

8

Capítulo

Retificadores Monofásicos de Onda Completa com Carga Resistiva-Indutiva

Meta deste capítulo

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

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 onda completa com carga resistiva.

Continuidade

O curso continuará com o estudo de circuitos retificadores monofásicos com filtro capacitivo.

Prof. Clóvis Antônio Petry.

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

1 Introdução

No capítulo anterior foram estudados os retificadores monofásicos de onda completa, onde puderam ser observadas as formas de onda básicas, o princípio de funcionamento, análise teórica e simulações.

Neste capítulo serão estudados os mesmos retificadores de onda completa, mas agora operando com carga mista (resistiva-indutiva), por exemplo, motores de corrente contínua.

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

2 Retificador Monofásico de Onda Completa – Carga RL

2.1 Retificador com Ponto Médio

O conversor ca-cc (retificador) monofásico de onda completa com ponto médio (derivação central) com carga resistiva-indutiva 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 e pela indutância L_o .

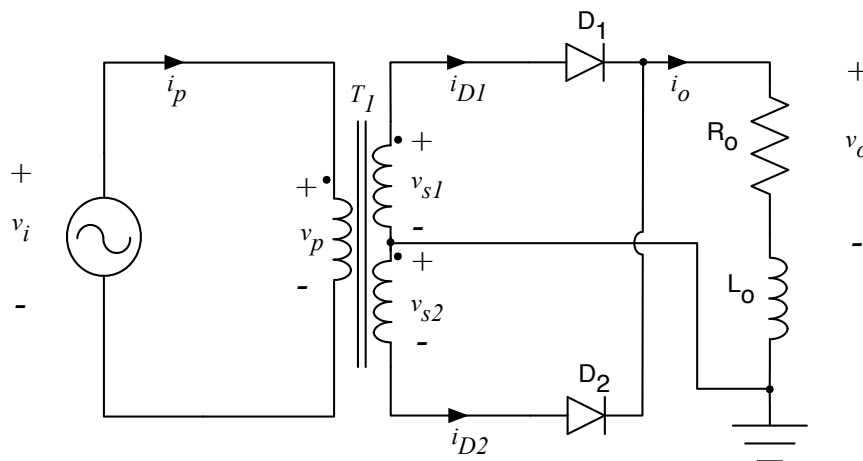


Figura 1 – Retificador monofásico de onda completa com ponto médio com carga resistiva-indutiva.

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.

Note que mesmo a carga sendo mista (resistiva-indutiva), as etapas de funcionamento são semelhantes àsquelas do retificador com carga puramente resistiva, pois o diodo D_2 entra em condução na passagem por zero da tensão no secundário do transformador, evitando que na carga apareça tensão negativa.

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 não é mais uma imagem da tensão, pois a carga é resistiva-indutiva e a presença do indutor altera seu valor de pico (I_{pk}) e seu formato, deixando sua variação mais suave em comparação com o circuito com carga puramente resistiva.

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.

