

6

Capítulo

Retificadores Monofásicos de Meia Onda com Carga Resistiva-Indutiva

Meta deste capítulo

Estudar os conversores ca-cc monofásicos 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 meia onda com carga resistiva.

Continuidade

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

1 Introdução

O capítulo anterior desta apostila versou sobre os retificadores monofásicos não-controlados operando com carga puramente resistiva. Neste capítulo serão estudados os mesmos retificadores, mas agora operando com carga mista, ou seja, resistiva-indutiva.

A alteração da carga confere novas características ao conversor em estudo, modificando as formas de onda da tensão e da corrente de saída. O cálculo dos valores médios será realizado de modo diferente, sendo necessário consultar um gráfico (ábaco) para se obter alguns parâmetros importantes do circuito.

As cargas com características resistiva-indutivas são muito comuns, pois um motor é justamente este tipo de carga. Um exemplo de motor de corrente contínua de baixa tensão (24 V) é mostrado na Figura 1. Assim, circuitos para acionamento de motores de corrente contínua a partir da rede de energia alternada são exemplos típicos de retificadores operando com carga mista.

Assim, neste capítulo será apresentado o funcionamento do retificador, suas formas de onda, equacionamento, simulação, exercícios resolvidos e propostos e por fim atividades de laboratório.



Figura 1 – Exemplo de motor de corrente contínua.

2 Retificador Monofásico de Meia Onda – Carga RL

O conversor ca-cc (retificador) monofásico de meia onda com carga mista resistiva-indutiva é um circuito simples, conforme pode ser observado na Figura 2. A tensão de entrada é representada pela fonte de tensão alternada (v_i), o diodo retificador é D_1 e a carga é formada pela resistência R_o e pela indutância L_o .

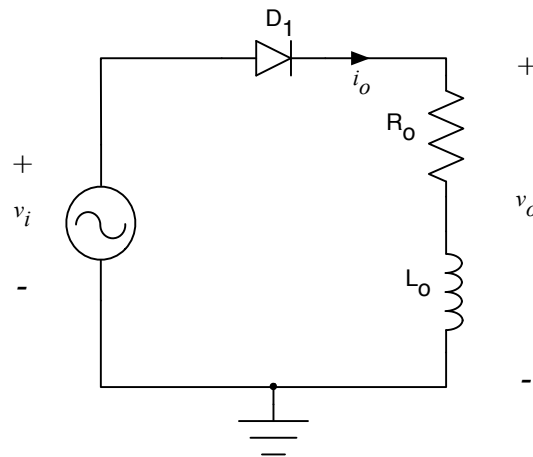


Figura 2 – Retificador monofásico de meia onda com carga resistiva-indutiva.

Este conversor tem duas etapas de funcionamento, quais sejam:

1ª Etapa – Semiciclo positivo da tensão de entrada, $v_i > 0$, o diodo conduz e a tensão de entrada é aplicada na carga. A corrente flui da fonte para a carga, mas com atraso devido à presença da indutância na carga. Esta etapa dura até a corrente no indutor se anular, o que ocorre no instante β . Note que a tensão na carga atinge valores negativos;

2ª Etapa – Semiciclo negativo da tensão de entrada, $v_i < 0$, após o instante β , o diodo está bloqueado e a tensão na carga é zero.

Assim, verifica-se que a tensão de entrada alimenta a carga no semiciclo positivo e parte do semiciclo negativo. As formas de onda da tensão de entrada, na carga, corrente na carga e tensão sobre o diodo são mostradas na Figura 3.

A tensão de saída apresenta o mesmo valor de pico do que a tensão de entrada, visto que está se considerando que o diodo é ideal. No entanto, a tensão de saída atinge valores negativos, pois o diodo continua a conduzir mesmo após a passagem por zero. A corrente, atrasada em relação à tensão, se anula no instante β .

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 no diodo possui o mesmo valor de pico da tensão de entrada e aparece no semiciclo negativo, quando o mesmo está bloqueado.

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.

