

9

Capítulo

objetivos

Retificadores Monofásicos com Filtro Capacitivo

Meta deste capítulo

Estudar os conversores ca-cc monofásicos operando com filtro capacitivo.

- Entender o funcionamento de circuitos retificadores;
- Realizar cálculos com conversores ca-cc;
- Simular conversores ca-cc;
- Implementar retificadores monofásicos.

Pré-requisitos

Ter estudado o capítulo sobre retificadores monofásicos de onda completa com carga resistiva-indutiva.

Continuidade

O curso continuará com o estudo de circuitos retificadores monofásicos controlados.

Prof. Clóvis Antônio Petry.

Florianópolis, setembro de 2013.

1 Introdução

Nos capítulos anteriores foram estudados os retificadores monofásicos de meia onda e de onda completa, com carga resistiva pura ou com carga mista, isto é, com resistência e indutância. Estes retificadores entregam à carga uma forma de onda senoidal retificada, que ainda não é contínua, apesar de possuir valor médio.

Neste capítulo serão estudados os mesmos retificadores mas com a inserção de um filtro capacitivo, visando tornar a tensão de saída próxima de contínua pura. Em consequência, o funcionamento dos circuitos será bem diferente do anteriormente estudado, afetando também o formato das correntes no circuito e do fator de potência das estruturas.

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 ou em fontes chaveadas.

Estes circuitos retificadores, genericamente denominados de conversores de 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 e 2006).

Uma alternativa para evitar a análise dispendiosa dos circuitos dos retificadores é utilizar os simuladores de circuitos eletrônicos, obtendo 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 capítulo se pretende apresentar uma metodologia simples e com bons resultados para circuitos retificadores monofásicos. Este capítulo 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.

Assim, neste capítulo será realizada a análise dos retificadores de meia onda e onda completa com filtro capacitivo, operando com carga resistiva. Serão apresentados resultados de simulação, exercícios resolvidos e propostos e roteiro de laboratório.

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 três etapas distintas de funcionamento, durante o semiciclo positivo da tensão da rede:

- 1^a Etapa – $0 \leq t \leq t_1$ – O diodo está bloqueado e a carga recebe energia do capacitor;
- 2^a Etapa – $t_1 \leq t \leq t_2$ – 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;
- 3^a Etapa – $t_2 \leq t \leq \pi$ – O diodo está bloqueado e a carga recebe energia do capacitor.

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

A tensão máxima no capacitor de filtro é denominada de $V_{Cl(max)}$ e a tensão mínima de $V_{Cl(min)}$. A corrente que circula pelo diodo é considerada, simplificadamente, com forma triangular e possui valor de pico denominado de $I_{Dl(max)}$.

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 .

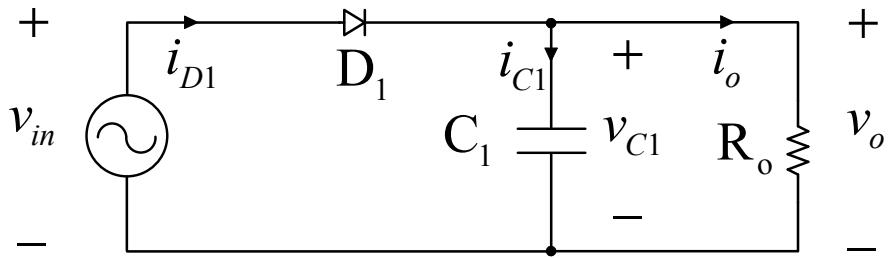


Figura 1 – Circuito do retificador monofásico de meia onda.

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 capítulo 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:

$$W_{in} \equiv \frac{1}{2} \cdot C_1 \cdot \left(V_{Cl(max)}^2 - V_{Cl(min)}^2 \right) \quad (1)$$

Já a energia transferida para a carga durante um ciclo da rede será:

$$W_{in} = \frac{P_{in}}{f_r} \quad (2)$$

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

Igualando-se as expressões (1) e (2):

$$C_1 = 2 \cdot \frac{P_{in}}{f_r \cdot \left(V_{Cl(max)}^2 - V_{Cl(min)}^2 \right)} \quad (3)$$

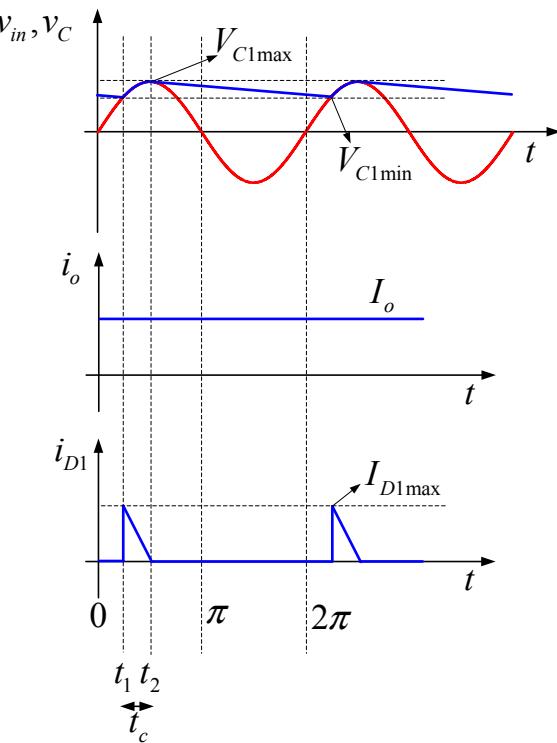


Figura 2 – Principais formas de onda para o retificador de meia onda com filtro capacitivo.