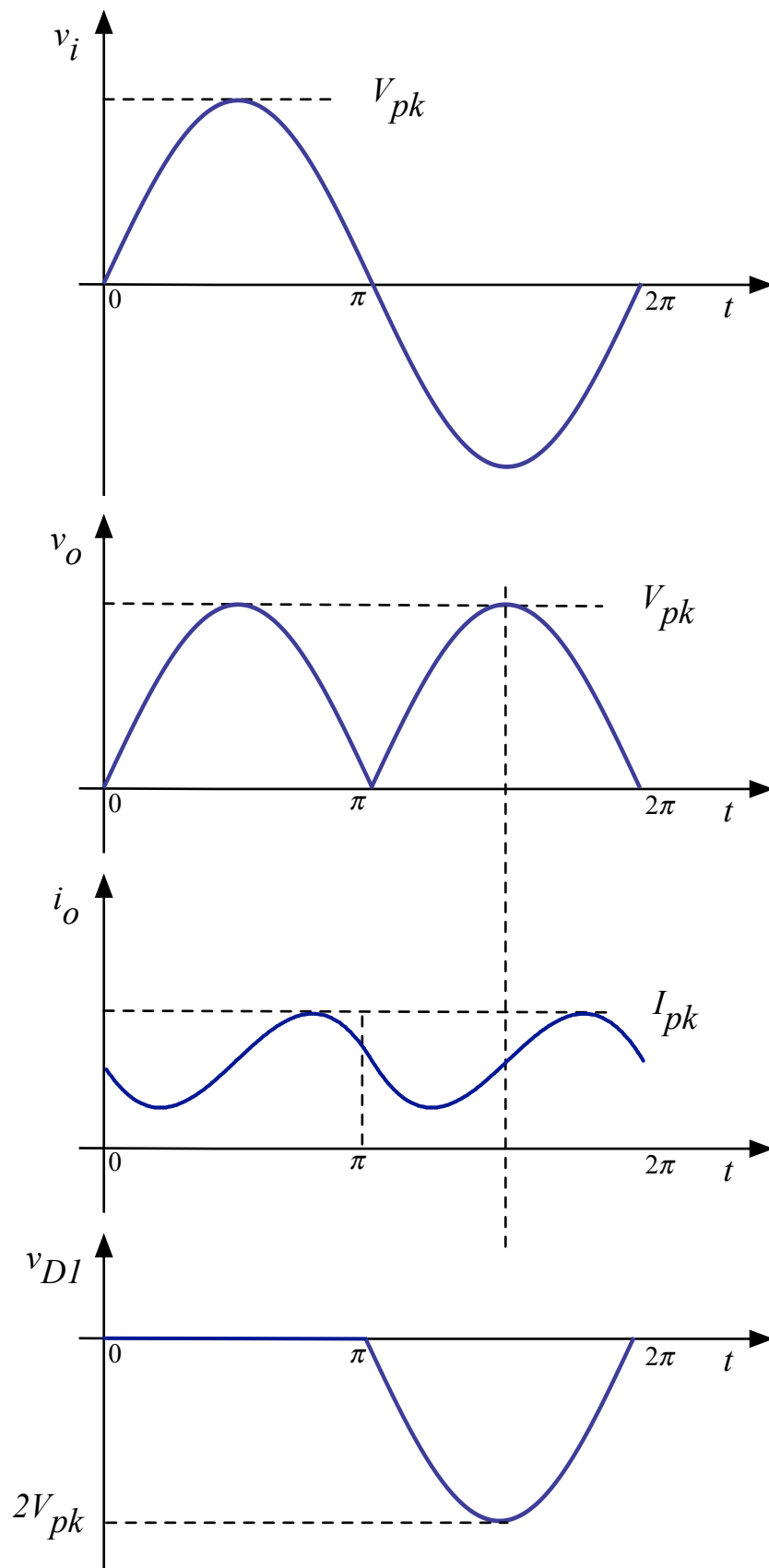


Figura 2 – Principais formas de onda do retificador monofásico de onda completa com ponto médio com carga resistiva-indutiva.

2.2 Retificador Ponte Completa

O conversor ca-cc (retificador) monofásico de onda completa em ponte com carga resistiva-indutiva 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 .

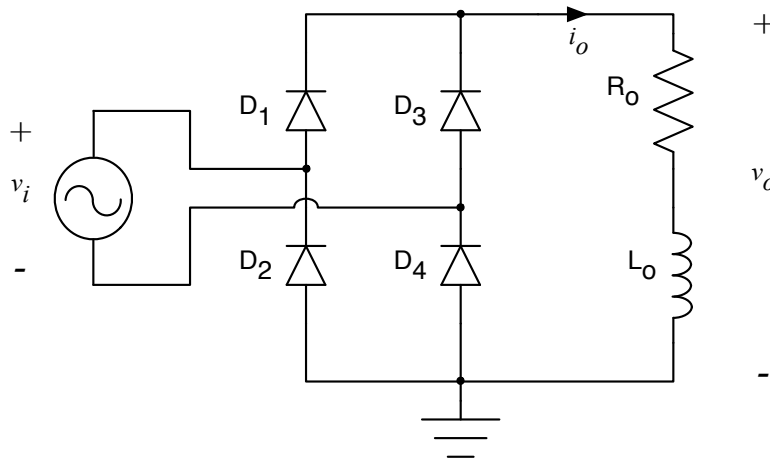


Figura 3 – Retificador monofásico de onda completa em ponte com carga resistiva-indutiva.

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 os 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 não é mais uma imagem da tensão, pois a carga é resistiva-indutiva e a presença do indutor altera seu valor de pico (I_{pk}) e seu formato, deixando sua variação mais suave em comparação com o circuito com carga puramente resistiva.

Por sua vez, a tensão reversa nos diodos possui o mesmo valor de pico da tensão de entrada e aparece no semiciclo negativo, quando estão bloqueados D_1 e D_4 , e no semiciclo positivo ao estarem bloqueados D_2 e D_3 .

