

7

Capítulo

Retificadores Monofásicos de Onda Completa com Carga Resistiva

Meta deste capítulo

Estudar os conversores ca-cc monofásicos de onda completa operando com carga resistiva.

objetivos

- 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 meia onda com carga resistiva-indutiva.

Continuidade

O curso continuará com o estudo de circuitos retificadores de onda completa com carga resistiva-indutiva.

Prof. Clóvis Antônio Petry.

Florianópolis, setembro de 2013 (revisado em maio de 2020).

1 Introdução

O capítulo anterior desta apostila versou sobre os retificadores monofásicos não-controlados operando com carga resistiva-indutiva. Naquele capítulo, assim como no anterior, estudaram-se os retificadores monofásicos de meia-onda. Apesar de apresentarem baixo valor médio para a tensão de saída, em alguns casos são empregados visando reduzir custo, pois possuem baixo número de componentes.

Neste capítulo serão estudados os retificadores de onda completa. Estes conversores podem ser com ponto médio, ou seja, empregando transformador com derivação central, ou ponte completa, usando quatro diodos no estágio de retificação.

Atualmente, os retificadores de onda completa são os mais utilizados nas aplicações de eletrônica de potência, com destaque ao conversor ponte completa, pois o mesmo emprega quatro diodos, mas transformador com secundário simples. Como atualmente o custo dos semicondutores é menor do que dos magnéticos, este retificador se tornou vantajoso em relação aos demais.

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

2 Retificador Monofásico de Onda Completa – Carga R

2.1 Retificador com Ponto Médio

O conversor ca-cc (retificador) monofásico de onda completa com ponto médio (derivação central) com carga resistiva está mostrado na Figura 1. A tensão de entrada é representada pela fonte de tensão alternada (v_i), os diodos retificadores são D_1 e D_2 e a carga é formada pela resistência R_o .

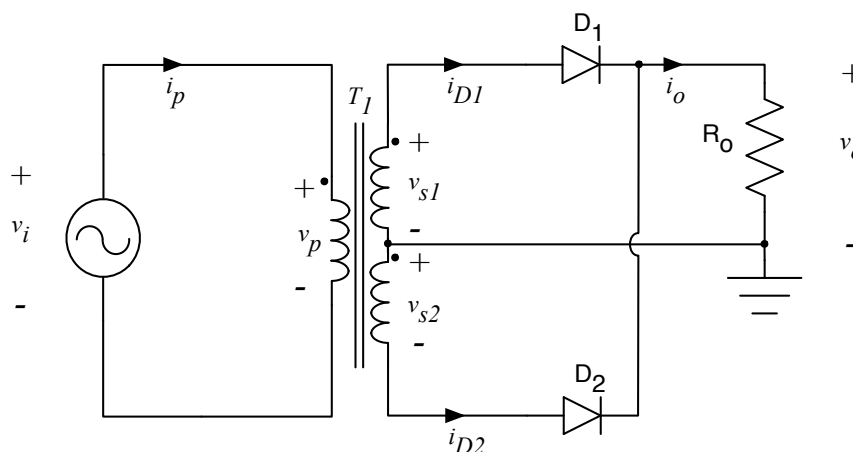


Figura 1 – Retificador monofásico de onda completa com ponto médio com carga resistiva.

Este conversor tem duas etapas de funcionamento, quais sejam:

1ª Etapa – Semiciclo positivo da tensão de entrada, $v_i > 0$, o diodo D_1 conduz e conecta o secundário superior (v_{s1}) à carga. Por estar reversamente polarizado, o diodo D_2 permanece bloqueado. A tensão na carga é igual à entrada. Esta etapa dura de 0° até 180° ;

2ª Etapa – Semiciclo negativo da tensão de entrada, $v_i < 0$, após a passagem por zero da tensão de entrada, entra em condução o diodo D_2 e bloqueia o diodo D_1 . A tensão continua sendo positiva, ou seja, a corrente na carga circula no mesmo sentido que na etapa anterior. É o diodo D_2 que aplica a tensão do secundário inferior (v_{s2}) à carga.

Assim, verifica-se que a tensão de entrada alimenta a carga no semiciclo positivo e também no semiciclo negativo. As formas de onda da tensão de entrada, na carga, corrente na carga e tensão sobre o diodo são mostradas na Figura 2.

A tensão de saída apresenta o mesmo valor de pico do que a tensão de entrada, visto que está se considerando que os diodos são ideais. Os dois semiciclos da tensão de entrada são aplicados na carga, mas sempre positivos, como se observa na Figura 2.

A corrente na carga é uma imagem da tensão, pois a mesma é resistiva, e possui valor de pico dado por (I_{pk}).

É importante destacar que a tensão reversa nos diodos possui o dobro do valor do pico da tensão de entrada, o que caracteriza uma desvantagem deste retificador em relação aos estudados anteriormente ou em relação ao conversor ponte completa, que será estudado em seguida.

Após o período de 2π radianos, as formas de onda se repetirão indefinidamente, pois a tensão alternada de entrada é periódica. A escala horizontal é tomada em radianos para facilitar a representação independente da frequência da rede.