A tensão mínima no capacitor de filtro pode ser determinada pela expressão a seguir:

$$V_{C1(\min)} = V_{C1(\max)} \cdot \cos(2\pi \cdot f_r \cdot t_c) \quad (4)$$

Portanto:

$$t_c = \frac{\arccos\left(\frac{V_{C1(\min)}}{V_{C1(\max)}}\right)}{2\pi \cdot f_r} \quad (5)$$

A tensão média, aproximada, na saída do retificador é:

$$V_{o(med)} = V_{C1(med)} = \frac{V_{C1(\max)} + V_{C1(\min)}}{2} \quad (6)$$

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:

$$V_{C1(\max)} = \sqrt{2} \cdot V_{in(ef)} \quad (7)$$

Considerando a ondulação de tensão sobre o capacitor (*ripple*), denominada de ΔV_{C1} , se tem:

$$\Delta V_{C1} = \frac{\Delta \%}{100} \cdot V_{C1(\max)} \quad (8)$$

$$V_{C1(\min)} = V_{C1(\max)} - \Delta V_{C1} \quad (9)$$

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:

$$I_o = I_{o(\text{med})} = I_{o(\text{ef})} = \frac{V_{o(\text{med})}}{R_o} = \frac{V_{C1(\text{med})}}{R_o} \quad (10)$$

A potência processada pelo circuito, desconsiderando as perdas nos seus elementos, será:

$$P_{in} = P_o = V_{o(\text{med})} \cdot I_o \quad (11)$$

De outro modo, a energia elétrica transferida da rede para o capacitor durante a condução do diodo é dada a seguir:

$$\Delta Q = \frac{I_{D1(\max)} \cdot t_c}{2} = C_1 \cdot \Delta V_{C1} \quad (12)$$

Em conseguinte, a corrente máxima pode ser obtida como:

$$I_{D1(\max)} = \frac{2 \cdot C_1}{t_c} \cdot (V_{C1(\max)} - V_{C1(\min)}) \quad (13)$$

A corrente no diodo é dada por:

$$i_{D1} = i_{C1} + i_o \quad (14)$$

Além disso, o valor eficaz desta corrente será:

$$I_{D1(\text{ef})}^2 = I_{D1(\text{med})}^2 + I_{D1(\text{caef})}^2 \quad (15)$$

O valor eficaz da corrente no diodo ($I_{D1(\text{ef})}^2$) é composto pela soma quadrática de seu valor médio ($I_{D1(\text{med})}^2$) e do valor eficaz de sua parcela alternada ($I_{D1(\text{caef})}^2$).

Portanto:

$$I_{D1(\text{caef})} = \sqrt{I_{D1(\text{ef})}^2 - I_{D1(\text{med})}^2} \quad (16)$$

Considerando uma forma de onda triangular para a corrente no diodo, seu valor instantâneo será:

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

O valor médio e o valor eficaz da corrente no diodo serão respectivamente:

$$I_{D1(\text{med})} = \frac{I_{D1(\max)} \cdot t_c}{2 \cdot t_r} \quad (18)$$

$$I_{D1(\text{ef})} = \frac{I_{D1(\max)}}{3} \cdot \sqrt{3 \cdot \frac{t_c}{t_r}} \quad (19)$$

O período da tensão alternada senoidal da rede de energia elétrica é dado por:

$$t_r = \frac{1}{f_r} \quad (20)$$

A corrente eficaz no capacitor, considerando que a corrente de saída (i_o) é contínua, será:

$$I_{C(\text{ef})} = \frac{I_{D1(\max)}}{6 \cdot t_r} \cdot \sqrt{3 \cdot t_c \cdot (4 \cdot t_r - 3 \cdot t_c)} \quad (21)$$

Finalmente, o fator de potência da estrutura será:

$$I_{f(\text{ef})} = I_{D1(\text{ef})} = \frac{I_{D1(\max)}}{3} \cdot \sqrt{3 \cdot \frac{t_c}{t_r}} \quad (22)$$

$$P_f = P_{in} = P_o = V_{o(\text{med})} \cdot I_o \quad (23)$$

$$S_f = V_{in(\text{ef})} \cdot I_{f(\text{ef})} \quad (24)$$

$$FP = \frac{P_f}{S_f} = \frac{V_{o(\text{med})} \cdot I_o}{V_{in(\text{ef})} \cdot I_{f(\text{ef})}} \quad (25)$$

3 Retificador Monofásico de Onda Completa

3.1 Apresentação do Conversor

O circuito do retificador monofásico de onda completa é mostrado na Figura 3. Este retificador consiste na utilização de uma ponte completa de diodos, formada por 4 diodos discretos

ou por um módulo com os 4 diodos integrados. O capacitor de filtro da tensão de saída também é parte imprescindível do conversor.

As principais formas de onda do retificador de meia onda são mostradas na Figura 4. Para este conversor têm-se seis etapas distintas de funcionamento, durante um período da tensão da rede:

1^a Etapa – $0 \leq t \leq t_1$ – Os diodos estão bloqueados e a carga recebe energia do capacitor;

2^a Etapa – $t_1 \leq t \leq t_2$ – 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 4;

3^a Etapa – $t_2 \leq t \leq \pi$ – Os diodos estão bloqueados e a carga recebe energia do capacitor;

4^a Etapa – $\pi \leq t \leq t_3$ – Os diodos estão bloqueados e a carga recebe energia do capacitor;

5^a Etapa – $t_3 \leq t \leq t_4$ – 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 4;

6^a Etapa – $t_4 \leq t \leq 2\pi$ – Os diodos estão bloqueados e a carga recebe energia do capacitor.