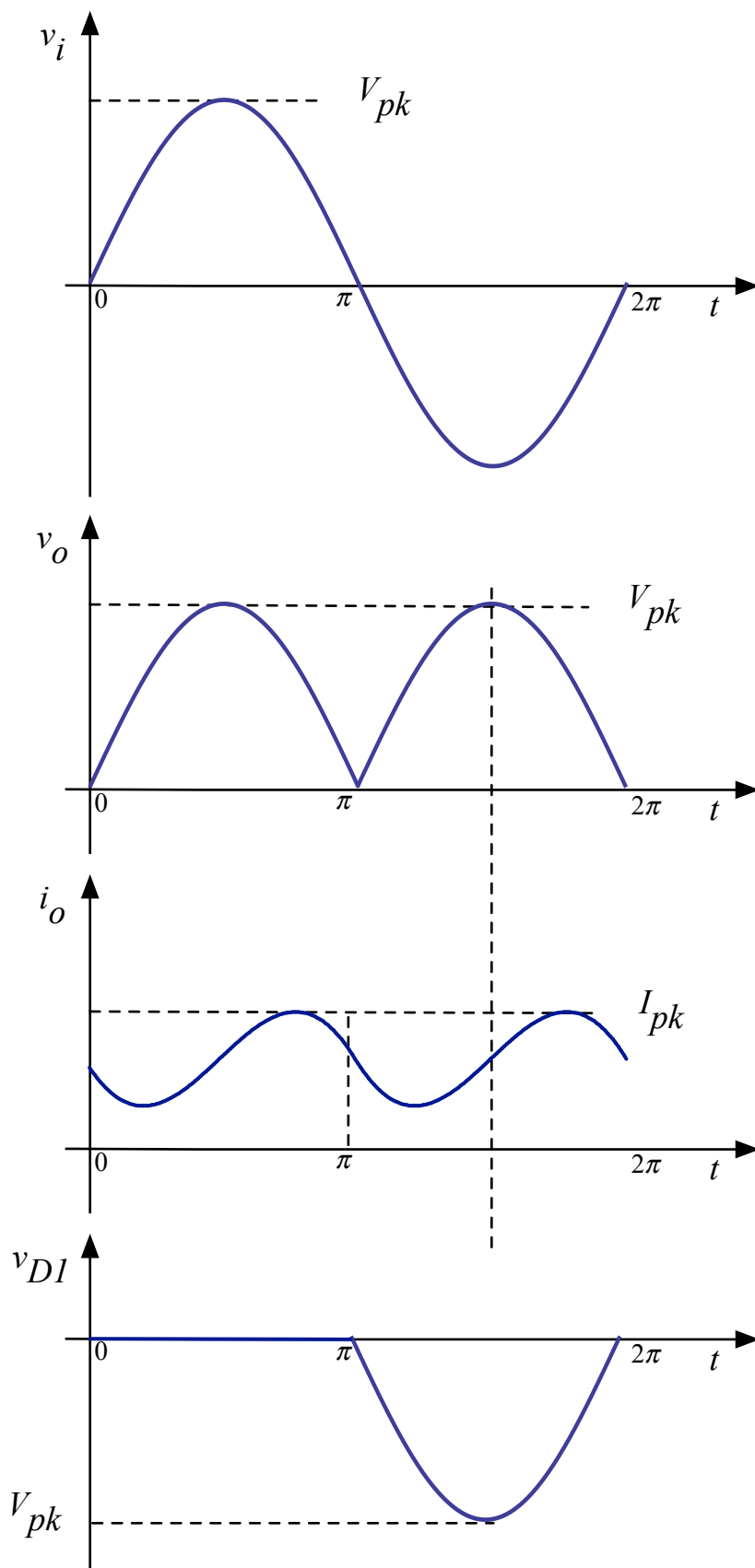


Figura 4 – Principais formas de onda do retificador monofásico de onda completa em ponte com carga resistiva-indutiva.

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 1 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 1, 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:

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

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

Já a corrente eficaz, considerando que o efeito indutivo seja muito maior que o efeito resistivo, será:

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

Por outro lado, se a carga for mista e predominantemente indutiva, pode-se obter a corrente eficaz por:

$$Z_2 = \sqrt{R_o^2 + 4 \cdot \omega^2 \cdot L_o^2};$$

$$I_{o(ef)} \cong \sqrt{\left(\frac{4 \cdot V_{pk}^2}{\pi^2 \cdot R_o^2} + \frac{8 \cdot V_{pk}^2}{9 \cdot \pi^2 \cdot Z_2^2} \right)}.$$

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 média e eficaz, 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, além disso, a indutância será considerada muito maior que a resistência, isto é, circuito predominantemente indutivo, portanto:

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

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

A corrente na carga é considerada contínua, assim:

$$i_o = I_o = I_{o(med)} = I_{o(pk)} = I_{o(ef)}.$$

A potência média na carga será:

$$P_o = V_{o(med)} \cdot I_{o(med)}.$$

Lembrando que a tensão média na carga é:

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

A corrente em cada secundário, no caso do retificador de onda completa com ponto médio, será:

$$I_{s1(ef)} = I_{s2(ef)} = I_{D1(ef)} = I_{D2(ef)} = \frac{I_o}{\sqrt{2}}.$$

Já a potência aparente na entrada (rede) será:

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

Assim, usando:

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

A potência aparente na entrada será:

$$S_i = V_{i(ef)} \cdot I_{o(ef)} = \frac{V_{o(med)} \cdot \pi}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot I_o = 1,11 \cdot V_{o(med)} \cdot I_o = 1,11 \cdot P_o.$$

Finalmente pode-se obter o fator de potência:

$$FP = \frac{P_o}{S_i} = \frac{1}{1,11};$$

$$FP = 0,99.$$

O fator de potência dos retificadores de onda completa (com ponto médio e em ponte) é praticamente unitário, o que denota que estas estruturas tem desempenho interessante deste ponto de vista.

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:

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

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

$$P_{CA} = 2 \cdot V_{i(ef)} \cdot I_{i(ef)}.$$

Mas, sabe-se que:

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

$$I_{s1(ef)} = I_{s2(ef)} = I_{D1(ef)} = I_{D2(ef)} = \frac{I_o}{\sqrt{2}}.$$

Então:

$$P_{CA} = 2 \cdot V_{i(ef)} \cdot I_{i(ef)} = 2 \cdot \frac{V_{o(med)} \cdot \pi}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{I_o}{\sqrt{2}} = \frac{\pi}{2} \cdot V_{o(med)} \cdot I_o = \frac{\pi}{2} \cdot P_{CC}.$$

Portanto, o fator de conversão será:

$$FC = \frac{P_{CC}}{P_{CA}} = \frac{2}{\pi};$$

$$FC = 0,64.$$

Em outras palavras, isso significa que apenas 64% da potência disponibilizada pela fonte é aproveitada na saída. É o mesmo que dizer que a potência na entrada deve ser $1/0,64 \approx 1,57$ vezes a potência desejada na saída, ou em outras palavras, que o transformador deverá ter 1,57 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}) é dada por:

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

No lado da fonte, a potência será:

$$P_{CA} = V_{i(ef)} \cdot I_{i(ef)}.$$

Mas, sabe-se que:

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

$$I_{s(ef)} = I_o.$$

Então:

$$P_{CA} = V_{i(ef)} \cdot I_{i(ef)} = \frac{V_{o(med)} \cdot \pi}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot I_o = 1,11 \cdot V_{o(med)} \cdot I_o = 1,11 \cdot P_{CC}.$$

Portanto, o fator de conversão será:

$$FC = \frac{P_{CC}}{P_{CA}} = \frac{1}{1,11};$$

$$FC = 0,9.$$

Em outras palavras, isso significa que 90% da potência disponibilizada pela fonte é aproveitada na saída. É o mesmo que dizer que a potência na entrada deve ser $1/0,9 \approx 1,11$ vezes a potência desejada na saída, ou em outras palavras, que o transformador deverá ter 1,11 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 mista (resistiva-indutiva) 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 mista com uma resistência de 10Ω e indutância de 10 mH. 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, onde pode-se observar o transitório de partida, com a corrente na carga aumentando de zero até seu valor nominal. Os detalhes destas formas de onda são mostrados na Figura 7. 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.

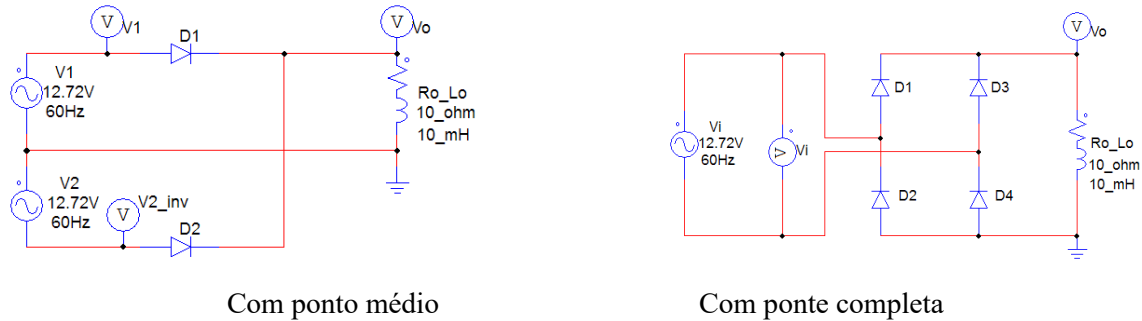


Figura 5 – Circuitos simulados no Psim.

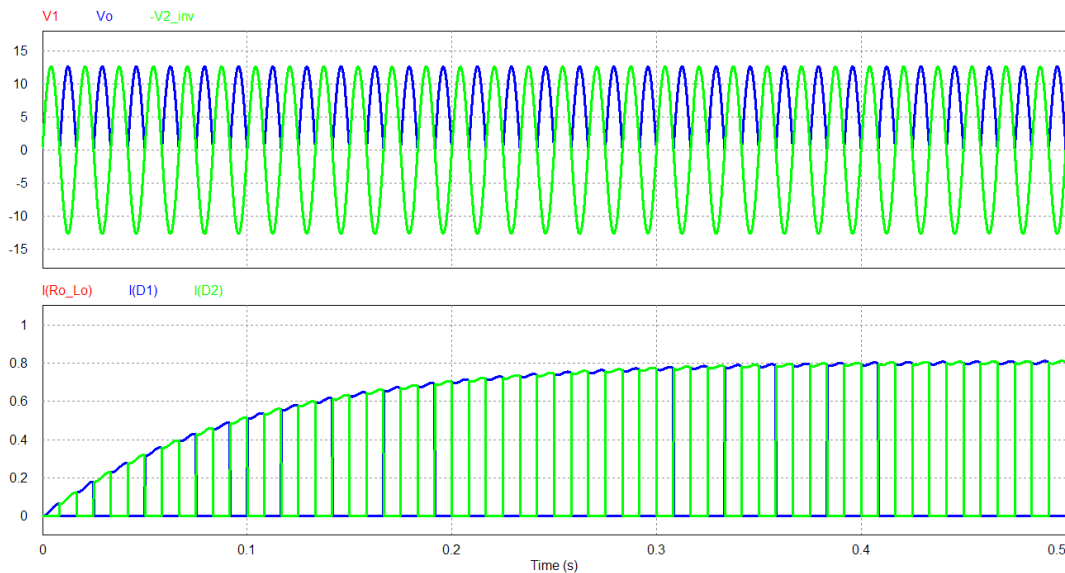


Figura 6 – Principais formas de onda do retificador com ponto médio.