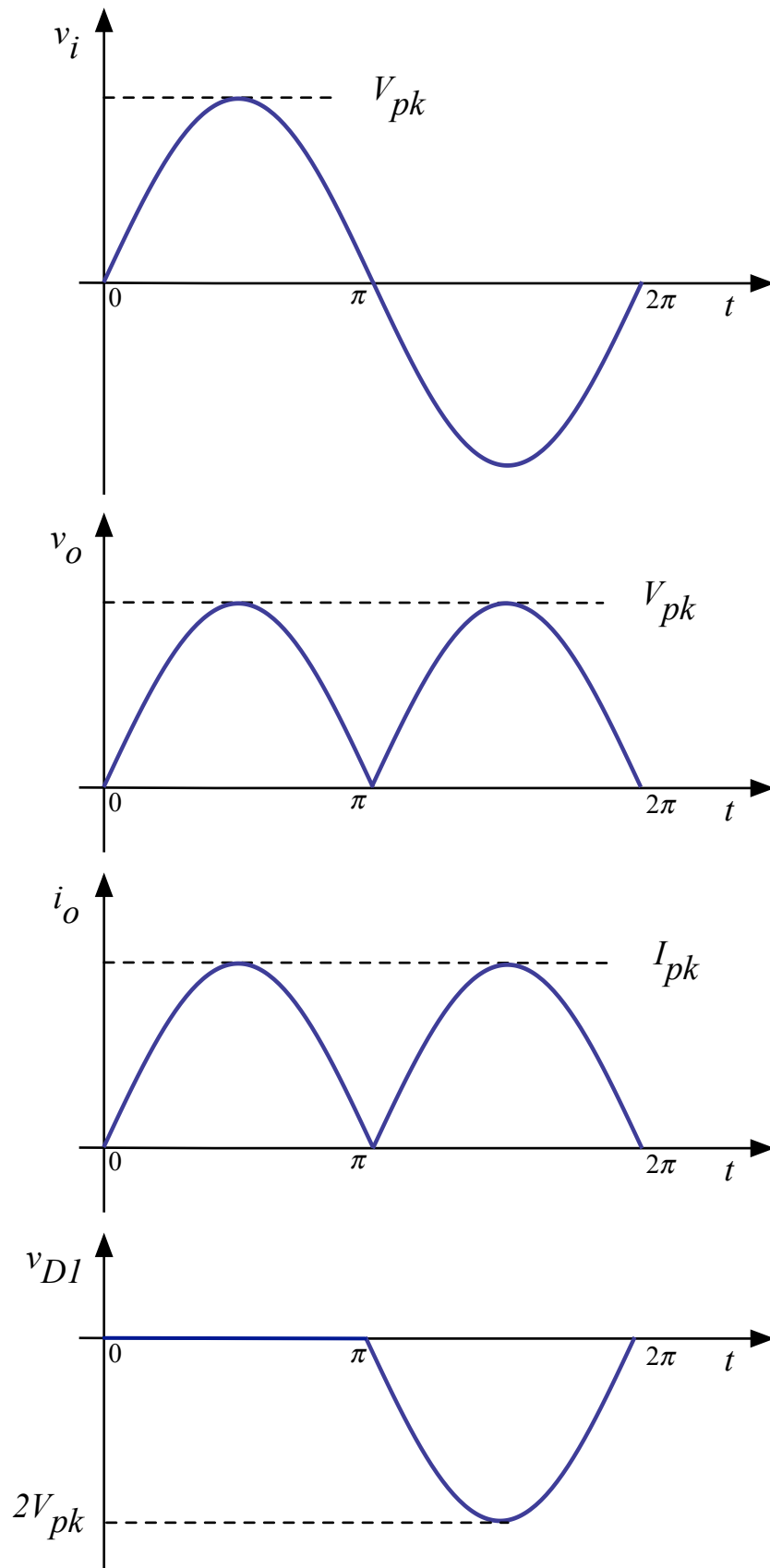


Figura 2 – Principais formas de onda do retificador monofásico de onda completa com ponto médio com carga resistiva.

2.2 Retificador Ponte Completa

O conversor ca-cc (retificador) monofásico de onda completa em ponte com carga resistiva está mostrado na Figura 3. A tensão de entrada é representada pela fonte de tensão alternada (v_i), os diodos retificadores são D_1 a D_4 e a carga é formada pela resistência R_o .

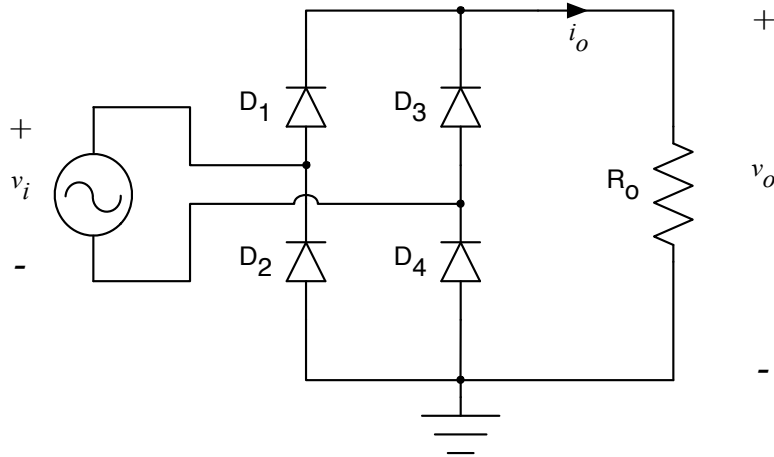


Figura 3 – Retificador monofásico de onda completa em ponte com carga resistiva.

Este conversor tem duas etapas de funcionamento, quais sejam:

1ª Etapa – Semiciclo positivo da tensão de entrada, $v_i > 0$, os diodos D_1 e D_4 conduzem. A tensão na carga é igual à entrada. Esta etapa dura de 0° até 180° ;

2ª Etapa – Semiciclo negativo da tensão de entrada, $v_i < 0$, após a passagem por zero da tensão de entrada, entram em condução dos diodos D_2 e D_3 e bloqueiam os diodos D_1 e D_4 . A tensão continua sendo positiva, ou seja, a corrente na carga circula no mesmo sentido que na etapa anterior.

Assim, verifica-se que a tensão de entrada alimenta a carga no semiciclo positivo e também no semiciclo negativo. As formas de onda da tensão de entrada, na carga, corrente na carga e tensão sobre o diodo são mostradas na Figura 4.

A tensão de saída apresenta o mesmo valor de pico do que a tensão de entrada, visto que está se considerando que os diodos são ideais. Os dois semiciclos da tensão de entrada são aplicados na carga, mas sempre positivos, como se observa na Figura 4.

A corrente na carga é uma imagem da tensão, pois a mesma é resistiva, e possui valor de pico dado por (I_{pk}).

Por sua vez, a tensão reversa nos diodos possui o mesmo valor de pico da tensão de entrada e aparece no semiciclo negativo, conforme estejam bloqueados D_1 e D_4 , ou positivo se estiverem bloqueados D_2 e D_3 . Após o período de 2π radianos, as formas de onda se repetirão indefinidamente, pois a tensão alternada de entrada é periódica. A escala horizontal é tomada em radianos para facilitar a representação independente da frequência da rede.