A tensão máxima no capacitor de filtro é denominada de $V_{C1(max)}$ e a tensão mínima de $V_{C1(min)}$. A corrente que circula pelos diodos é considerada, simplificadamente, com forma triangular e possui valor de pico denominado de $I_{DI(max)}$.

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 .

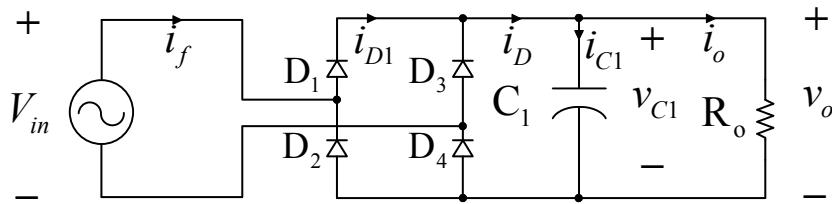


Figura 3 – Circuito do retificador monofásico de onda completa em ponte.

3.2 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 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:

$$\frac{W_{in}}{2} \equiv \frac{1}{2} \cdot C_1 \cdot \left(V_{C1(\max)}^2 - V_{C1(\min)}^2 \right) \quad (26)$$

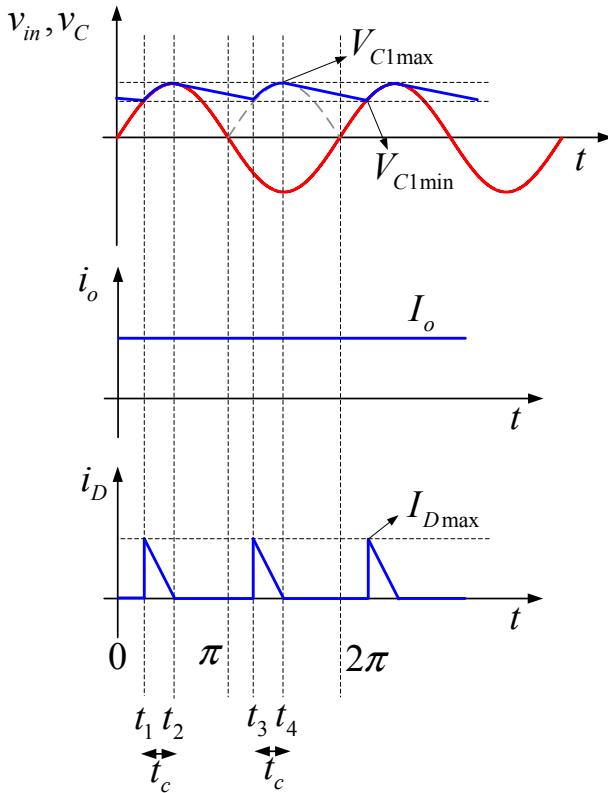


Figura 4 – Principais formas de onda para o retificador de onda completa com filtro capacitivo.

Já a energia transferida para a carga durante um ciclo da rede será:

$$W_{in} = \frac{P_{in}}{f_r} \quad (27)$$

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

Igualando-se as expressões (26) e (27):

$$C_1 = \frac{P_{in}}{f_r \cdot \left(V_{C1(\max)}^2 - V_{C1(\min)}^2 \right)} \quad (28)$$

A tensão mínima no capacitor de filtro pode ser determinada pela expressão a seguir:

$$V_{C1(\min)} = V_{C1(\max)} \cdot \cos(2\pi \cdot f_r \cdot t_c) \quad (29)$$

Portanto:

$$t_c = \frac{\arccos\left(\frac{V_{C1(\min)}}{V_{C1(\max)}}\right)}{2\pi \cdot f_r} \quad (30)$$

A tensão média, aproximada, na saída do retificador é:

$$V_{o(med)} = V_{C1(med)} = \frac{V_{C1(\max)} + V_{C1(\min)}}{2} \quad (31)$$

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 (31) sem acarretar em erro significativo.

A tensão máxima, desconsiderando a queda de tensão nos diodos será:

$$V_{C1(\max)} = \sqrt{2} \cdot V_{in(ef)} \quad (32)$$

Considerando uma ondulação de tensão sobre o capacitor (*ripple*), denominada de ΔV_{C1} , se tem:

$$\Delta V_{C1} = \frac{\Delta \%}{100} \cdot V_{C1(\max)} \quad (33)$$

$$V_{C1(\min)} = V_{C1(\max)} - \Delta V_{C1} \quad (34)$$

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:

$$I_o = I_{o(med)} = I_{o(ef)} = \frac{V_{o(med)}}{R_o} = \frac{V_{C1(med)}}{R_o} \quad (35)$$

A potência processada pelo circuito, desconsiderando as perdas nos seus elementos, será:

$$P_{in} = P_o = V_{o(med)} \cdot I_o \quad (36)$$

De outro modo, a energia elétrica transferida da rede para o capacitor durante a condução dos diodos é dada a seguir:

$$\Delta Q = \frac{I_{D(\max)} \cdot t_c}{2} = C_1 \cdot \Delta V_{C1} \quad (37)$$