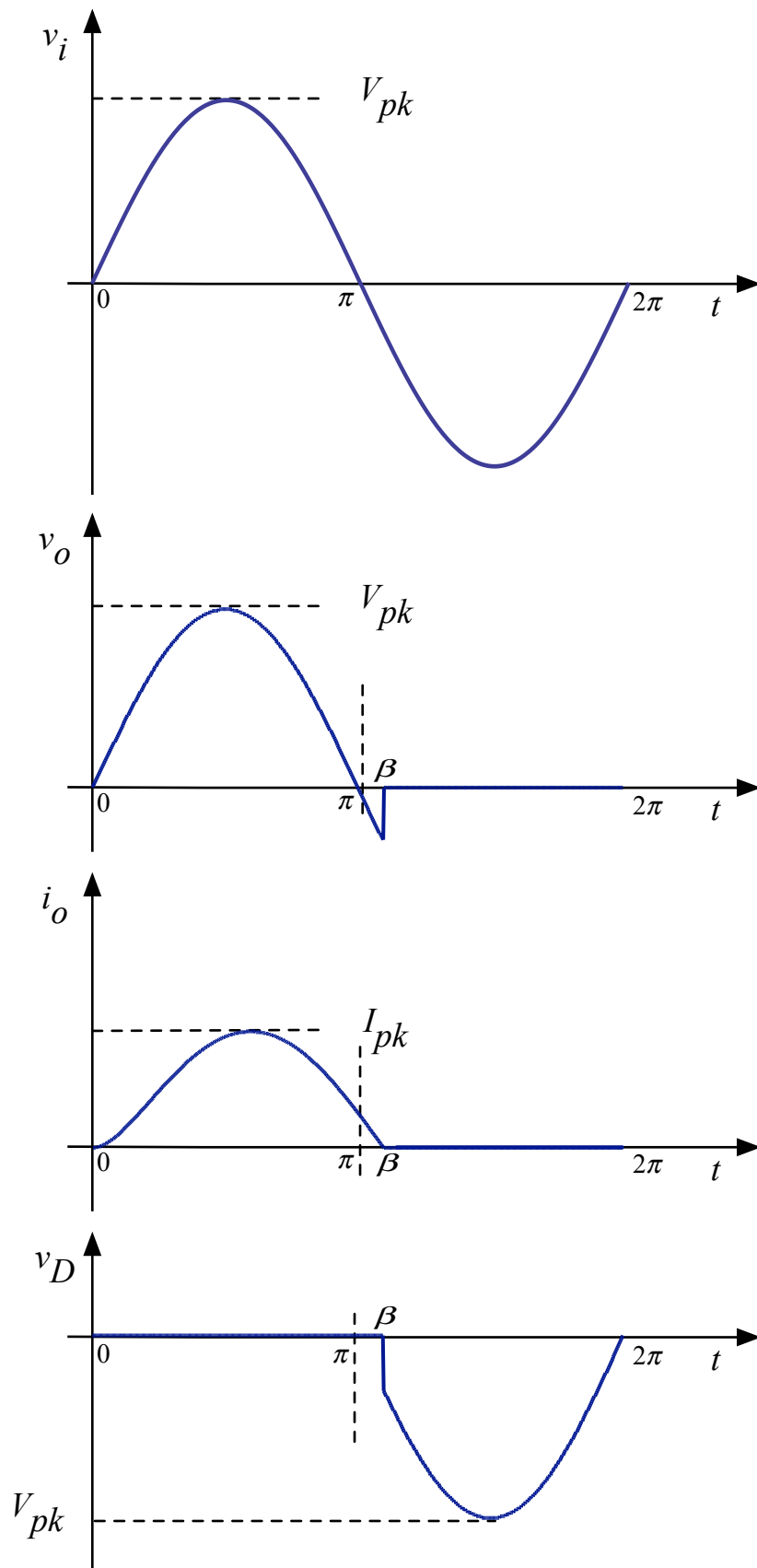


Figura 3 – Principais formas de onda do retificador monofásico de meia onda com carga resistiva-indutiva.

3 Análise do Retificador em Estudo

A seguir será realizada a análise do retificador 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 3 pelo seu valor de pico (V_{pk}). Seus valores médio e eficaz (RMS) são:

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

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

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 é obtida por:

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

$$V_{o(med)} = \frac{V_{o(pk)}}{2\pi} \cdot (1 - \cos(\beta)) = \frac{V_{pk}}{2\pi} \cdot (1 - \cos(\beta)).$$

Para se determinar o ângulo β é necessário consultar a Figura 4. Assim, deve determinar o ângulo da carga (Φ) como:

$$\tan(\phi) = \frac{\omega \cdot L_o}{R_o},$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\omega \cdot L_o}{R_o} \right).$$

A partir daí, com o valor de Φ pode consultar o ábaco (Figura 4) e obter o valor de β . Note que β pode assumir valores maiores que 180° e menores que 360° .

$$180^\circ \leq \beta \leq 360^\circ.$$

A tensão eficaz na saída é obtida por:

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

$$V_{o(ef)} = \frac{V_{o(pk)}}{2} \cdot \sqrt{\frac{\beta - \cos(\beta) \cdot \text{sen}(\beta)}{\pi}} = \frac{V_{pk}}{2} \cdot \sqrt{\frac{\beta - \cos(\beta) \cdot \text{sen}(\beta)}{\pi}}.$$

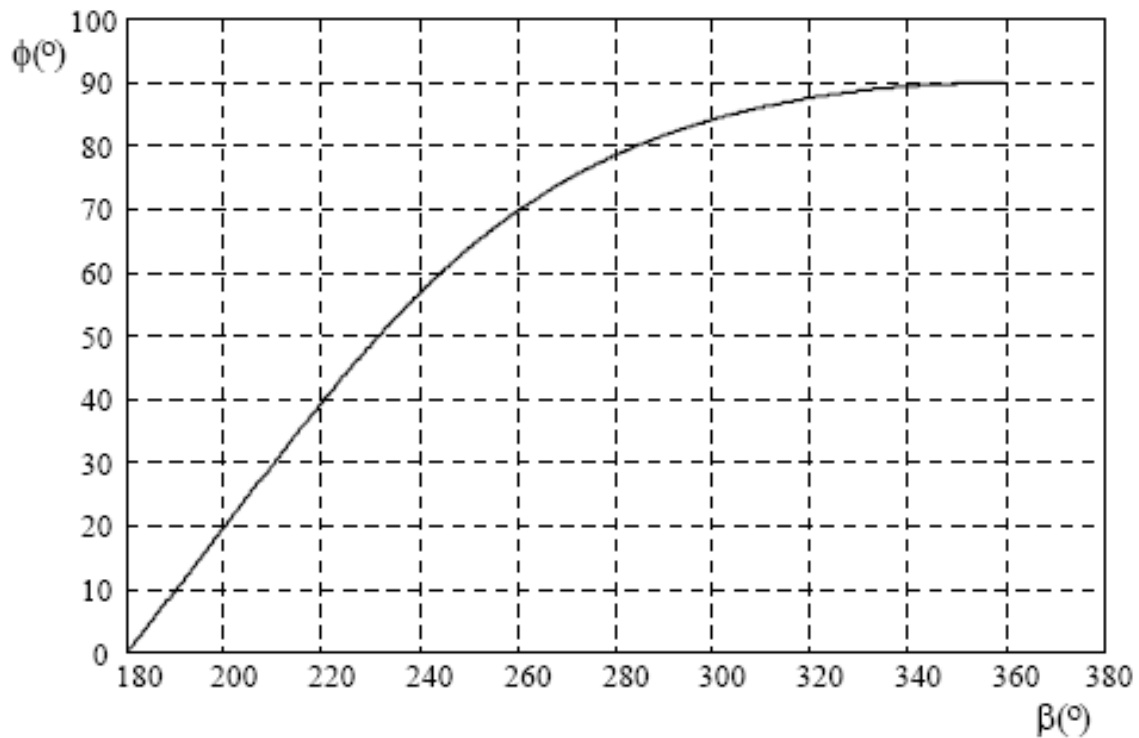


Figura 4 – Gráfico da curva que relaciona os ângulo Φ e β .

Fonte: (Barbi, 2005).

3.2 Correntes na Saída

As correntes na carga são obtidas diretamente a partir das tensões na carga:

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

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

$$I_{o(ef)} = \frac{V_{o(pk)}}{Z_o} \cdot I_{ef}.$$

Onde a corrente eficaz parametrizada (I_{ef}) é obtida de Figura 5 e a impedância da carga é:

$$Z_o = \sqrt{R_o^2 + (\omega \cdot L_o)^2} .$$

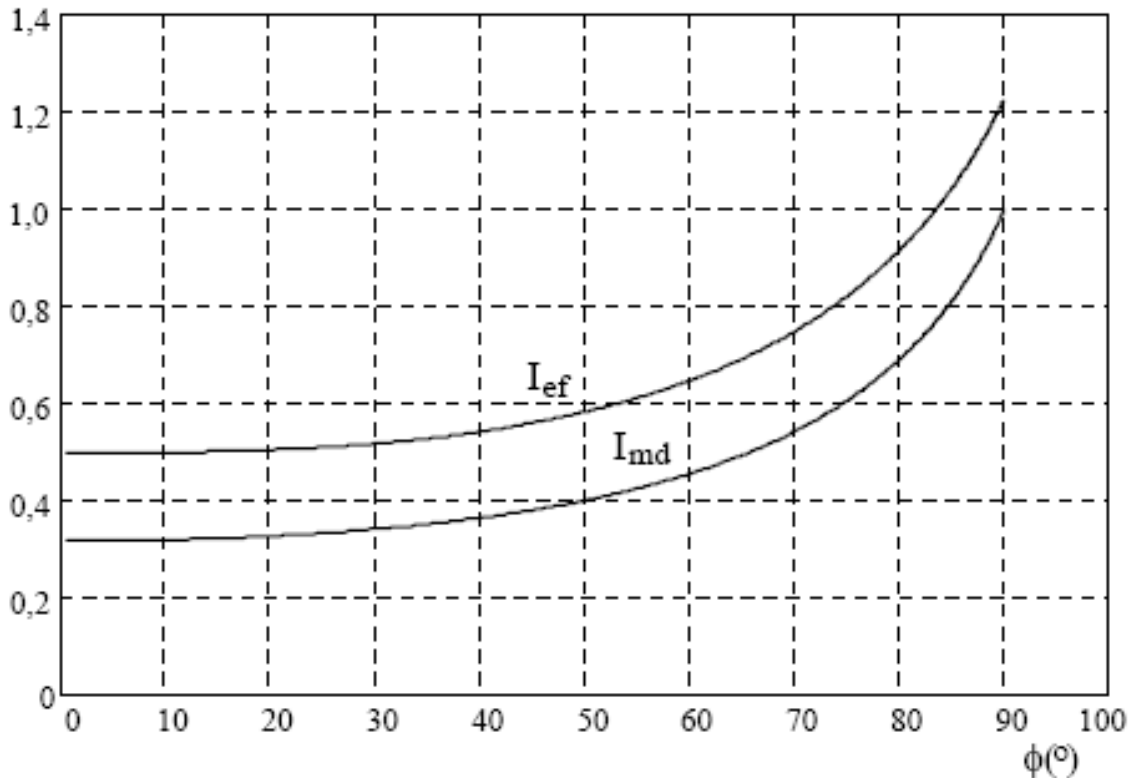


Figura 5 – Gráfico da curva que relaciona o ângulo Φ e as correntes média e eficaz.

Fonte: (Barbi, 2005).

3.3 Esforços de Corrente e Tensão no Diodo

A tensão reversa máxima no diodo D_1 é igual ao pico da tensão de entrada:

$$V_{D1(RRM)} = V_{pk} .$$

Já as correntes no diodo são iguais às da carga:

$$I_{D1(pk)} = I_{o(pk)} .$$

$$I_{D1(med)} = I_{o(med)} .$$

$$I_{D1(ef)} = I_{o(ef)} .$$

3.4 Fator de Potência da Estrutura

Em virtude da corrente eficaz ser dependente do ângulo de condução do diodo (β) torna-se complicado determinar a potência aparente na entrada e por conseguinte, o fator de potência da

estrutura. Por isso, este estudo não será apresentado aqui.

3.5 Fator de Conversão da Estrutura

Do mesmo modo que para o fator de potência, o fator de conversão também é dependente do ângulo de condução do diodo, por isso também não será apresentado aqui.

4 Retificador Monofásico de Meia Onda com Diodo de Roda-Livre – Carga RL

O conversor ca-cc (retificador) monofásico de meia onda com diodo de roda-livre com carga mista resistiva-indutiva é mostrado na Figura 6. A tensão de entrada é representada pela fonte de tensão alternada (v_i), o diodo retificador é D_1 e o diodo de roda-livre é o D_2 , a carga é formada pela resistência R_o e pela indutância L_o .

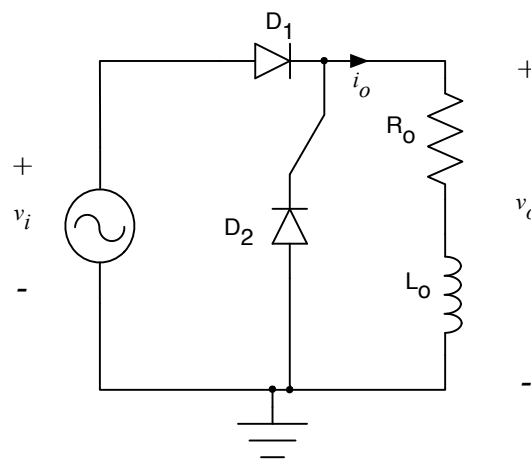


Figura 6 – Retificador monofásico de meia onda com diodo de roda-livre e carga resistiva-indutiva.

Este conversor pode ter duas ou três etapas de funcionamento, quais sejam:

1ª Etapa – Semiciclo positivo da tensão de entrada, $v_i > 0$, o diodo conduz e a tensão de entrada é aplicada na carga. A corrente flui da fonte para a carga pelo diodo D_1 , mas com atraso devido à presença da indutância na carga;

2ª Etapa – Semiciclo negativo da tensão de entrada, $v_i < 0$, na passagem por zero, a corrente não é nula, mas o diodo D_2 é polarizado diretamente, entrando em condução e assumindo toda a corrente da carga. O diodo D_1 bloqueia forçadamente. A corrente da carga, circulando em roda-livre por D_2 , começa a diminuir, podendo se tornar nula antes do novo ciclo (360°). Neste caso haverá um ângulo β e a terceira etapa (a seguir). Se a corrente não zerar antes do novo ciclo,

então D_2 não deixará de conduzir e não se tem a terceira etapa;

3ª Etapa – Semiciclo negativo da tensão de entrada, $v_i > 0$, a corrente será nula, caso o valor da indutância seja pequeno. O diodo D_2 deixou de conduzir no instante β , que tem valor maior que 180° e menor que 360° .

A tensão de saída terá apenas valores positivos, pois agora o diodo D_2 não permitirá que a tensão na carga assuma valores negativos. As formas de onda da tensão de entrada, na carga, corrente na carga e tensão sobre o diodo são mostradas na Figura 8.

A tensão de saída apresenta o mesmo valor de pico do que a tensão de entrada, visto que está se considerando que o diodo é ideal. A corrente, atrasada em relação à tensão, se anula no instante β , caracterizando a presença da terceira etapa.

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 no diodo possui o mesmo valor de pico da tensão de entrada e aparece no semiciclo negativo, quando o mesmo está bloqueado.

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.