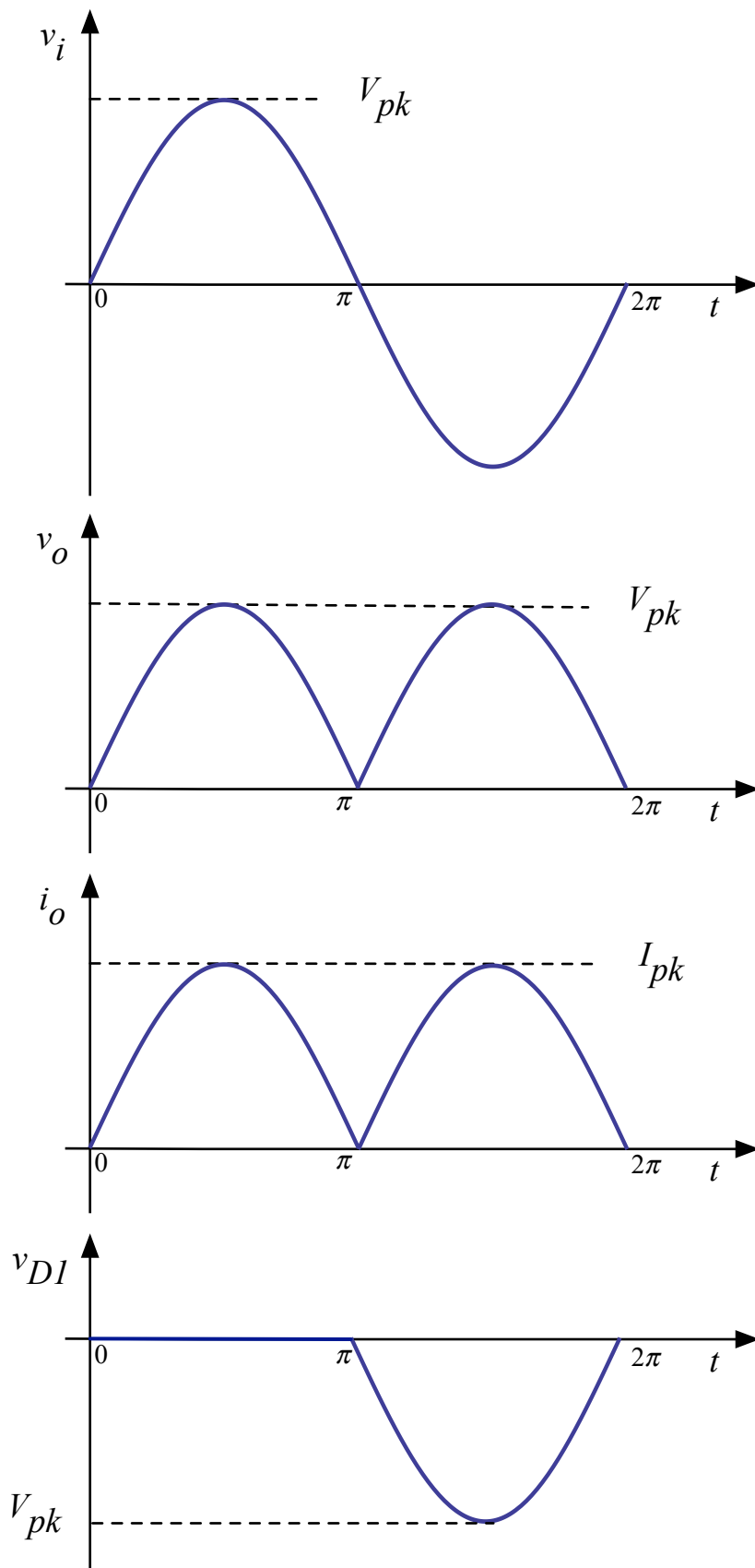


Figura 4 – Principais formas de onda do retificador monofásico de onda completa em ponte com carga resistiva.

3 Análise dos Retificadores em Estudo

A seguir será realizada a análise dos retificadores em estudo, visando determinar sua tensão de saída, a corrente no circuito, os esforços nos diodos, fator de potência da estrutura e sua eficiência do ponto de vista da conversão de energia elétrica.

3.1 Tensões na Saída

A tensão de entrada (v_i) está representada na Figura 2 pelo seu valor de pico (V_{pk}). Seus valores médio e eficaz (RMS) são:

$$V_{i(med)} = 0;$$

$$V_{i(ef)} = \frac{V_{i(pk)}}{\sqrt{2}} = \frac{V_{pk}}{\sqrt{2}}.$$

Já no lado secundário, na Figura 2, se tem:

$$V_{s1(med)} = V_{s2(med)} = 0;$$

$$V_{s1(ef)} = V_{s2(ef)} = \frac{V_{i(pk)}}{N \cdot \sqrt{2}} = \frac{V_{i(pk)}}{1 \cdot \sqrt{2}} = \frac{V_{i(pk)}}{\sqrt{2}} = \frac{V_{pk}}{\sqrt{2}};$$

$$N = \frac{N_p}{N_s} = \frac{v_p}{v_s} = 1.$$

As tensões nos secundários são iguais, ou seja, o transformador é simétrico. Para simplicidade na análise, a relação de transformação será considerada unitária.

A tensão de pico na saída é igual a tensão de pico na entrada:

$$V_{o(pk)} = V_{i(pk)} = V_{pk}.$$

A tensão média na saída de ambos os retificadores de onda completa é obtida por:

$$V_{o(med)} = \frac{2}{2\pi} \int_0^\pi V_{o(pk)} \cdot \sin(t) \cdot dt = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi V_{pk} \cdot \sin(t) \cdot dt;$$

$$V_{o(med)} = \frac{2 \cdot V_{o(pk)}}{\pi} = \frac{2 \cdot V_{pk}}{\pi}.$$

A tensão eficaz na saída de ambos os retificadores de onda completa é obtida por:

$$V_{o(ef)} = \sqrt{\frac{2}{2\pi} \int_0^{\pi} (V_{o(pk)} \cdot \text{sen}(t))^2 \cdot dt} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} (V_{pk} \cdot \text{sen}(t))^2 \cdot dt} ;$$

$$V_{o(ef)} = \frac{V_{o(pk)}}{\sqrt{2}} = \frac{V_{pk}}{\sqrt{2}} .$$

3.2 Correntes na Saída

As correntes na carga, em ambos os retificadores, são obtidas diretamente a partir das tensões na carga:

$$I_{o(pk)} = \frac{V_{o(pk)}}{R_o} = \frac{V_{pk}}{R_o} .$$

$$I_{o(med)} = \frac{V_{o(med)}}{R_o} .$$

$$I_{o(ef)} = \frac{V_{o(ef)}}{R_o} .$$

3.3 Esforços de Corrente e Tensão no Diodo

A tensão reversa nos diodos do retificador em ponto médio é o dobro do pico da tensão do secundário dos transformadores:

$$V_{D1(RRM)} = V_{D2(RRM)} = 2 \cdot V_{pk} .$$

Já no retificador em ponte completa, a tensão reversa máxima nos diodos é igual ao pico da tensão de entrada:

$$V_{D1(RRM)} = V_{D2(RRM)} = V_{D3(RRM)} = V_{D4(RRM)} = V_{pk} .$$

As correntes de pico nos diodos são iguais às da carga:

$$I_{D(pk)} = I_{o(pk)} .$$

Já as correntes médias e eficazes, em cada diodo, são:

$$I_{D(med)} = \frac{I_{o(med)}}{2} .$$

$$I_{D(ef)} = \frac{I_{o(ef)}}{\sqrt{2}} .$$

3.4 Fator de Potência da Estrutura

O fator de potência é definido como a relação entre a potência ativa e a potência aparente de um circuito. O circuito é considerado ideal, ou seja, sem perdas, portanto:

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = 1;$$

$$FP = \frac{P_i}{S_i} = \frac{P_o}{S_i}.$$

A potência ativa na carga (resistiva) deve ser calculada como:

$$P_o = R_o \cdot I_{o(ef)}^2 = \frac{V_{o(ef)}^2}{R_o}.$$

Já a potência aparente na entrada (rede) será:

$$S_i = V_{i(ef)} \cdot I_{i(ef)} = V_{i(ef)} \cdot I_{o(ef)}.$$

Já que a corrente na carga e na fonte são iguais, pois apenas nos diodos a corrente da carga se divide. A diferença é que na carga a corrente é unidirecional e na rede bidirecional. Pode-se obter então:

$$P_o = R_o \cdot I_{o(ef)}^2 = R_o \cdot \left(\frac{V_{o(ef)}}{R_o} \right)^2 = R_o \cdot \left(\frac{V_{o(pk)}}{\sqrt{2} \cdot R_o} \right)^2 = R_o \cdot \left(\frac{V_{pk}}{\sqrt{2} \cdot R_o} \right)^2 = \frac{V_{pk}^2}{2 \cdot R_o}.$$