Em conseguinte, a corrente máxima pode ser obtida como:

$$I_{D(\max)} = \frac{2 \cdot C_1}{t_c} \cdot (V_{C1(\max)} - V_{C1(\min)}) \quad (38)$$

A corrente na saída da ponte retificadora, ou seja, no conjunto de diodos, é dada por:

$$i_D = i_{C1} + i_o \quad (39)$$

Além disso, o valor eficaz desta corrente será:

$$I_{D(\text{ef})}^2 = I_{D(\text{med})}^2 + I_{D(\text{caef})}^2 \quad (40)$$

O valor eficaz da corrente na saída da ponte retificadora ($I_{D(\text{ef})}^2$) é composto pela soma quadrática de seu valor médio ($I_{D(\text{med})}^2$) e do valor eficaz de sua parcela alternada ($I_{D(\text{caef})}^2$).

Portanto:

$$I_{D(\text{caef})} = \sqrt{I_{D(\text{ef})}^2 - I_{D(\text{med})}^2} \quad (41)$$

Considerando uma forma de onda triangular para a corrente nos diodos, seu valor instantâneo será:

$$i_D(t) = I_{D(\max)} - \frac{I_{D(\max)}}{t_c} \cdot t \quad \text{para } t_1 \leq t \leq t_2 \quad (42)$$

O valor médio e o valor eficaz da corrente na saída da ponte retificadora serão respectivamente:

$$I_{D(\text{med})} = \frac{I_{D(\max)} \cdot t_c}{t_r} \quad (43)$$

$$I_{D(\text{ef})} = \frac{I_{D(\max)}}{3} \cdot \sqrt{6 \cdot \frac{t_c}{t_r}} \quad (44)$$

O período da tensão alternada senoidal da rede de energia elétrica é dado por:

$$t_r = \frac{1}{f_r} \quad (45)$$

A corrente eficaz no capacitor, considerando que a corrente de saída (i_o) é contínua, será:

$$I_{C(\text{ef})} = \frac{I_{D(\text{max})}}{3 \cdot t_r} \sqrt{3 \cdot t_c \cdot (2 \cdot t_r - 3 \cdot t_c)} \quad (46)$$

Por sua vez, a corrente média nos diodos será a metade da corrente média da saída da ponte retificadora:

$$I_{D(\text{med})} = \frac{1}{2} \cdot \frac{I_{D(\text{max})} \cdot t_c}{t_r} \quad (47)$$

Já a corrente eficaz em cada diodo será:

$$I_{D(\text{ef})} = \frac{I_{D(\text{max})}}{3} \cdot \sqrt{3 \cdot \frac{t_c}{t_r}} \quad (48)$$

Finalmente, o fator de potência da estrutura será:

$$I_{f(\text{ef})} = I_{D(\text{ef})} = \frac{I_{D(\text{max})}}{3} \cdot \sqrt{6 \cdot \frac{t_c}{t_r}} \quad (49)$$

$$P_f = P_{in} = P_o = V_{o(\text{med})} \cdot I_o \quad (50)$$

$$S_f = V_{in(\text{ef})} \cdot I_{f(\text{ef})} \quad (51)$$

$$FP = \frac{P_f}{S_f} = \frac{V_{o(\text{med})} \cdot I_o}{V_{in(\text{ef})} \cdot I_{f(\text{ef})}} \quad (52)$$

4 Retificador Monofásico 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, bi-volt. O circuito deste retificador é mostrado na figura 9.

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 terá 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 bi-volt. 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.

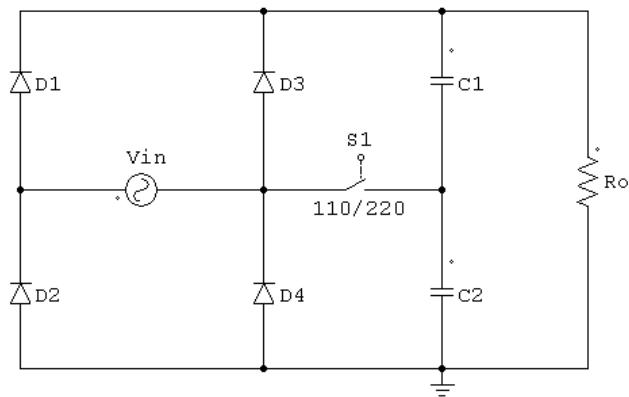


Figura 5 – Circuito do retificador ponte completa dobrador de tensão.

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

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 do capacitor de filtro estar descarregado e se comportar como um curto-círcito 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:

$$R_s = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{in(max)}}{I_{D(max)}} \quad (53)$$

Onde a corrente $I_{D(max)}$ 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:

$$R_s = \frac{\sqrt{2} \cdot (220 + 20\%)}{30} = 12,44 \Omega \quad (54)$$

7 Simulação dos Retificadores em Estudo

Os retificadores monofásicos de meia onda e de onda completa com filtro capacitivo serão simulados com o *software* PSIM. As simulações realizadas serão com componentes ideiais, visando confrontar os resultados teóricos com os obtidos pelo simulador de circuitos eletrônicos. Inicialmente realiza-se a simulação do retificador de meia onda, e a seguir do retificador de onda completa.

7.1 Simulação do Retificador de Meia Onda com Filtro Capacitivo

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

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

Os valores calculados, simulados e o erro comparativo do calculado com o simulado, são

apresentados na Tabela 1.