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	8,11 V
$I_{o(pk)}$	Corrente de pico na carga	0,81 A	0,81 A
$I_{o(avg)}$	Corrente média na carga	0,81 A	0,81 A
P_o	Potência média na carga	6,56 W	6,57 W

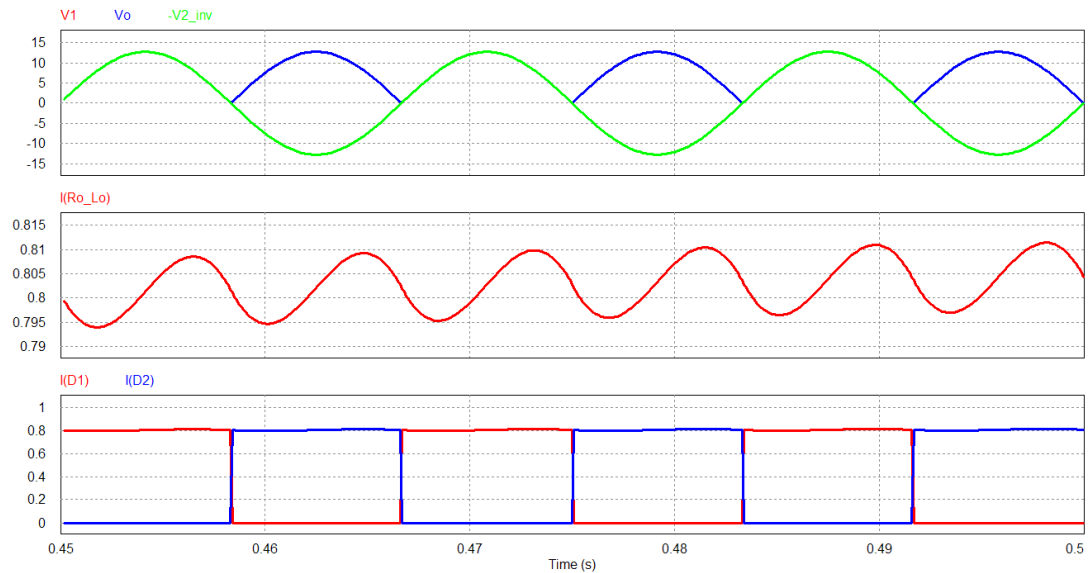


Figura 7 – Detalhes das principais formas de onda do retificador com ponto médio.

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 8.

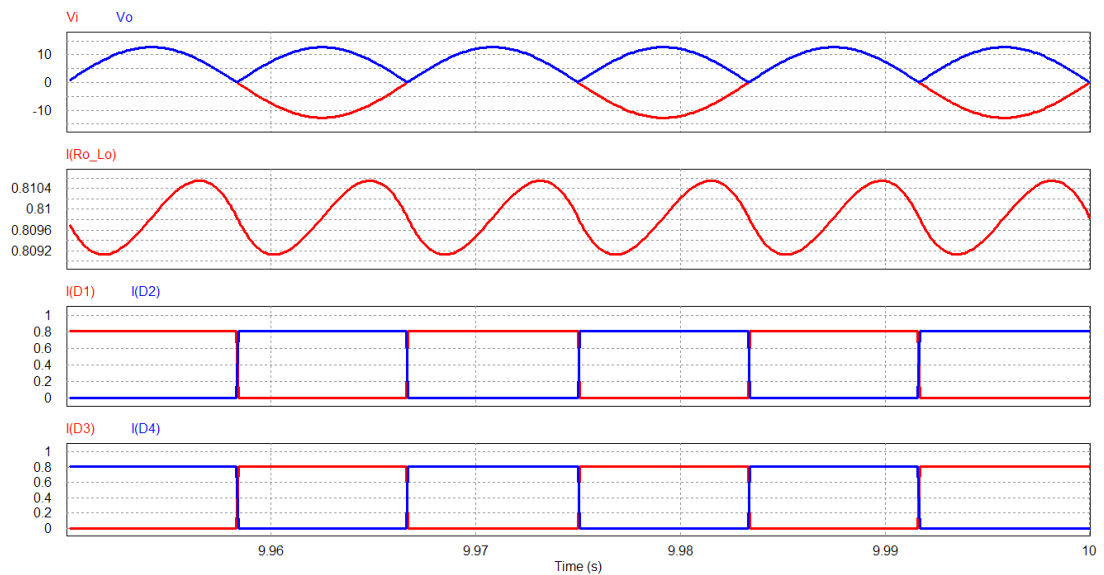


Figura 8 – Principais formas de onda do retificador de onda completa em ponte.

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	8,11 V
$I_{o(pk)}$	Corrente de pico na carga	0,81 A	0,81 A
$I_{o(avg)}$	Corrente média na carga	0,81 A	0,81 A
P_o	Potência média na carga	6,56 W	6,57 W

Note pela Figura 8 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 9. 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 mista e tem resistência de $10\ \Omega$ e indutância de 10 mH. 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 10. Note que agora se percebe claramente a queda de tensão apresentada pelos diodos, 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.

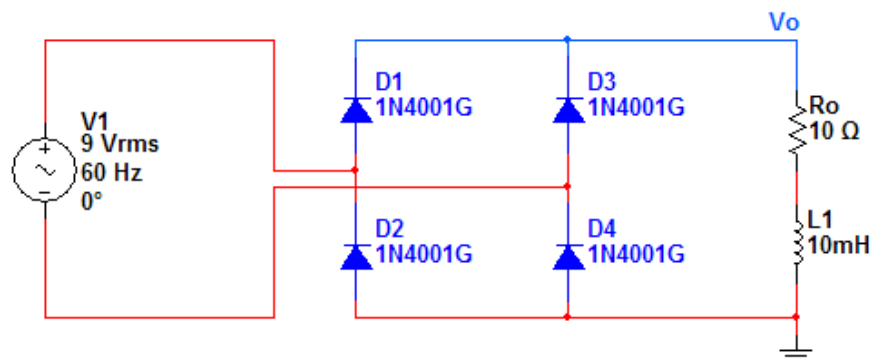


Figura 9 – Circuito simulado no Multisim.