Por sua vez, a potência aparente na entrada será:

$$S_i = V_{i(ef)} \cdot I_{o(ef)} = \frac{V_{pk}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{V_{pk}}{\sqrt{2} \cdot R_o} = \frac{V_{pk}^2}{2 \cdot R_o}.$$

Finalmente, pode-se obter o fator de potência:

$$FP = \frac{P_o}{S_i} = \frac{\frac{V_{pk}^2}{2 \cdot R_o}}{\frac{V_{pk}^2}{2 \cdot R_o}} = \frac{V_{pk}^2}{2 \cdot R_o} \cdot \frac{2 \cdot R_o}{V_{pk}^2};$$

$$FP = 1.$$

O fator de potência do retificador de onda completa é unitário, visto que os diodos conduzem nos dois semiciclos e assim a fonte fornece energia durante o período todo e com formato senoidal.

3.5 Fator de Conversão das Estruturas

O fator de conversão do conversor ca-cc é uma característica da estrutura que mostra como é a conversão de energia do retificador. Em outras palavras, representa quanto da energia disponibilizada pela fonte (rede elétrica) e consumida é realmente convertida em trabalho pela carga. Não tem relação com a eficiência do circuito, pois os componentes são ideais e não se tem perdas no circuito. Assim, o fator de conversão mostra se a energia disponível é utilizada. Para as duas estruturas de retificador de onda completa em estudo: com ponto médio e em ponte completa, ter-se-á resultados diferentes para o fator de utilização, visto que este depende de como se utiliza o transformador da estrutura.

Inicialmente será feita a análise para o retificador monofásico de onda completa com ponto médio.

O fator de conversão (FC) é definido como a relação entre a potência no lado de corrente contínua (saída) e a potência no lado de corrente alternada (entrada). Assim:

$$FC = \frac{P_{CC}}{P_{CA}}$$

A potência no lado de corrente contínua (P_{CC}) é dada por:

$$P_{CC} = V_{o(med)} \cdot I_{o(med)};$$

$$P_{CC} = V_{o(med)} \cdot \frac{V_{o(med)}}{R_o} = 2 \cdot \frac{V_{pk}}{\pi} \cdot 2 \cdot \frac{V_{pk}}{R_o \cdot \pi} = \frac{4 \cdot V_{pk}^2}{R_o \cdot \pi^2}.$$

No lado da fonte, considerando cada secundário, a potência será:

$$P_{CA} = 2 \cdot V_{i(ef)} \cdot I_{i(ef)} = 2 \cdot \frac{V_{pk}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{V_{pk}}{2 \cdot R_o} = \frac{V_{pk}^2}{\sqrt{2} \cdot R_o}.$$

Portanto, o fator de conversão será:

$$FC = \frac{P_{CC}}{P_{CA}} = \frac{\frac{4 \cdot V_{pk}^2}{R_o \cdot \pi^2}}{\frac{V_{pk}^2}{\sqrt{2} \cdot R_o}} = \frac{4 \cdot V_{pk}^2}{R_o \cdot \pi^2} \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot R_o}{V_{pk}^2} = \frac{4 \cdot \sqrt{2}}{\pi^2};$$

$$FC = 0,573.$$

Em outras palavras, isso significa que apenas 57,3% da potência disponibilizada pela fonte é aproveitada na saída. É o mesmo que dizer que a potência na entrada deve ser $1/0,573 \approx 1,75$ vezes a potência desejada na saída, ou em outras palavras, que o transformador

deverá ter 1,75 VA para cada 1 W desejado na carga. Isso denota uma conversão melhor que no retificador de meia onda, mas que ainda pode ser melhorada com o uso de um retificador onda completa em ponte.

Para o retificador em onda completa em ponte, se tem que a potência no lado de corrente contínua (P_{CC}) dada por:

$$P_{CC} = V_{o(med)} \cdot I_{o(med)};$$

$$P_{CC} = V_{o(med)} \cdot \frac{V_{o(med)}}{R_o} = 2 \cdot \frac{V_{pk}}{\pi} \cdot 2 \cdot \frac{V_{pk}}{R_o \cdot \pi} = \frac{4 \cdot V_{pk}^2}{R_o \cdot \pi^2}.$$

No lado da fonte, considerando cada secundário, a potência será:

$$P_{CA} = V_{i(ef)} \cdot I_{i(ef)} = \frac{V_{pk}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{V_{pk}}{\sqrt{2} \cdot R_o} = \frac{V_{pk}^2}{2 \cdot R_o}.$$

Portanto, o fator de conversão será:

$$FC = \frac{P_{CC}}{P_{CA}} = \frac{\frac{4 \cdot V_{pk}^2}{R_o \cdot \pi^2}}{\frac{V_{pk}^2}{2 \cdot R_o}} = \frac{4 \cdot V_{pk}^2}{R_o \cdot \pi^2} \cdot \frac{2 \cdot R_o}{V_{pk}^2} = \frac{8}{\pi^2};$$

$$FC = 0,81.$$

Em outras palavras, isso significa que 81% da potência disponibilizada pela fonte é aproveitada na saída. É o mesmo que dizer que a potência na entrada deve ser $1/0,81 \approx 1,23$ vezes a potência desejada na saída, ou em outras palavras, que o transformador deverá ter 1,23 VA para cada 1 W desejado na carga. Isso denota uma conversão melhor que no retificador de meia onda e que no retificador de onda completa com ponto médio.

4 Simulação dos Retificadores em Estudo

Os retificadores monofásicos de onda completa com carga resistiva serão simulados utilizando os *softwares* Psim e Multisim. Inicialmente será realizada uma simulação considerando componentes ideais, para fins de verificação das expressões teóricas apresentadas. A seguir será realizada uma simulação com componentes reais, visando a verificação das diferenças apresentadas em relação à simulação ideal.

4.1 Simulação do Circuito com Componentes Ideais

Os circuitos simulados no Psim estão mostrados na Figura 5. Note que os componentes são ideais, ou seja, genéricos, não se utilizando algum modelo específico de diodo semicondutor. A fonte é para 9 V (eficazes), o que equivale a 12,72 V de pico e frequência de 60 Hz. Os diodos são ideais. A carga é resistiva com uma resistência de 10 Ω . O tempo de simulação pode ser de 50 ms e passo de cálculo de 0,1 ms (100 μ s).

As formas de onda da tensão de entrada e na saída e da corrente no circuito são mostradas na Figura 6. Note que o formato das mesmas condiz com o esperado pela análise do circuito. Na Tabela 1 apresentam-se os principais valores do circuito, calculados e simulados.