O erro (ε) é calculado considerando o valor simulado (x_{sim}) como o verdadeiro em relação ao valor calculado (x_{cal}), assim:

$$\varepsilon = \frac{x_{cal} - x_{sim}}{x_{sim}} \cdot 100\% \quad (55)$$

O capacitor calculado foi:

$$C_1 = 2,177 \cdot 10^{-4} F \quad (56)$$

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
Δ_{VC1}	31,1 V	28,89 V	-7,66
V_{C1min}	279,9 V	282,08 V	0,77
t_c	1,436 ms	1,434 ms	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 (www.powersimtech.com) está mostrado na figura 3. Os resultados de simulação são mostrados na figura 4.

O resistor de carga foi calculado pela expressão a seguir. O seu valor é fundamental para que os valores calculados e simulados sejam condizentes.

$$R_o = \frac{V_{omed}}{I_o} = 875,075 \Omega \quad (57)$$

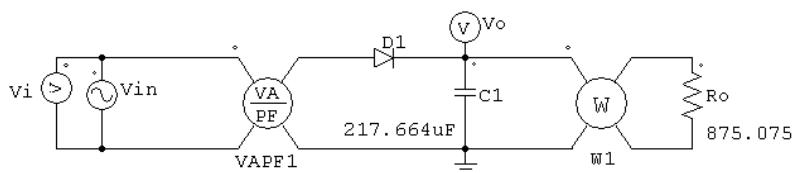


Figura 6 – Circuito simulado.

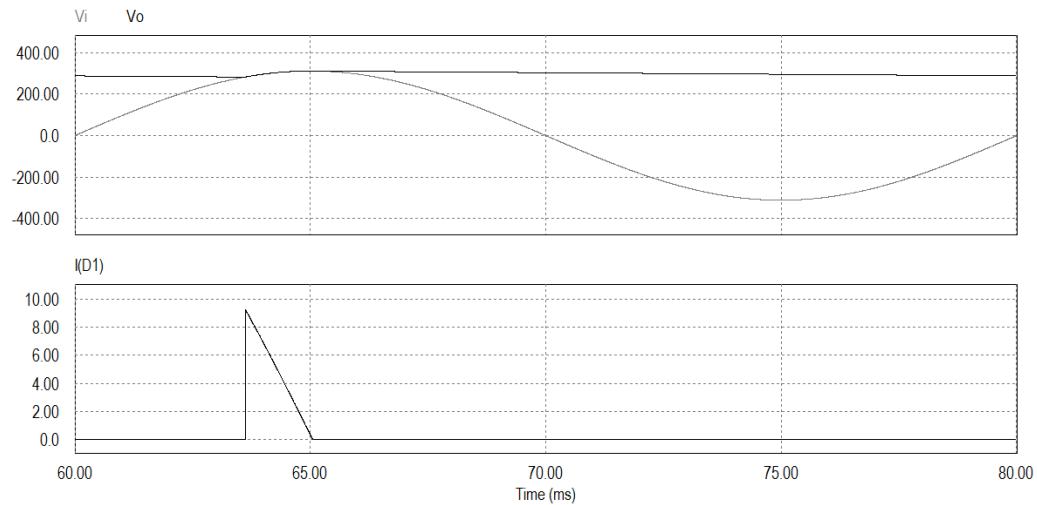


Figura 7 – Principais formas de onda obtidas por simulação.

7.2 Simulação do Retificador de Onda Completa com Filtro Capacitivo

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

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

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

O erro (ε) é calculado considerando o valor simulado (x_{sim}) como o verdadeiro em relação ao valor calculado (x_{cal}), assim:

$$\varepsilon = \frac{x_{cal} - x_{sim}}{x_{sim}} \cdot 100\% \quad (58)$$

O capacitor calculado foi:

$$C_1 = 1,088 \cdot 10^{-4} \text{ F} \quad (59)$$

Tabela 2 – Resultados calculados e simulados do retificador ponte completa.

Variável	Calculado	Simulado	Erro(%)
$V_{C1\max}$	311,00 V	311,00 V	0,00
Δ_{VC1}	31,1 V	26,81 V	-16,00
$V_{C1\min}$	279,9 V	284,27 V	1,54
t_c	1,436 ms	1,442 ms	0,45
$V_{C1\text{med}}$	295,45 V	298,06 V	0,88
I_o	0,338 A	0,339 A	0,55
$I_{D\max}$	4,71 A	4,63 A	-1,81
$I_{D\text{med}}$	0,338 A	0,339 A	0,55
$I_{D\text{ef}}$	1,031 A	1,032 A	0,03
$I_{C1\text{ef}}$	0,974 A	0,973 A	-0,14
$I_{D1\text{med}}$	0,169 A	0,1694	0,16
$I_{D\text{1ef}}$	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

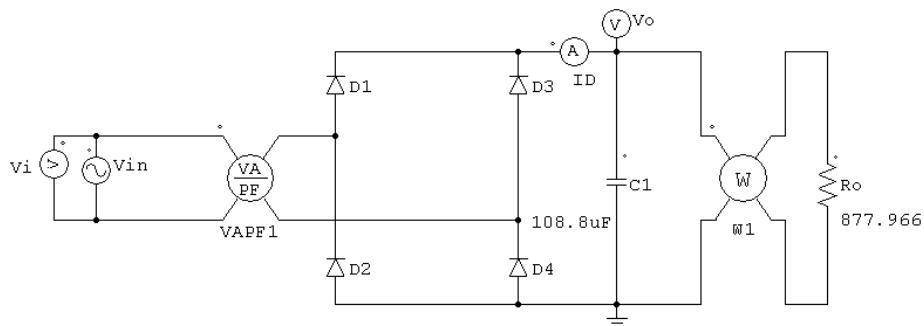


Figura 8 – Circuito simulado.