Se a indutância for grande, levando a grande reatância indutiva, comparativamente com a resistência do circuito, então a corrente pode assumir formato praticamente contínuo, como mostrado na Figura 7. Neste caso algumas simplificações na análise do circuito podem ser consideradas. A diferença entre o valor máximo da corrente (I_{max}) e seu valor mínimo (I_{min}) é denominada de ondulação (*ripple*) de corrente:

$$\Delta I = I_{max} - I_{min} .$$

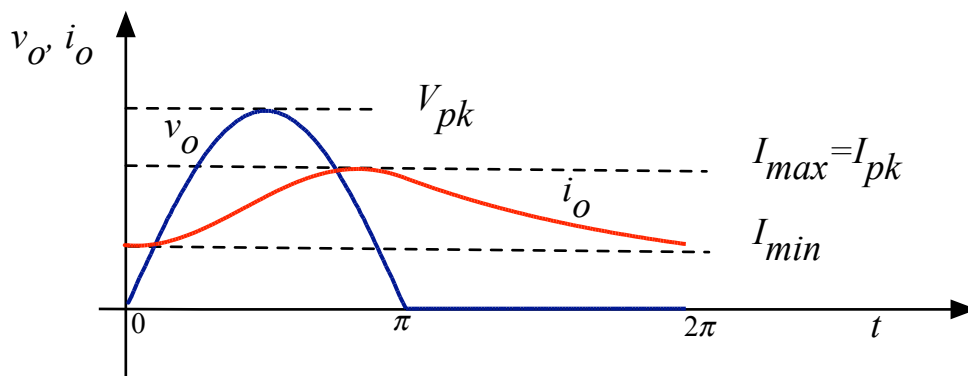


Figura 7 – Forma de onda da corrente na carga, se a indutância for grande.

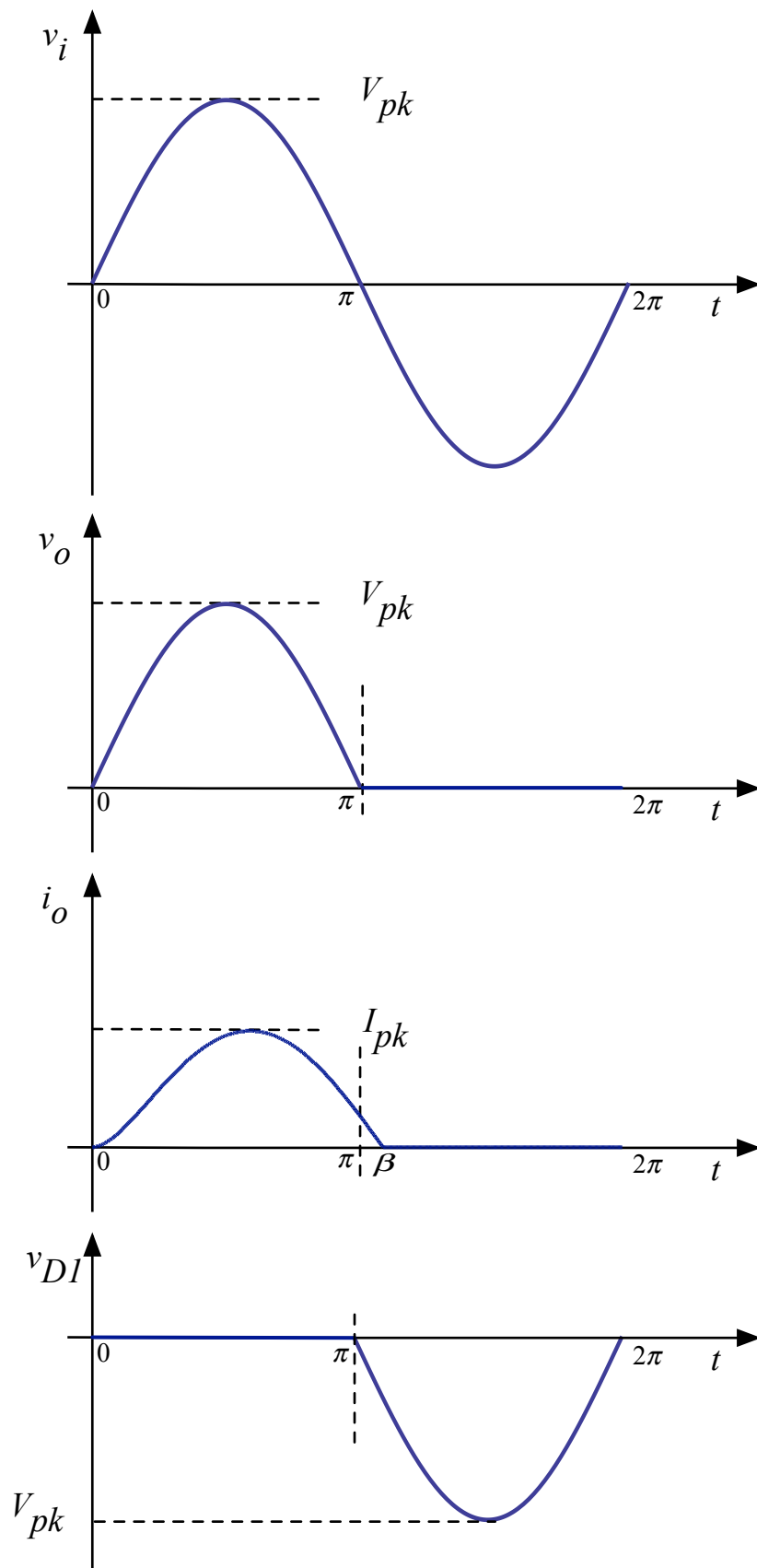


Figura 8 – Principais formas de onda do retificador monofásico de meia onda com diodo de roda-livre e carga resistiva-indutiva. Neste caso a indutância é pequena, levando a um pequeno valor de β .

5 Análise do Retificador em Estudo

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

5.1 Tensões na Saída

A tensão de entrada (v_i) está representada na Figura 8 pelo seu valor de pico (V_{pk}). Seus valores médio e eficaz (RMS) são:

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

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

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 é obtida por:

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

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

A tensão eficaz na saída é obtida por:

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

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

5.2 Correntes na Saída

As correntes na carga são obtidas diretamente a partir das tensões na carga:

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

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

A corrente eficaz pode ser aproximada pela relação a seguir, desde que a indutância seja grande, fazendo com que a corrente tenha pouca ondulação.

$$I_{o(\text{ef})} \approx I_{o(\text{med})}.$$

5.3 Esforços de Corrente e Tensão no Diodo

A tensão reversa máxima nos diodos D_1 e D_2 é igual ao pico da tensão de entrada:

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

Já as correntes nos diodos são aproximadamente, para carga fortemente indutiva:

$$I_{D1(pk)} = I_{D2(pk)} = I_{o(pk)}.$$

$$I_{D1(\text{med})} = I_{D2(\text{med})} = \frac{I_{o(\text{med})}}{2}.$$

$$I_{D1(\text{ef})} = I_{D2(\text{ef})} = \frac{I_{o(\text{ef})}}{\sqrt{2}}.$$

5.4 Fator de Potência da Estrutura

A fim de realizar o estudo para determinar o fator de potência do retificador com diodo de roda-livre, será considerado que a carga é predominantemente indutiva, ou seja, que:

$$X_{Lo} \gg R_o;$$

$$\omega \cdot L_o \gg R_o.$$

O circuito emprega transformador isolador, conforme mostrado na Figura 9. As principais formas de onda deste circuito são mostradas na Figura 10.