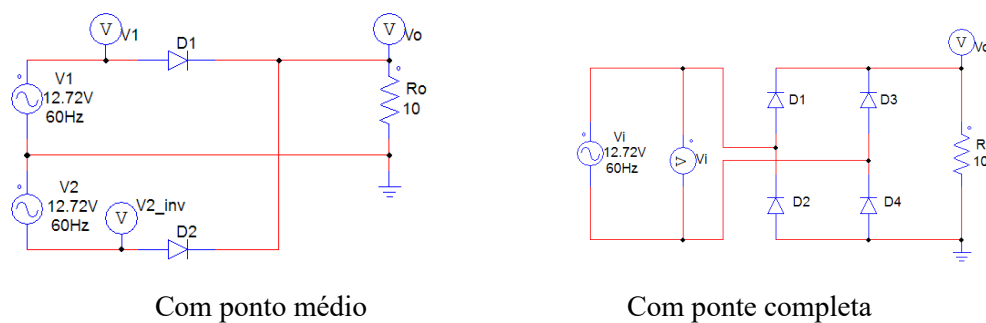


Figura 5 – Circuitos simulados no Psim.

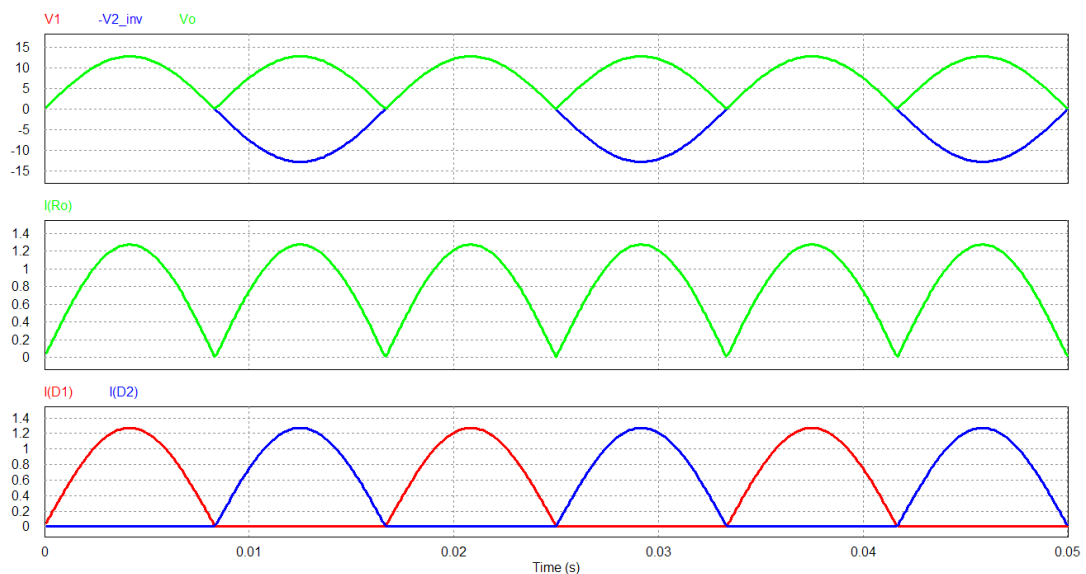


Figura 6 – Principais formas de onda do retificador com ponto médio.

Tabela 1 – Resultados para o retificador de onda completa com ponto médio.

Variável	Descrição	Valor calculado	Valor simulado
$V_{o(pk)}$	Tensão de pico na carga	12,73 V	12,72 V
$V_{o(avg)}$	Tensão média na carga	8,10 V	8,10 V
$I_{o(pk)}$	Corrente de pico na carga	1,273 A	1,273 A
$I_{o(avg)}$	Corrente média na carga	0,810 A	0,810 A
P_o	Potência média na carga	8,1 W	8,1 W

A seguir simulou-se o retificador monofásico de onda completa em ponte mostrado na Figura 5, obtendo-se as formas de onda mostradas na Figura 7.

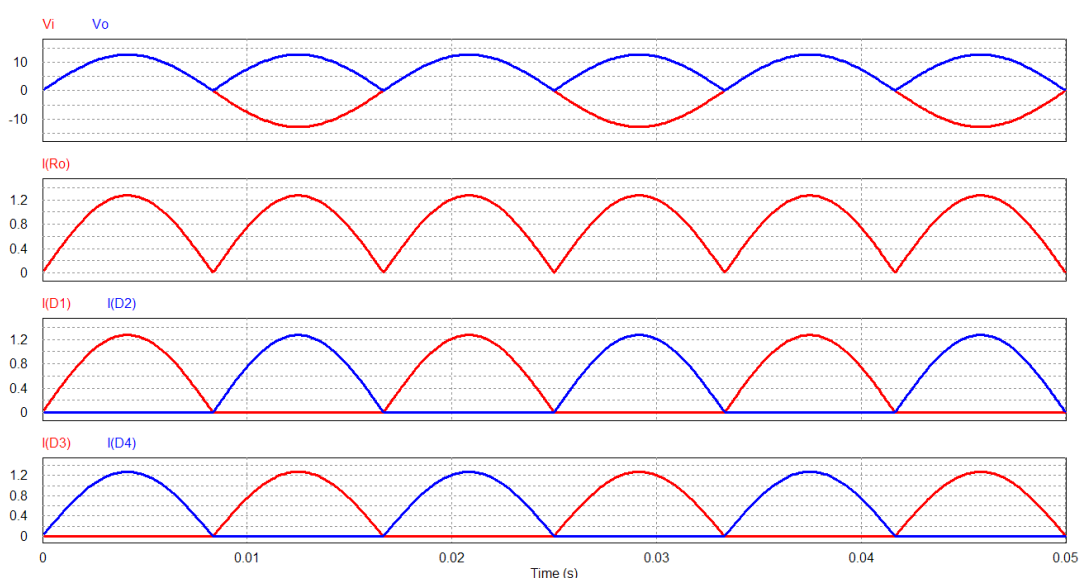


Figura 7 – Principais formas de onda do retificador de onda completa em ponte.

Tabela 2 – Resultados para o retificador de onda completa em ponte.

Variável	Descrição	Valor calculado	Valor simulado
$V_{o(pk)}$	Tensão de pico na carga	12,73 V	12,72 V
$V_{o(avg)}$	Tensão média na carga	8,10 V	8,10 V
$I_{o(pk)}$	Corrente de pico na carga	1,273 A	1,273 A
$I_{o(avg)}$	Corrente média na carga	0,810 A	0,810 A
P_o	Potência média na carga	8,1 W	8,1 W

Note pela Figura 7 que a corrente na carga é formada pela parcela que circula pelos diodos D_1 e D_4 e a outra que circula pelos diodos D_2 e D_3 .

4.2 Simulação do Circuito com Componentes Reais

O circuito simulado no Multisim está mostrado na Figura 8. Note que os componentes são reais, ou seja, os diodos possuem um modelo específico para o circuito, que é o 1N4001. A fonte é para 9 V (eficazes) e frequência de 60 Hz. A carga é resistiva e tem resistência de 10 Ω . O

tempo de simulação pode ser de 50 ms e passo de cálculo de 0,1 ms (100 μ s).