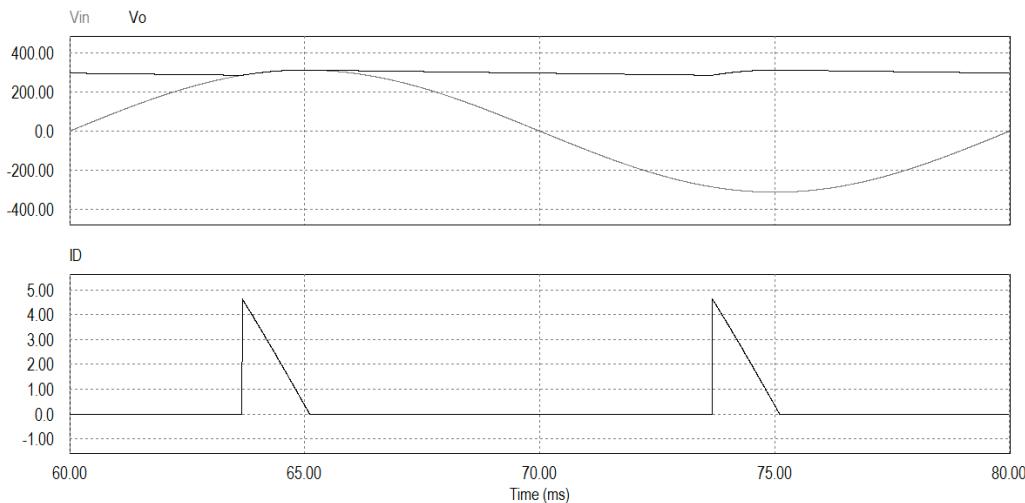


Figura 9 – Principais formas de onda obtidas por simulação.

8 Exercícios

Exercícios Resolvidos

ER 01) Considerando o circuito da Figura 10 e que a fonte de alimentação seja de 12 V (eficazes) e frequência de 60 Hz, os diodos são ideais e a carga tem resistência de 5Ω , o capacitor tem $1.000 \mu\text{F}$ de capacidade, determine:

- As tensões máxima, mínima e máxima na carga;
- A potência média na carga.

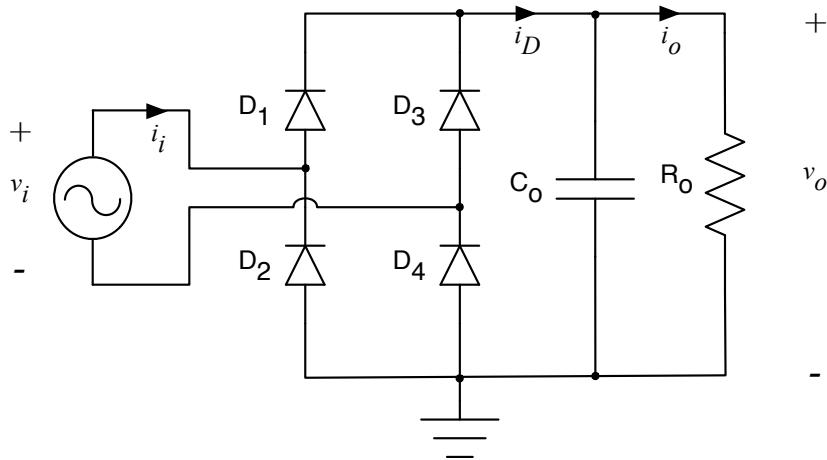


Figura 10 – Circuito para exercício resolvido 01.

A tensão máxima na carga será:

$$V_{Co(\max)} = V_{o(\max)} = V_{o(pk)} = V_{i(pk)} = V_{pk} = \sqrt{2} \cdot 12 = 16,97 \text{ V}.$$

Usando-se a expressão a seguir, pode-se obter a tensão mínima:

$$C_1 = \frac{P_{in}}{f_r \cdot \left(V_{Co(\max)}^2 - V_{Co(\min)}^2 \right)};$$

$$V_{Co(\min)} = \sqrt{V_{Co(\max)}^2 - \frac{P_{in}}{f_r \cdot C_1}};$$

Para que o resultado da raiz quadrada seja positivo será necessário:

$$V_{Co(\max)}^2 > \frac{P_{in}}{f_r \cdot C_1};$$

$$P_{in} < f_r \cdot C_1 \cdot V_{Co(\max)}^2;$$

$$P_{in} < 60 \cdot 1.000\mu \cdot 16,97^2 ;$$

$$P_{in} < 17,28W .$$

E como os componentes são ideais:

$$P_o = P_{in} \cdot \eta = 17,28 \cdot 1 = 17,28W .$$

A tensão mínima será obtida por:

$$P_o = \frac{V_{o(\max)} + V_{o(\min)}}{2} ;$$

$$V_{o(\min)} = 2 \cdot P_o - V_{o(\max)} = 2 \cdot 17,28 - 16,97 = 17,59V .$$

Note que os resultados obtidos são aproximados. Para se expressar um resultado exato, seria necessário um processo iterativo, estimando uma ondulação de tensão inicial e calculando o capacitor de filtro, até obter um resultado que levasse ao valor do capacitor correto.