Valem as seguintes relações para o circuito da Figura 10, considerando uma relação de transformação unitária para o transformador:

$$V_{i(\text{med})} = V_{p(\text{med})} = 0;$$

$$V_{i(\text{ef})} = V_{p(\text{ef})} = \frac{V_{i(pk)}}{\sqrt{2}} = \frac{V_{pk}}{\sqrt{2}};$$

$$V_{s(\text{ef})} = \frac{V_{p(\text{ef})}}{N} = \frac{V_{p(\text{ef})}}{1} = V_{p(\text{ef})};$$

$$i_p = i_s \cdot N = i_s \cdot 1 = i_s$$

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

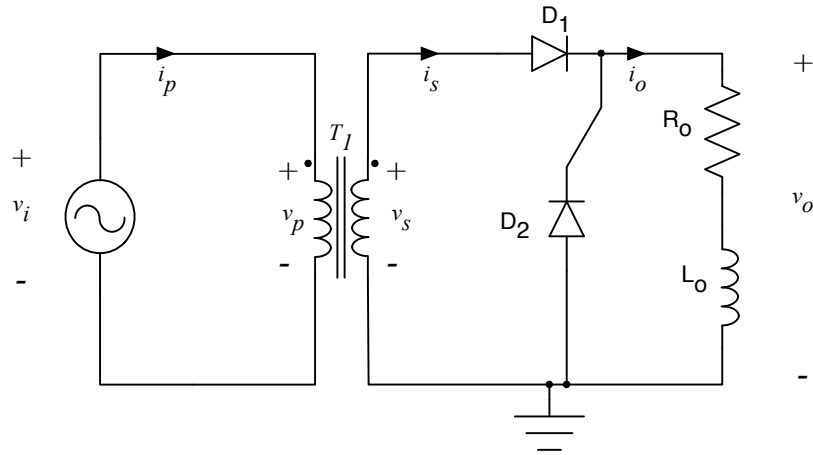


Figura 9 – Circuito do retificador com transformador e diodo de roda-livre.

Observa-se pela Figura 10, que a corrente na carga é considerada contínua pura, ou seja, sem ondulação. Por isso, a corrente de pico, eficaz e média na carga é idêntica:

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

Assim, cada diodo conduz por um semiciclo e sua corrente tem forma de onda quadrada. Portanto seu valor médio é a metade da corrente de carga:

$$I_{D1(med)} = I_{D2(med)} = \frac{I_o}{2}.$$

Já seu valor eficaz será:

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

Note que a corrente no secundário, que é igual a do diodo D_1 , possui valor médio. Esta corrente pelo lado primário do transformador não terá valor médio, pois um transformador não induz corrente contínua de um enrolamento para outro.

$$i_{p(pk)} = i_{p(ef)} = \frac{I_o}{2};$$

$$i_{p(med)} = 0.$$

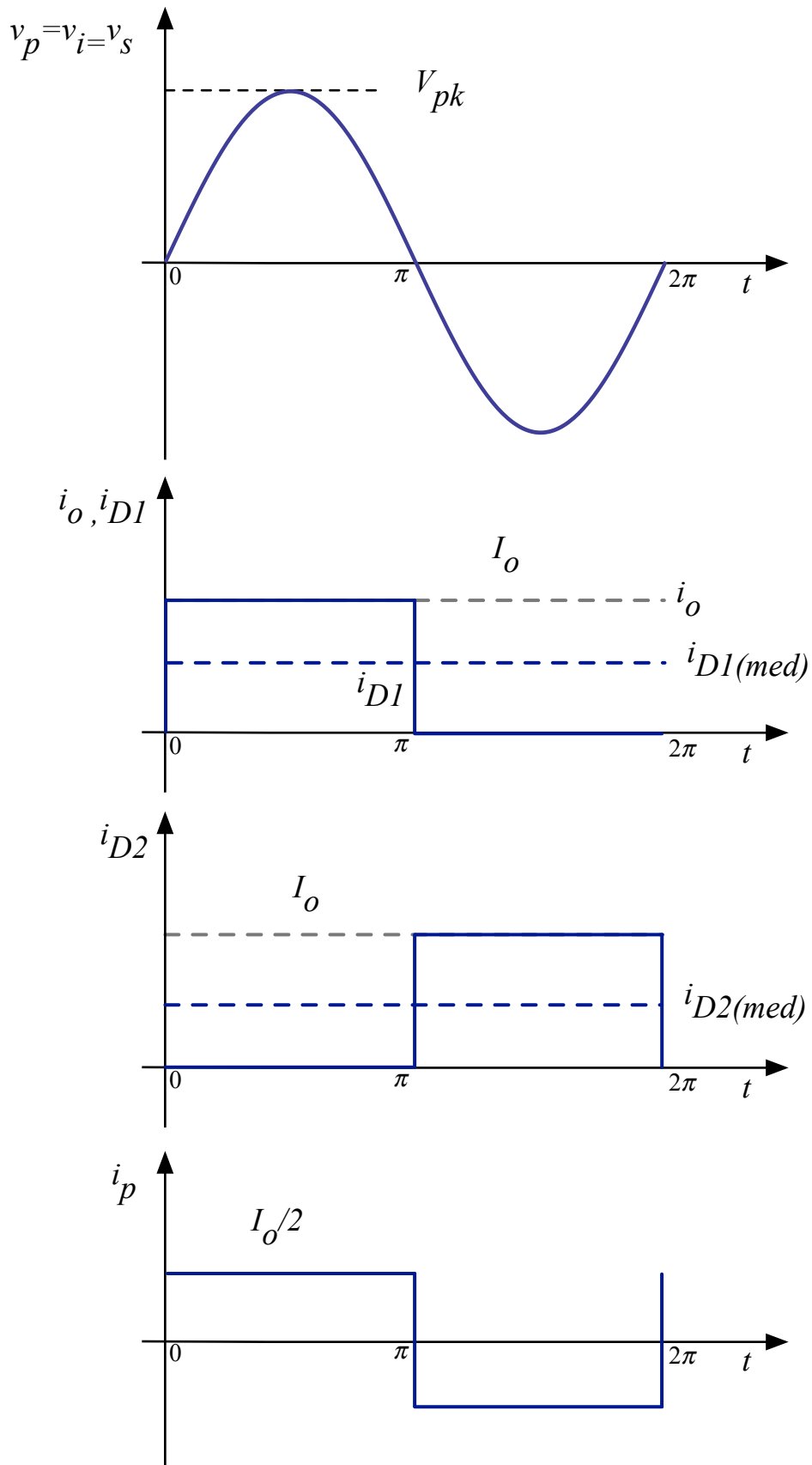


Figura 10 – Principais formas de onda do circuito em estudo.