Tabela 3 – Resultados para o retificador de meia onda.

Variável	Descrição	Valor calculado	Valor simulado
$V_{o(pk)}$	Tensão de pico na carga	12,73 V	10,92 V
$V_{o(avg)}$	Tensão média na carga	8,10 V	6,50 V
$I_{o(pk)}$	Corrente de pico na carga	0,81 A	1,00 A
$I_{o(avg)}$	Corrente média na carga	0,81 A	0,34 A
P_o	Potência média na carga	6,56 W	5,0 W

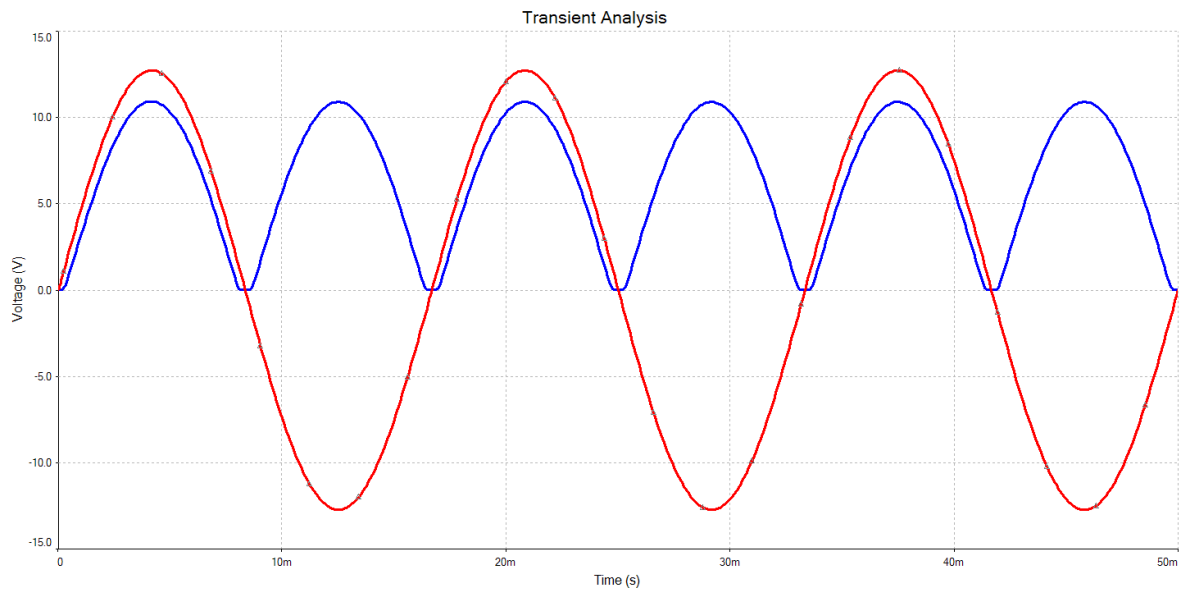


Figura 10 – Formas de onda da tensão de entrada e saída do retificador em ponte.

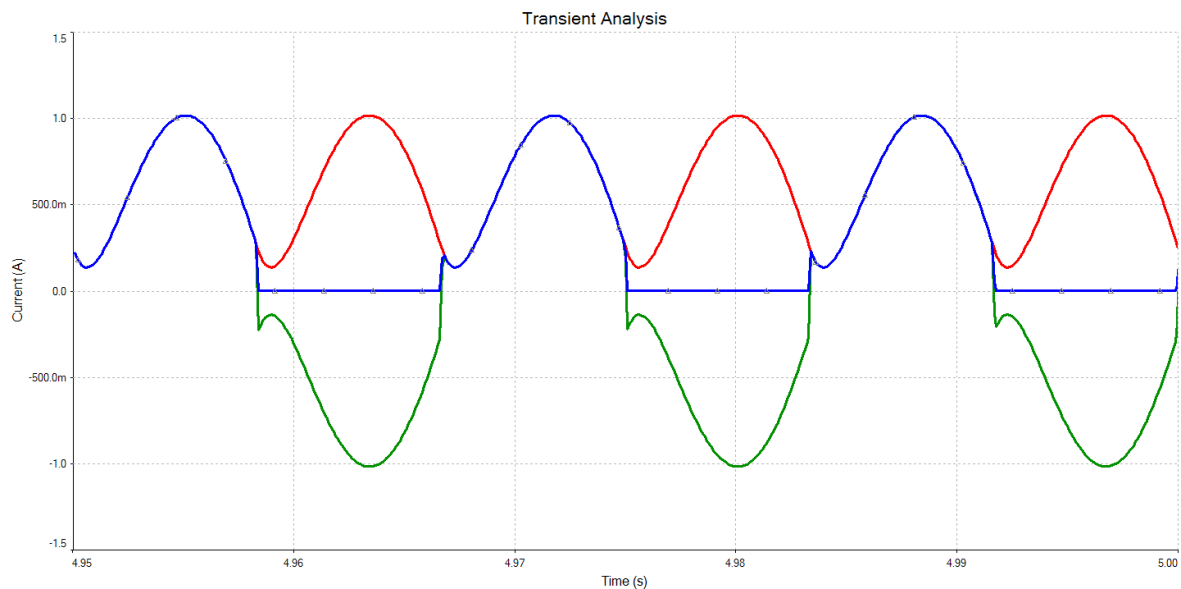


Figura 11 – Formas de onda da corrente de entrada, na saída e no diodo D_1 do retificador em ponte.