Assim seja, estimando uma ondulação de tensão de 10%:

$$\Delta V_{C1} = \frac{\Delta \%}{100} \cdot V_{C1(\max)} = \frac{10}{100} \cdot 16,97 = 1,697V ;$$

$$V_{C1(\min)} = V_{C1(\max)} - \Delta V_{C1} = 16,97 - 1,697 = 15,273V .$$

Assim:

$$P_{in} = P_o = \frac{V_{o(\max)} + V_{o(\min)}}{2} = \frac{16,97 + 15,273}{2} = 16,12W .$$

Portanto:

$$C_1 = \frac{16,12}{60 \cdot (16,97^2 - 15,273^2)} \cong 4.910 \mu F .$$

Assim, nota-se que o capacitor calculado para 10% de ondulação (*ripple*) é maior do que aquele empregado no circuito, que possui valor de 1.000 μF . Isso significa que a ondulação será maior do que 10%, portanto precisa-se refazer a sequência de passos acima até encontrar o valor correto para o capacitor.

Fazendo este processo em um *software* matemático, por exemplo no Smath Studio, obtém-se uma ondulação de 49%.

Exercícios Propostos

EP 01) Considerando o circuito da Figura 10 e que a fonte de alimentação seja de 15 V (eficazes) e frequência de 60 Hz, os diodos são ideais e a carga tem potência de 20 W, determine:

- O capacitor necessário para uma ondulação na tensão de saída de 20%;
- A tensões máxima, mínima e máxima na carga;
- As correntes máxima e média nos diodos;
- A potência média na carga;
- A tensão reversa nos diodos;
- O fator de potência do circuito.

EP 02) Considerando o circuito da Figura 10 e que a fonte de alimentação seja de 15 V (eficazes) e frequência de 60 Hz, os diodos são do tipo 1N5402 e a carga tem potência de 10 W, determine:

- O capacitor necessário para uma ondulação na tensão de saída de 20%;
- A tensões máxima, mínima e máxima na carga;
- As correntes máxima e média nos diodos;
- A potência média na carga;
- A tensão reversa nos diodos;
- O fator de potência do circuito.

EP 03) Determine o rendimento do circuito no exemplo resolvido 01 (ER 01).

EP 04) Determine o rendimento do circuito no exercício proposto 02 (EP 02).

EP 05) Desenhe as principais formas de onda para o exemplo resolvido 01 (ER 01).

EP 06) Desenhe as principais formas de onda para o exercício proposto 02 (EP 02).

EP 07) Simule o circuito do exemplo resolvido 01 (ER 01) no *software* Psim e compare os resultados obtidos no simulador com os calculados.

EP 08) Simule o circuito do exemplo resolvido 01 (ER 01) no *software* Multisim e compare os resultados obtidos no simulador com os calculados.

EP 09) Faça o cálculo térmico para o exercício proposto 02 (EP 02). Se necessário usar dissipador, escolha outro modelo de diodo para empregar naquele circuito.

EP 11) Simule o circuito do exemplo proposto 02 (EP 02) com uma tensão na fonte maior do que a tensão reversa suportada pelos diodos. Verifique o funcionamento do circuito nestas condições. Comente.

EP 12) Simule o circuito do exemplo proposto 02 (EP 02) com um valor de capacitor diferente daquele calculado. Verifique o funcionamento do circuito nestas condições. Comente.

9 Laboratório

9.1 Introdução

Esta atividade de laboratório tem por objetivo exercitar o conteúdo estudado nesta aula (capítulo), especificamente sobre o estudo de conversores ca-cc (retificadores) de onda completa com filtro capacitivo.

Em síntese, objetiva-se:

- Realizar cálculos teóricos com retificadores monofásicos;
- Determinar as principais variáveis do circuito considerando requisitos de projeto;
- Calcular as principais grandezas do circuito;
- Simular um conversor ca-cc;
- Observar as principais formas de onda do circuito;
- Comparar os resultados de simulação com os valores calculados.

9.2 Retificador de Onda Completa em Ponte com Filtro Capacitivo

O circuito do retificador em estudo está mostrado na figura 1.

Na Figura 11 está sendo empregado um transformador abaixador de tensão, conectado na rede de 220 V e 60 Hz. Na saída deste transformador conectou-se uma ponte retificadora com diodos, seguida de um capacitor de filtro. A tensão de saída do transformador é de 16 V.

Se desejar inserir sinalização com LED na saída da fonte, lembre de inserir um resistor série para limitar a corrente no elemento sinalizador.