Lembrando que para se obter o fator de potência da estrutura, necessita-se da potência ativa e da potência aparente. Considerando que os componentes são ideais (sem perdas), e escrevendo as potências em termos de valores médios, então:

$$P_o = v_{o(\text{med})} \cdot i_{o(\text{med})} = v_{o(\text{med})} \cdot I_o ;$$

Mas sabe-se que:

$$v_{o(\text{med})} = \frac{v_{o(pk)}}{\pi} ;$$

Por sua vez, a potência aparente fornecida pela fonte será:

$$S_i = v_{i(\text{ef})} \cdot i_{i(\text{ef})} = v_{i(\text{ef})} \cdot i_{p(\text{ef})} = v_{i(\text{ef})} \cdot \frac{I_o}{2} ;$$

Usando:

$$v_{i(pk)} = v_{p(pk)} = v_{s(pk)} \cdot N = v_{s(pk)} \cdot 1 = v_{s(pk)} = v_{o(pk)} = v_{o(\text{med})} \cdot \pi ;$$

$$S_i = \frac{v_{o(\text{med})} \cdot \pi}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_o}{2} = 1,11 \cdot v_{o(\text{med})} \cdot I_o ;$$

Assim:

$$S_i = 1,11 \cdot P_o ;$$

Portanto:

$$FP = \frac{P_o}{S_i} = \frac{1}{1,11} = 0,9 .$$

5.5 Fator de Conversão da Estrutura

O fator de conversão da estrutura será a relação entre a potência no lado secundário do transformador e a potência na saída, como segue:

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

A potência no lado de corrente contínua (P_{CC}) será:

$$P_{CC} = P_o = v_{o(\text{med})} \cdot i_{o(\text{med})} = v_{o(\text{med})} \cdot I_o ;$$

Já a potência no lado secundário do transformador será:

$$P_{CA} = v_{s(ef)} \cdot i_{s(ef)} = \frac{v_{s(pk)}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_o}{\sqrt{2}} = \frac{v_{s(pk)} \cdot I_o}{2};$$

Mas sabe-se que:

$$v_{s(pk)} = v_{o(pk)} = v_{o(med)} \cdot \pi;$$

Então:

$$P_{CA} = \frac{v_{o(med)} \cdot \pi \cdot I_o}{2} = 1,57 \cdot v_{o(med)} \cdot I_o;$$

Portanto:

$$FC = \frac{P_{CC}}{1,57 \cdot v_{o(med)} \cdot I_o} = \frac{P_{CC}}{1,57 \cdot P_{CC}} = \frac{1}{1,57} = 0,637.$$

Em outras palavras, isso significa que apenas 63,7% da potência disponibilizada pela fonte é aproveitada na saída. É o mesmo que dizer que a potência na entrada deve ser $1/0,637 \approx 1,57$ vezes a potência desejada na saída. Assim, o transformador da Figura 9 deverá ter 1,57 VA para cada 1 W desejado na carga. Mesmo sendo uma relação melhor do que o circuito estudado no capítulo anterior, quando este valor era de aproximadamente 3,5 vezes, ainda se tem uma conversão ruim.

6 Simulação do Retificador em Estudo

O retificador monofásico de meia onda com carga mista será simulado 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.

6.1 Simulação do Circuito com Componentes Ideais

Os circuitos simulados no Psim estão mostrados na Figura 11, onde se tem o retificador sem e com diodo de roda-livre. 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 10 Ω e indutância de 10 mH. O tempo de simulação pode ser de 50 ms e passo de cálculo de 0,1 ms (100 μs).

As formas de onda da tensão de entrada e na saída e da corrente no circuito são mostradas na Figura 12. 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.

O ângulo da carga é determinado como sendo de 20,65°, levando a um $\beta = 200^\circ$. Assim, pode-se determinar as grandezas conforme as expressões dadas anteriormente e preencher a Tabela 1 adequadamente. A impedância da carga é da ordem de 10,7 Ω.

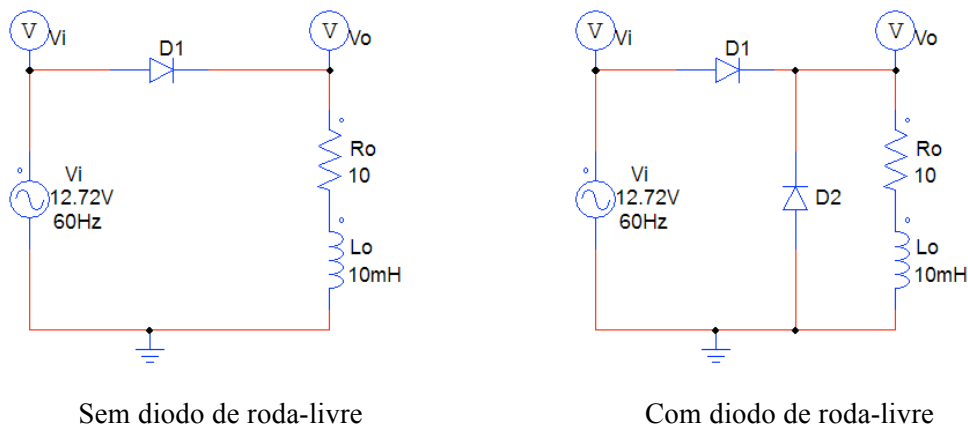


Figura 11 – Circuitos simulados no Psim.