As formas de onda das correntes no circuito são mostradas na Figura 11. Note que a corrente apresenta uma pequena distorção na passagem por zero. Isso ocorre devido a queda de tensão nos diodos.

As formas de onda da tensão e corrente na carga são mostradas na Figura 12. Note a ondulação na corrente da carga e seu formato mostrando condução contínua, isto é, a corrente sempre é maior que zero, devido a característica indutiva da carga.

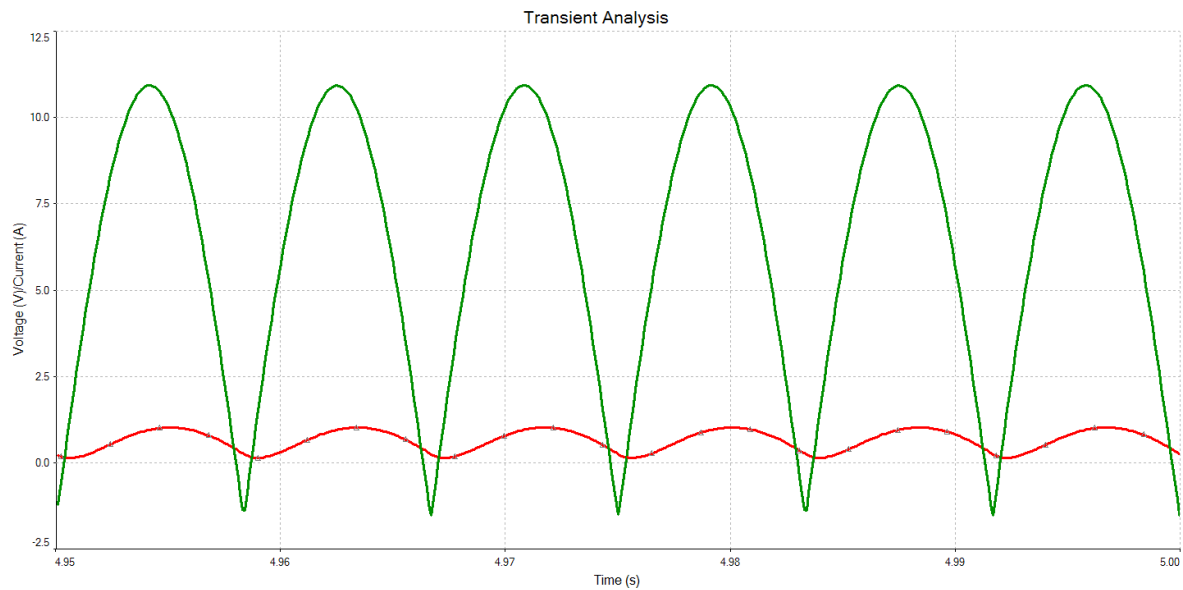


Figura 12 – Formas de onda da tensão e corrente na carga.

5 Exercícios

Exercícios Resolvidos

ER 01) Considerando o circuito da Figura 13 e que a fonte de alimentação seja de 12 V (eficazes), os diodos são ideais e a carga tem resistência de $5\ \Omega$ e indutância de 10 mH, determine:

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

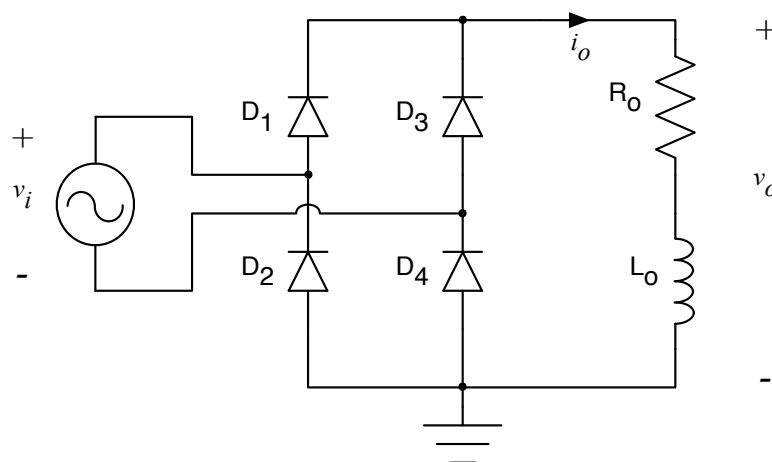


Figura 13 – Circuito para exercício resolvido 01.