As formas de onda das tensões no circuito são mostradas na Figura 9. Note que agora se percebe claramente a queda de tensão apresentada pelo diodo, que faz com que a tensão de saída seja menor. Os valores calculados e simulados são mostrados na Tabela 3. Perceba que a potência diminuiu na carga, visto a tensão média ter diminuído.

Na Tabela 3, os valores calculados são para o circuito ideal, ou seja, não se levou em conta a queda de tensão no diodo. Isso foi feito para se ter uma comparação entre os valores do circuito ideal e os valores do circuito real. Nota-se que todas as amplitudes diminuíram, pois cada diodo provoca uma queda de tensão direta da ordem de 1 V.

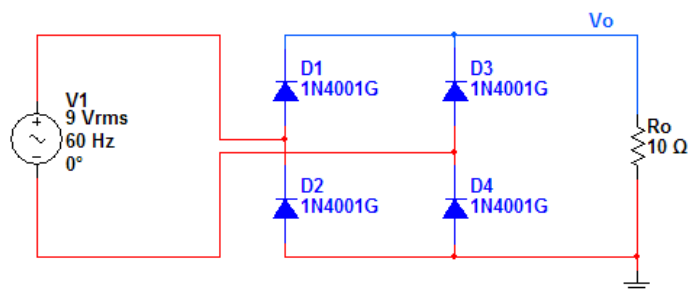


Figura 8 – Circuito simulado no Multisim.

Tabela 3 – Resultados para o retificador de onda completa em ponte.

Variável	Descrição	Valor calculado	Valor simulado
$V_{o(pk)}$	Tensão de pico na carga	12,73 V	10,9 V
$V_{o(avg)}$	Tensão média na carga	8,10 V	6,59 V
$I_{o(pk)}$	Corrente de pico na carga	1,273 A	1,09 A
$I_{o(avg)}$	Corrente média na carga	0,810 A	0,659 A
P_o	Potência média na carga	8,1 W	5,7 W

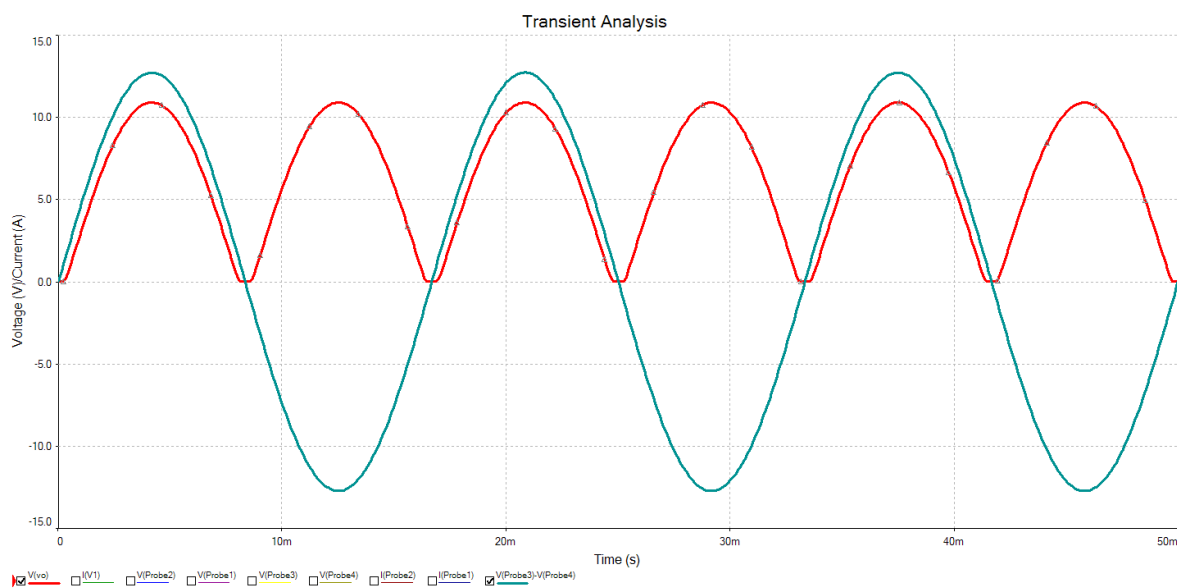


Figura 9 – Formas de onda da tensão de entrada e saída do retificador em ponte.

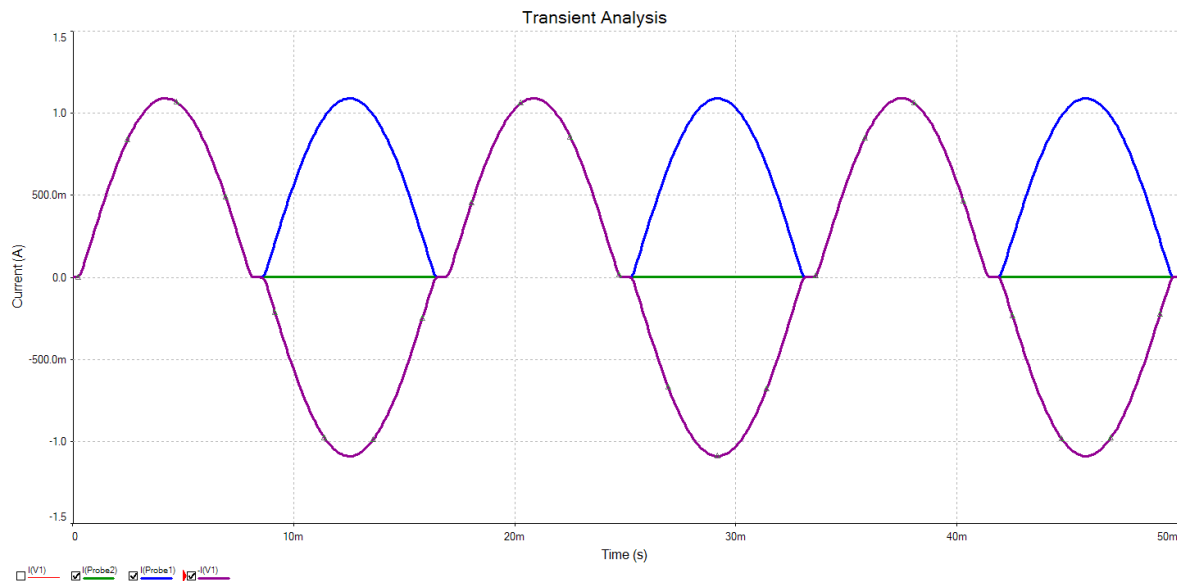


Figura 10 – Formas de onda da corrente de entrada, na saída e no diodo D_1 do retificador em ponte.

As formas de onda das correntes no circuito são mostradas na Figura 10. Note que a corrente apresenta uma pequena distorção na passagem por zero. Isso ocorre devido a queda de tensão nos diodos.

A potência instantânea nos diodos é mostrada na Figura 11, para o caso do diodo D_1 . Note que a mesma atinge picos da ordem de 1 W, pois a corrente de pico que circula nos diodos é de 1,09 A e sendo sua queda de tensão em torno de 1 V, resulta neste valor de potência visto na figura.