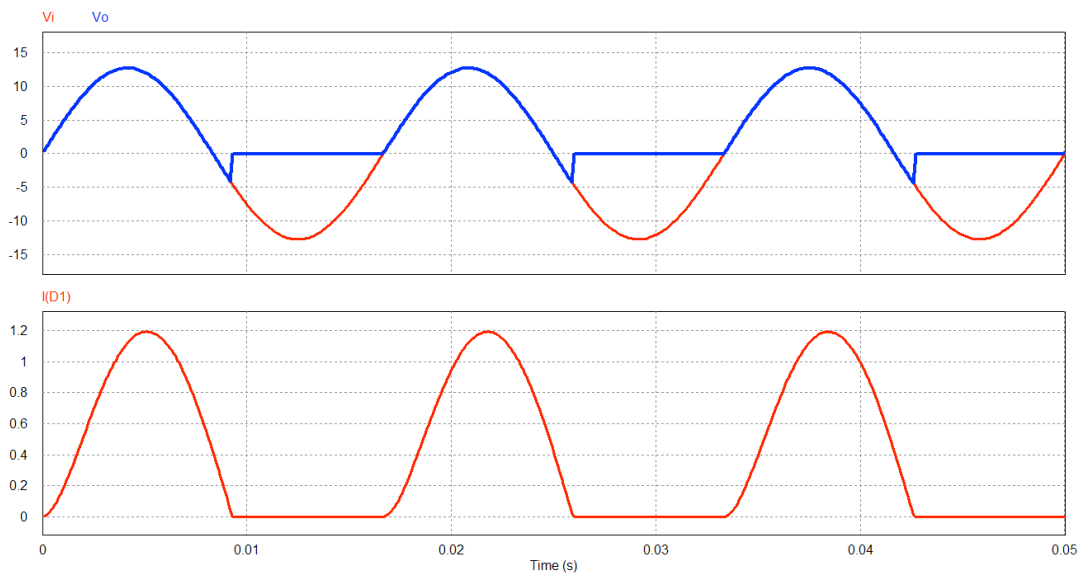


Figura 12 – Formas de onda da tensão de entrada, saída e corrente no circuito sem diodo de roda-livre.

Tabela 1 – Resultados para o retificador de meia onda sem diodo de roda-livre.

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	3,93 V	3,92 V
$I_{o(pk)}$	Corrente de pico na carga	1,191 A	1,193 A
$I_{o(avg)}$	Corrente média na carga	0,393 A	0,392 A
P_o	Potência média na carga	3,538 W	3,629 W

Para determinar a potência média na carga precisa-se conhecer a tensão eficaz ou a corrente eficaz. Esta última pode ser obtida consultando o ábaco da Figura 5, obtendo-se:

$$I_{ef} \cong 0,5;$$

$$I_{o(ef)} = \frac{V_{o(pk)}}{Z_o} \cdot I_{ef} = \frac{12,73}{10,7} \cdot 0,5 = 0,595 \text{ A};$$

$$P_o = R_o \cdot I_{o(ef)}^2 = 10 \cdot 0,595^2 = 3,538 \text{ W}.$$

A seguir simulou-se o retificador monofásico de meia onda com carga mista e diodo de roda-livre mostrado na Figura 11, obtendo-se as formas de onda mostradas na Figura 13.

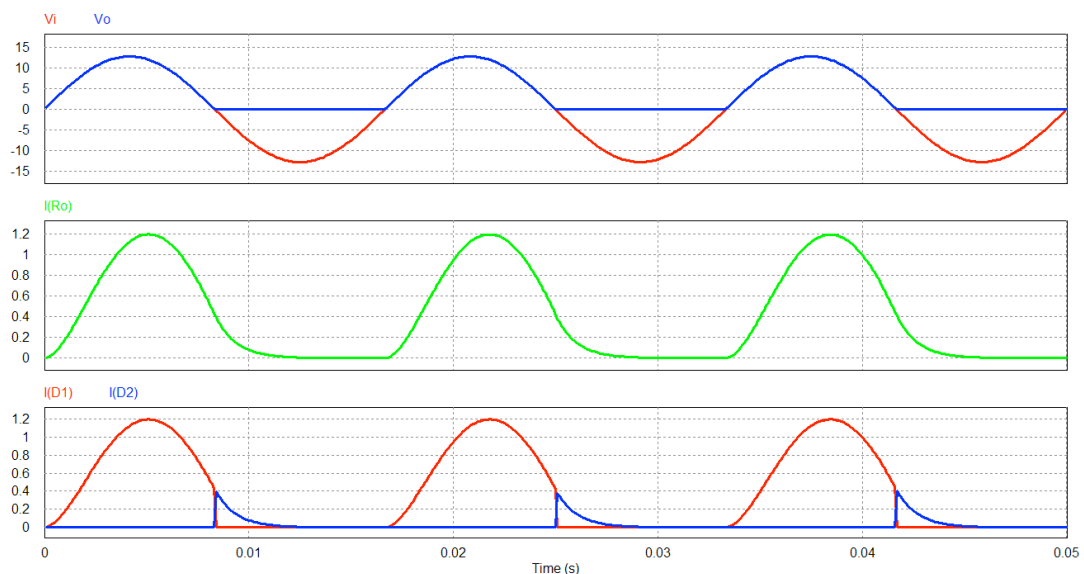


Figura 13 – Formas de onda da tensão de entrada, saída e corrente no circuito com diodo de roda-livre.

Tabela 2 – Resultados para o retificador de meia onda com diodo de roda-livre.

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	4,05 V	4,05 V
$I_{o(pk)}$	Corrente de pico na carga	1,19 A	1,193 A
$I_{o(avg)}$	Corrente média na carga	0,405 A	0,405 A
P_o	Potência média na carga	3,58 W	3,04 W

Note pela Figura 13 que a corrente na carga é formada pela parcela que circula pelo diodo D_1 e a outra que circula pelo diodo de roda-livre D_2 . É interessante observar que a comutação do diodo D_1 é forçada, ou seja, o fenômeno da recuperação reversa estará presente, como será visto na simulação com componentes reais.