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

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

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

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

As correntes na carga serão determinadas por:

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

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

Para determinar a corrente eficaz, inicialmente verifica-se a carga é predominantemente indutiva:

$$|Z_{Lo}| = \omega \cdot L_o = 2 \cdot \pi \cdot F \cdot L_o = 2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 10m = 3,77 \Omega.$$

Assim, a reatância indutiva tem valor de $3,77 \Omega$, enquanto a resistência tem valor de 5Ω . Portanto a carga é mista, não sendo predominantemente indutiva nem resistiva. Então, a corrente eficaz será dada por:

$$Z_2 = \sqrt{R_o^2 + 4 \cdot \omega^2 \cdot L_o^2} = \sqrt{5^2 + 4 \cdot 3,77^2 \cdot 10m^2} = 9 \Omega;$$

$$I_{o(ef)} \cong \sqrt{\left(\frac{4 \cdot V_{pk}^2}{\pi^2 \cdot R_o^2} + \frac{8 \cdot V_{pk}^2}{9 \cdot \pi^2 \cdot Z_2^2} \right)} = \sqrt{\left(\frac{4 \cdot 16,97^2}{\pi^2 \cdot 5^2} + \frac{8 \cdot 16,97^2}{9 \cdot \pi^2 \cdot 9^2} \right)} = 2,23 A.$$

Note que a corrente eficaz é parecida com a média.

A potência média na carga é:

$$P_o = V_{o(med)} \cdot I_{o(med)} = 10,80 \cdot 2,16 = 23,33 W.$$

ER 02) Considerando o circuito da Figura 14 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 5Ω e indutância de 100 mH, determine:

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

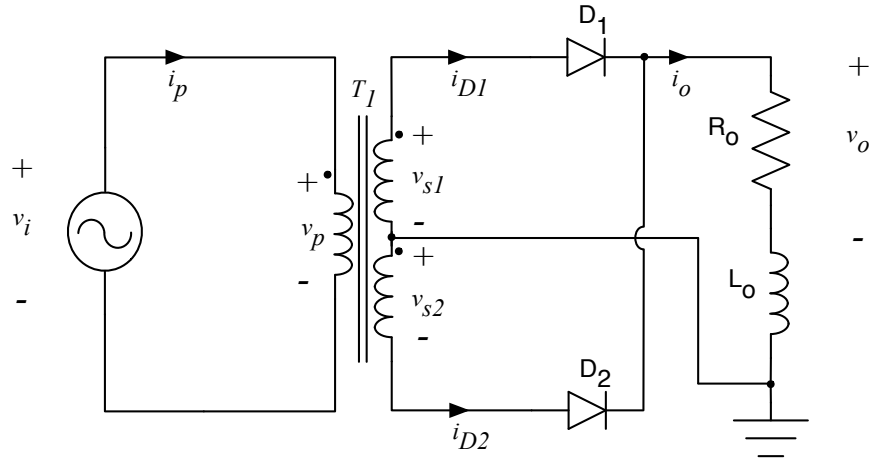


Figura 14 – Circuito para exercício resolvido 02.

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

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

A tensões média e eficaz na carga serão:

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

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

Inicialmente verifica-se a carga é predominantemente indutiva:

$$|Z_{Lo}| = \omega \cdot L_o = 2 \cdot \pi \cdot F \cdot L_o = 2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 100m = 37,7\Omega.$$

Assim, a reatância indutiva tem valor de $37,7\Omega$, enquanto a resistência tem valor de 5Ω .

Portanto a carga pode ser considerada predominantemente indutiva e assim as correntes serão:

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

A potência média na carga é:

$$P_o = V_{o(med)} \cdot I_{o(med)} = 15,23 \cdot 3,05 = 46,45W.$$

Exercícios Propostos

EP 01) Considerando o circuito da Figura 13 e que a fonte de alimentação seja de 15 V (eficazes), os diodos são ideais e a carga tem resistência de 5 Ω e indutância de 50 mH, 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 13 e que a fonte de alimentação seja de 15 V (eficazes), o diodo é o 1N5402 e a carga tem resistência de 5 Ω e indutância de 150 mH, 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 02 (ER 02) no *software* Multisim e compare os resultados obtidos no simulador com os calculados.

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-indutiva.

Em síntese, objetiva-se:

- Simular retificadores monofásicos de onda completa com carga resistiva-indutiva;
- Analisar retificadores monofásicos de onda completa com carga resistiva-indutiva;
- 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 RL

Implemente no simulador o circuito mostrado na Figura 15. 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 e a indutância de carga (L_o) será de 10 mH. Os diodos são ideais.

Anote os valores simulados e calculados na Tabela 4.

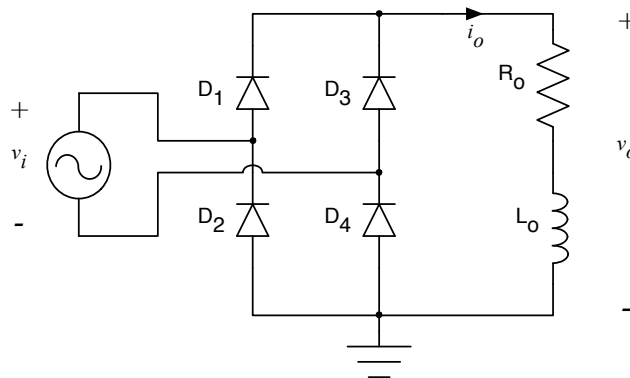


Figura 15 – Circuito do retificador de onda completa em ponte.

Tabela 4 – Resultados para o retificador de onda completa.

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) Determine o valor eficaz da tensão de saída.
- 5) Determine o valor eficaz da corrente de saída.

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.