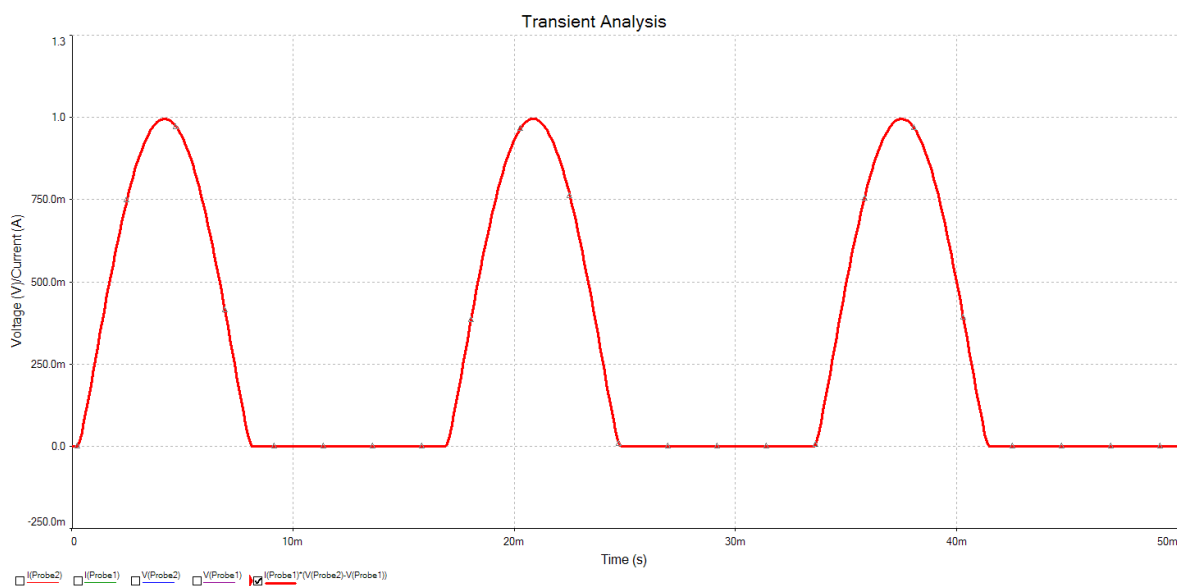


Figura 11 – Potência instantânea no diodo D_1 .

5 Exercícios

Exercícios Resolvidos

ER 01) Considerando o circuito da Figura 12 e que a fonte de alimentação seja de 12 V (eficazes), os diodos são ideais e a carga tem resistência de 5 Ω , determine:

- As tensões de pico, média e eficaz na carga;
- As correntes de pico, média e eficaz na carga;
- A potência média na carga.

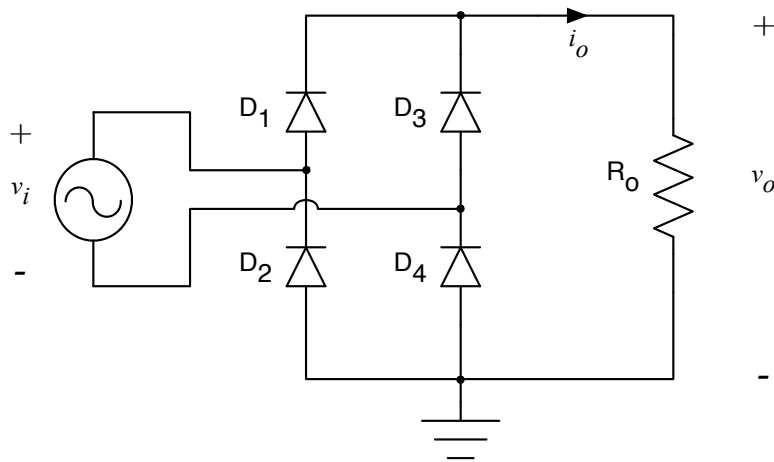


Figura 12 – Circuito para exercício resolvido 01.

As tensões de pico, média e eficaz na carga são dadas por:

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

$$V_{o(med)} = 2 \cdot \frac{V_{pk}}{\pi} = 2 \cdot \frac{16,97}{\pi} = 10,80 \text{ V}.$$

$$V_{o(ef)} = \frac{V_{pk}}{\sqrt{2}} = \frac{16,97}{\sqrt{2}} = 12 \text{ V}.$$

As correntes na carga serão determinadas por:

$$I_{o(pk)} = \frac{V_{o(pk)}}{R_o} = \frac{V_{pk}}{R_o} = \frac{16,97}{5} = 3,39 \text{ A}.$$

$$I_{o(med)} = \frac{V_{o(med)}}{R_o} = \frac{10,80}{5} = 2,16 \text{ A}.$$

$$I_{o(ef)} = \frac{I_{o(pk)}}{\sqrt{2}} = \frac{3,39}{\sqrt{2}} = 2,40 \text{ A}.$$

A potência média na carga é:

$$P_o = R_o \cdot I_{o(ef)}^2 = 5 \cdot 2,40^2 = 28,8 \text{ W}.$$

ER 02) Considerando o circuito da Figura 13 e que a fonte de alimentação seja de 220 V (eficazes), a relação do transformador é de 13 V/V, os diodos são ideais e a carga tem resistência de 5 Ω , determine:

- As tensões de pico, média e eficaz na carga;
- As correntes de pico, média e eficaz na carga;
- A potência média na carga.

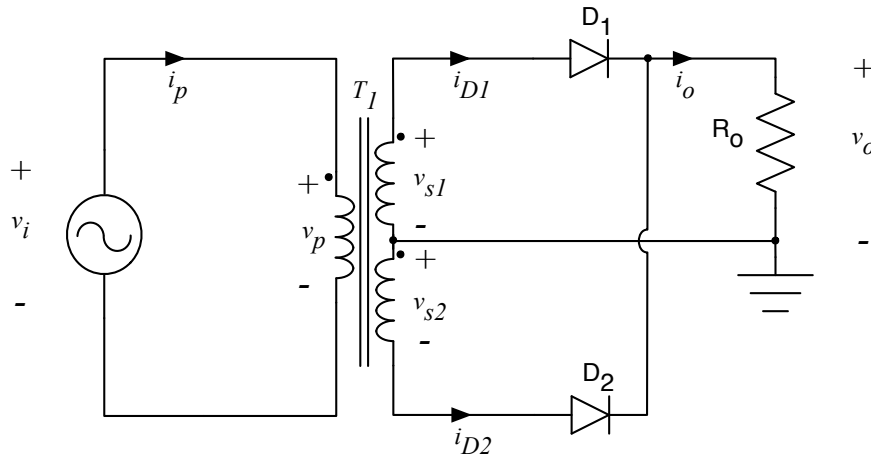


Figura 13 – Circuito para exercício resolvido 02.