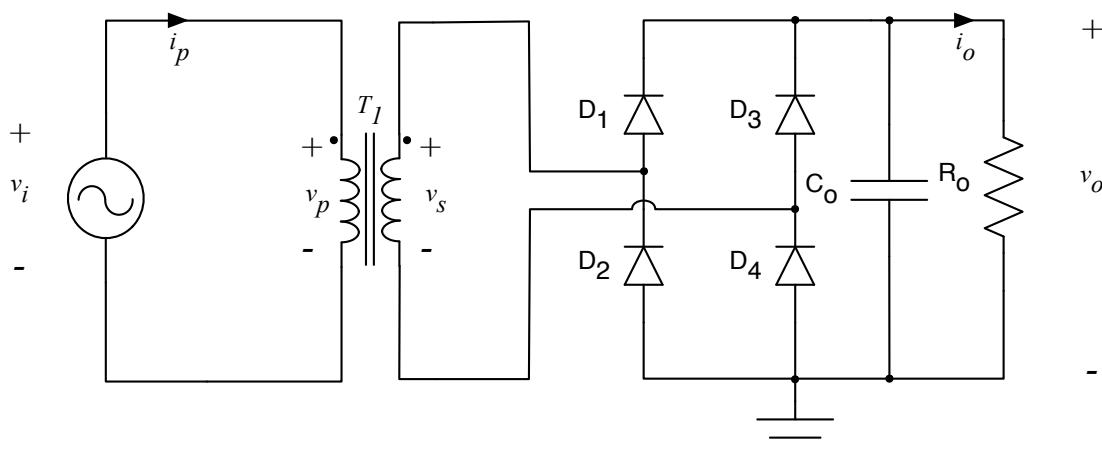


Figura 11 – Circuito do retificador de onda completa em ponte com filtro capacitivo.

9.3 Projeto do Retificador

Calcule as principais variáveis do circuito e escolha os seus elementos, utilizando a metodologia apresentada em aula. Anote os resultados nas Tabela 3 e Tabela 4 abaixo. Os dados do transformador disponível já estão anotados na tabela.

Tabela 3 – Componentes escolhidos.

Elemento	Variável do circuito	Valores determinados
Transformador	Tensão do primário	220 V
	Tensão do secundário	16 V
	Corrente eficaz no secundário	350 mA
	Potência aparente	5,6 VA
Capacitor	Capacitância	
	Tensão de trabalho	
Diodos	Modelo de diodo escolhido	
	Corrente média	
	Tensão reversa máxima	

Tabela 4 – Valores projetados e simulados para o retificador em estudo.

Variável do circuito	Valores calculados	Valores simulados
Tensão eficaz no secundário		
Tensão média no capacitor C_1		
Tensão máxima no capacitor C_1		
Tensão mínima no capacitor C_1		
Ondulação (<i>ripple</i>) de tensão na carga		
Corrente média na carga		
Corrente máxima nos diodos		
Corrente média nos diodos		
Tensão máxima sobre os diodos		
Corrente eficaz no secundário		
Potência ativa na carga		
Potência aparente na entrada		
Fator de potência da estrutura		

9.4 Simulação do Retificador

Simule o circuito da fonte ca-cc mostrado na Figura 11, verificando seu correto funcionamento.

9.5 Principais Formas de Onda

Esboce as principais formas de onda do circuito da Figura 11, conforme solicitado na Figura 12.

9.6 Análise dos Resultados

Faça uma análise entre os valores calculados e aqueles obtidos por simulação, comentando sobre eventuais diferenças e os motivos que a provocaram.

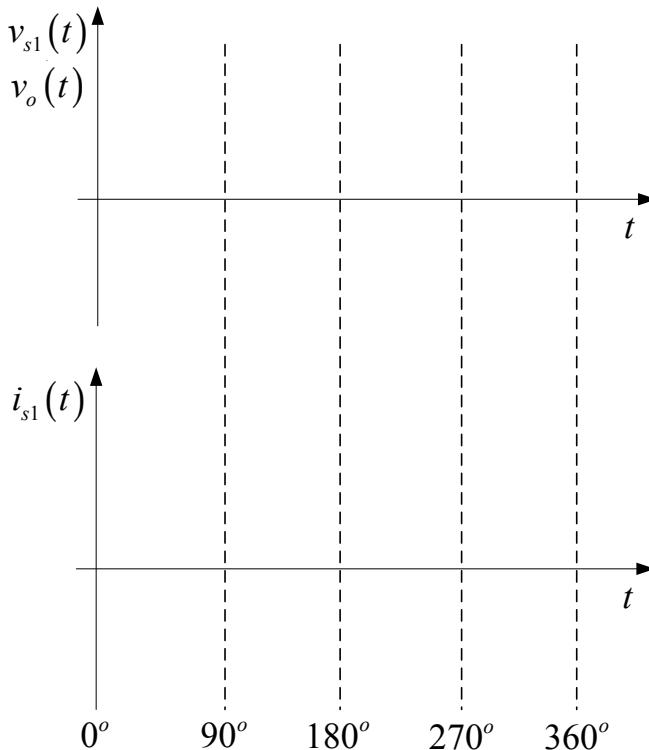


Figura 12 – Principais formas de onda do retificador projetado.

10 Referências

- [1] BARBI, I. Eletrônica de potência. Florianópolis: Edição do Autor, 2005.
- [2] AHMED, A. Eletrônica de potência. São Paulo: Prentice Hall, 2000.
- [3] MELLO, J. L. A. Projetos de fontes chaveadas. São Paulo: Érica, 1987.
- [4] MOHAN, N. Power Electronic Converters, Application and Design. New York: IE-Wiley, 2003.
- [5] PRESSMAN, A. I. Switching Power Supply Design. New York: McGraw Hill, 1998.
- [6] BARBI, Ivo. Projeto de Fontes Chaveadas. 2^a Edição Revisada, Florianópolis, 2006.
- [7] ERICKSON, Robert W. Fundamentals of Power Electronics. New York, EUA – Chapman & Hall, 1997.
- [8] POMILIO, J. A. Notas de aula de Eletrônica de Potência – Graduação. São Paulo, SP –

UNICAMP, 2013.

[9] UNITRODE. Line Input AC to DC Conversion and Input Filter Capacitor Selection. Power Supply Seminar, Unitrode Switchgin Regulated Power Supply Design Seminar Manual, Texas, EUA. 1986.