão de entrada, com duas condições:

- $S_1$  aberta – operação em 220 V e retificação em onda completa;
- $S_1$  fechada – operação em 110 V e retificação em meia onda.

Nota-se então que este retificador tem dois modos distintos de operação quando operando em 110 ou em 220 V. Assim, o projeto deste conversor deve ser feito no pior caso de operação, qual seja:

- operação em 110 V, isto é, na menor tensão, onde se terão as maiores correntes na entrada para a mesma potência de saída;
- funcionamento como retificador de meia onda, o que levará ao projeto dos capacitores com maior valor.

Maiores detalhes do funcionamento deste retificador podem ser obtidos em Barbi (2005).

Com a universalização de fontes chaveadas de baixa potência alimentando os circuitos eletrônicos, a preferência por tensão universal de operação tem predominado sobre o uso de fontes bivolt. Assim, o circuito retificador de onda completa em ponte é o que tem sido largamente empregado nestas fontes de alimentação, levando ao desuso do retificador dobrador de tensão

## 5. PROJETO COM TENSÃO DE ENTRADA VARIÁVEL

Ao se realizar um projeto onde a tensão de entrada é variável, o que é comum em projetos práticos, deve-se considerar as piores situações.

Assim, para determinar o capacitor e as correntes dos elementos, deve-se considerar a menor tensão, pois nessa situação se terão as

maiores correntes nos elementos, e a ondulação será crítica.

Já para a escolha da tensão nominal do capacitor e da tensão reversa dos diodos, deve-se considerar a maior tensão e no seu valor de pico.

## 6. CORRENTE DE PARTIDA EM CIRCUITOS RETIFICADORES COM FILTRO CAPACITIVO

Ao se ligar um circuito retificador com filtro capacitivo, a corrente de partida tende a assumir valores elevados e que podem ser destrutivos aos componentes do circuito, principalmente os diodos semicondutores.

Esta corrente de partida do circuito é devida ao fato de o capacitor de filtro estar descarregado e se comportar como um curto-circuito ao se ligar a fonte.

A pior situação ocorre ao se ligar uma fonte na maior tensão da rede e justamente no seu pico. Assim, a corrente de partida teórica seria infinita. Os limitantes da amplitude desta corrente são as resistências e indutâncias parasitas da rede de energia elétrica, transformadores, fusíveis, disjuntores e chaves que estão em série até a tomada de energia elétrica na qual a fonte está conectada.

Deve-se então considerar a utilização de uma resistência em série com o circuito para a partida do mesmo. Esta resistência é calculada por (59).

$$R_s = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{inmax}}{I_{Dmax}} \quad [59]$$

Onde a corrente  $I_{Dmax}$  é a corrente máxima não repetitiva do diodo escolhido. Por exemplo, para os diodos da série 1N400x, a corrente média é 1 A e a corrente máxima não repetitiva é 30 A. Nesta situação, considerando uma rede com tensão de 220 V  $\pm 20\%$ , se teria a resistência calculada por (60).

$$R_s = \frac{\sqrt{2} \cdot (220 + 20\%)}{30} = 12,44 \Omega \quad [60]$$

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo apresentou-se uma metodologia para o projeto de retificadores com filtro capacitivo. O equacionamento realizado é simplificado, considerando a corrente nos diodos com forma de onda triangular. No entanto, os resultados obtidos comprovam que o erro entre os valores calculados e os valores extraídos de simulação numérica é pequeno, corroborando a metodologia utilizada e tornando-a atrativa para projeto de conversores desta natureza.

A metodologia aqui apresentada pode ser empregada para conversores lineares ou chaveados, empregando ou não transformador na entrada. No

caso da utilização de transformadores de baixa frequência, o que ocorre em fontes lineares, a especificação de sua potência aparente é algo complicado e normalmente inexplorado na literatura convencional de eletrônica.

Assim, além da contribuição com uma nova metodologia de projeto de retificadores, simples e com pequeno erro, apresentou-se também o cálculo da corrente eficaz e potência aparente do transformador, além do fator de potência da estrutura, o que é muito importante na ocasião do projeto e escolha dos componentes do conversor.

#### ***Agradecimentos***

O autor gostaria de agradecer aos alunos dos cursos do DAELN pela revisão e sugestões de melhorias no artigo.

#### **REFERÊNCIAS**

BARBI, I. **Eletrônica de potência**. Florianópolis: Edição do Autor. 2005.

\_\_\_\_\_. **Projeto de Fontes Chaveadas**. 2ª ed. Revisada, Florianópolis, 2006.

PRESSMAN, A. I. **Switching Power Supply Design**. New York: McGraw Hill, 1998.

UNITRODE. **Line Input AC to DC Conversion and Input Filter Capacitor Selection**. Power Supply Seminar, Unitrode Switching Regulated Power Supply Design Seminar Manual, Texas, EUA. 1986.