A tensão de pico no secundário do transformador e na saída serão:

$$v_{o(pk)} = v_{s1(pk)} = v_{s2(pk)} = \frac{v_{i(pk)}}{N} = \frac{\sqrt{2} \cdot v_{i(ef)}}{N} = \frac{\sqrt{2} \cdot 220}{13} = 23,93 \text{ V}.$$

A tensões média e eficaz na carga serão:

$$V_{o(med)} = 2 \cdot \frac{V_{o(pk)}}{\pi} = 2 \cdot \frac{23,93}{\pi} = 15,23 \text{ V}.$$

$$V_{o(ef)} = \frac{V_{o(pk)}}{\sqrt{2}} = \frac{23,93}{\sqrt{2}} = 16,92 \text{ V}.$$

As correntes serão:

$$I_{o(pk)} = \frac{V_{o(pk)}}{R_o} = \frac{23,93}{5} = 4,79 A.$$

$$I_{o(med)} = \frac{V_{o(med)}}{R_o} = \frac{15,23}{5} = 3,05 A.$$

$$I_{o(ef)} = \frac{V_{o(ef)}}{R_o} = \frac{16,92}{5} = 3,38 A.$$

A potência média na carga é:

$$P_o = R_o \cdot I_{o(ef)}^2 = 5 \cdot 3,38^2 = 58,12 W.$$

ER 03) Repita o exemplo anterior considerando que os diodos não sejam ideais. Escolha um modelo apropriado de diodo para o circuito em questão.

Inicialmente deve-se escolher o diodo correto. Pela corrente média do circuito que é de 3,05 A e a tensão reversa que o diodo deve suportar, que é duas vezes a tensão de pico no secundário do transformador, resultando em 47,86 V, pode-se escolher o modelo MUR410 do fabricante On Semiconductor. Este diodo é para 4 A e 100 V. Sua queda de tensão direta é de 1,05 V quando conduz uma corrente de 3 A, assim:

$$v_{o(pk)} = v_{sl(pk)} - V_F = 23,93 - 1,05 = 22,88 V.$$

$$V_{o(med)} = 2 \cdot \frac{V_{o(pk)}}{\pi} = 2 \cdot \frac{22,88}{\pi} = 14,57 V.$$

$$V_{o(ef)} = \frac{V_{o(pk)}}{\sqrt{2}} = \frac{22,88}{\sqrt{2}} = 16,18 V.$$

As correntes serão:

$$I_{o(pk)} = \frac{V_{o(pk)}}{R_o} = \frac{22,88}{5} = 4,58 A. \quad I_{o(med)} = \frac{V_{o(med)}}{R_o} = \frac{14,57}{5} = 2,91 A.$$

$$I_{o(ef)} = \frac{V_{o(ef)}}{R_o} = \frac{16,18}{5} = 3,24 A.$$

A potência média na carga é:

$$P_o = R_o \cdot I_{o(ef)}^2 = 5 \cdot 3,24^2 = 52,49 W.$$

Exercícios Propostos

EP 01) Considerando o circuito da Figura 12 e que a fonte de alimentação seja de 15 V (eficazes), os diodos são ideais e a carga tem resistência de 5 Ω , determine:

- As tensões de pico, média e eficaz na carga;
- As correntes de pico, média e eficaz na carga;
- A potência média na carga;
- A tensão reversa nos diodos;
- As perdas nos diodos.

EP 02) Considerando o circuito da Figura 12 e que a fonte de alimentação seja de 15 V (eficazes), os diodos são do tipo 1N5402 e a carga tem resistência de 5 Ω , determine:

- As tensões de pico, média e eficaz na carga;
- As correntes de pico, média e eficaz na carga;
- A potência média na carga;
- A tensão reversa nos diodos;
- As perdas nos diodos;
- O rendimento do circuito.

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

EP 04) Determine o rendimento do circuito no exemplo resolvido 02 (ER 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 exemplo resolvido 02 (ER 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 03 (ER 03) no *software* Multisim e compare os resultados obtidos no simulador com os calculados. Comente sobre a queda de tensão direta que foi considerada de 1,05 V para calcular as grandezas do circuito. Este valor é observado no simulador?

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

EP 10) Faça o cálculo térmico para o exemplo 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.

6 Laboratório

6.1 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 carga resistiva.

Em síntese, objetiva-se:

- Simular retificadores monofásicos de onda completa com carga resistiva;
- Analisar retificadores monofásicos de onda completa com carga resistiva;
- Entender o funcionamento dos circuitos retificadores;
- Comparar os resultados de simulação com os valores calculados.

6.2 Retificador de Onda Completa em Ponte com Carga Resistiva

Implemente no simulador o circuito mostrado na Figura 14. A tensão da fonte de alimentação (v_i) será de 21,1 V de pico. O resistor de carga (R_o) será de 10 Ω . Os diodos são ideais.

Anote os valores simulados e calculados na Tabela 4.

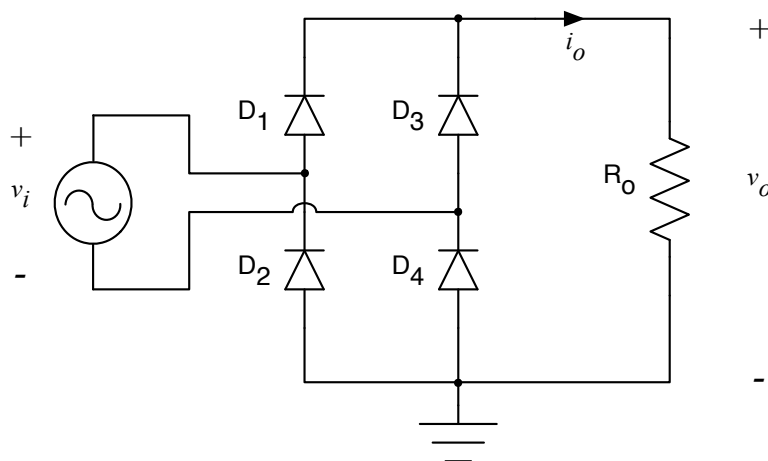


Figura 14 – Circuito do retificador de onda completa em ponte.

Tabela 4 – Resultados para o retificador de onda completa em ponte.

Variável	Descrição	Valor calculado	Valor simulado
$V_{o(pk)}$	Tensão de pico na carga		
$V_{o(avg)}$	Tensão média na carga		
$I_{o(pk)}$	Corrente de pico na carga		
$I_{o(avg)}$	Corrente média na carga		
P_o	Potência média na carga		

6.3 Análise dos Resultados

- 1) Esboce as formas de onda da tensão de entrada e de saída do retificador.
- 2) Os resultados obtidos na simulação condizem com os valores calculados?
- 3) Qual a diferença na tensão de saída em relação ao retificador de meia onda?
- 4) Como se determina o ângulo de bloqueio dos diodos (β)?
- 5) Qual o ângulo de entrada em condução do diodo D_1 ?

7 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-Wilwy, 2003.
- [5] PRESSMAN, A. I. Switching Power Supply Design. New York: McGraw Hill, 1998.
- [6] BARBI, Ivo. Projeto de Fontes Chaveadas. 2ª 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.