Para determinar a potência média na carga precisa-se conhecer a tensão eficaz ou a corrente eficaz. Para valores pequenos de β , ou seja, próximos de 180° , pode-se considerar a corrente eficaz semelhante aquela determinada para a estrutura sem diodo de roda-livre, assim:

$$I_{ef} \cong 0,5;$$

$$I_{o(ef)} = \frac{V_{o(pk)}}{Z_o} \cdot I_{ef} = \frac{12,73}{10,7} \cdot 0,5 = 0,595 A;$$

$$P_o = R_o \cdot I_{o(ef)}^2 = 10 \cdot 0,595^2 = 3,538 W.$$

Note que este valor difere daquele encontrado por simulação, que é 3,04 W. Para se determinar a corrente eficaz real, deve-se empregar a seguinte expressão (Barbi, 2005):

$$I_{o(ef)} = \sqrt{I_{o(med)}^2 + I_{o1}^2 + I_{o2}^2 + \dots + I_{on}^2};$$

$$I_{o1} = \frac{V_{o(pk)}}{2 \cdot \pi \cdot Z_1}; \quad I_{o2} = \frac{2 \cdot V_{o(pk)}}{3 \cdot \pi^2 \cdot Z_2}; \quad I_{on} = \frac{2 \cdot V_{o(pk)}}{(n-1) \cdot (n+1) \cdot \pi^2 \cdot Z_n}, n \neq 1;$$

$$Z_n = \sqrt{R_o^2 + n^2 \cdot \omega^2 \cdot L_o^2}.$$

Portanto:

$$Z_1 = \sqrt{10^2 + 1^2 \cdot 377^2 \cdot 0,01^2} = 10,687 \Omega;$$

$$Z_2 = \sqrt{10^2 + 2^2 \cdot 377^2 \cdot 0,01^2} = 12,52 \Omega;$$

$$I_{o1} = \frac{12,72}{2 \cdot \pi \cdot 10,687} = 0,189 A;$$

$$I_{o2} = \frac{2 \cdot 12,72}{3 \cdot \pi^2 \cdot 12,52} = 0,0686 A;$$

$$I_{o(ef)} = \sqrt{0,405^2 + 0,189^2 + 0,0686^2} = 0,452 A;$$

$$P_o = R_o \cdot I_{o(ef)}^2 = 10 \cdot 0,452^2 = 2,04 W.$$

6.2 Simulação do Circuito com Componentes Reais

O circuito simulado no Multisim está mostrado na Figura 14. Note que os componentes

são reais, ou seja, o diodo possui 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). Note que foi adicionado um resistor em paralelo com a carga, de alto valor (1 k Ω). Isso é feito em virtude da presença do indutor, pois o simulador gera formas de onda errôneas sem a presença de um caminho alternativo para a corrente do indutor.

As formas de onda da tensão de entrada e na saída e da corrente no circuito são mostradas na Figura 15. 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.

É interessante observar na Figura 15 que a tensão na carga apresenta uma pequena oscilação quando o diodo de roda-livre cessa sua condução. Se não for utilizado o resistor R_{o1} em paralelo com a carga, esta oscilação se torna muito pronunciada.

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 o diodo D_1 provoca uma queda de tensão direta da ordem de 1 V.

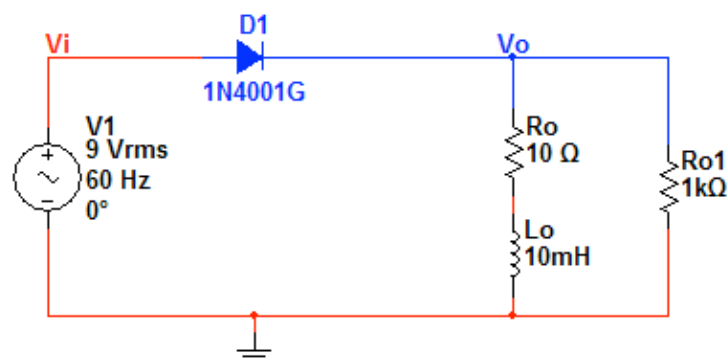


Figura 14 – Circuito simulado no Multisim.

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	11,79 V
$V_{o(avg)}$	Tensão média na carga	3,93 V	3,73 V
$I_{o(pk)}$	Corrente de pico na carga	1,191 A	1,11 A
$I_{o(avg)}$	Corrente média na carga	0,393 A	0,38 A
P_o	Potência média na carga	3,538 W	3,32 W

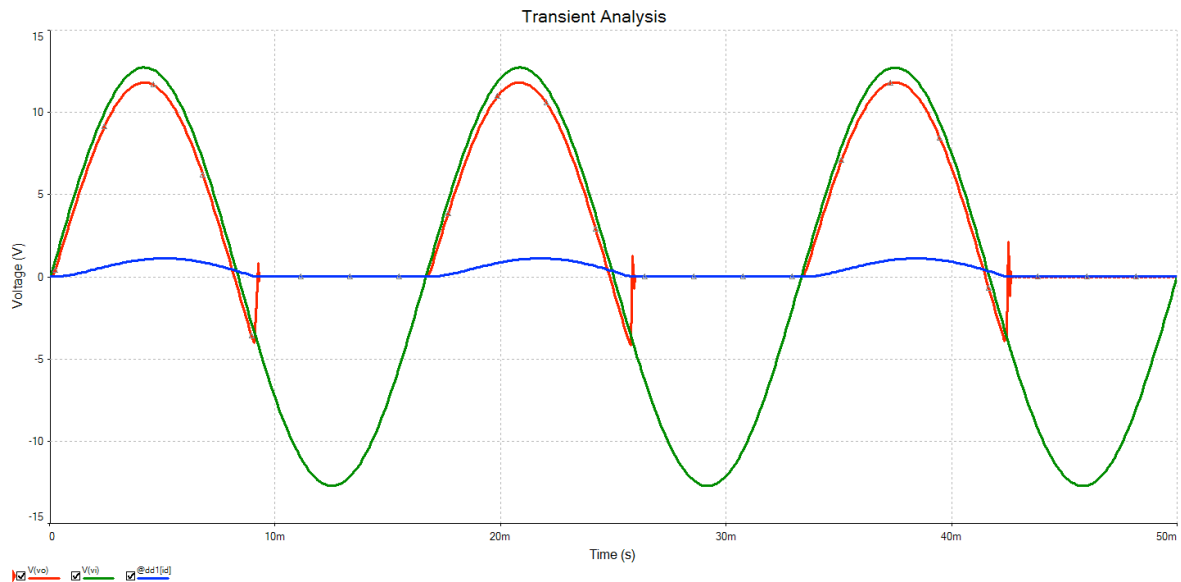


Figura 15 – Formas de onda da tensão de entrada, saída e corrente no circuito.

A seguir simulou-se o circuito com componentes reais e diodo de roda-livre, como mostrado na Figura 16. O interesse agora é observar a comutação dos diodos D_1 e D_2 , principalmente no que se refere à recuperação reversa do diodo principal (D_1).

As formas de onda das correntes no circuito são mostradas na Figura 17. Note que a corrente na carga é formada pela composição da corrente no diodo D_1 e no diodo D_2 .

Na Figura 18 mostra-se em detalhe a comutação de D_1 e D_2 , onde se verifica que não ocorre recuperação reversa, pois o diodo D_1 deixa de conduzir gradualmente, enquanto D_2 assume sua corrente.

A potência instantânea processada no diodo D_1 é mostrada na Figura 19 onde seu pico é da ordem de 1 W.

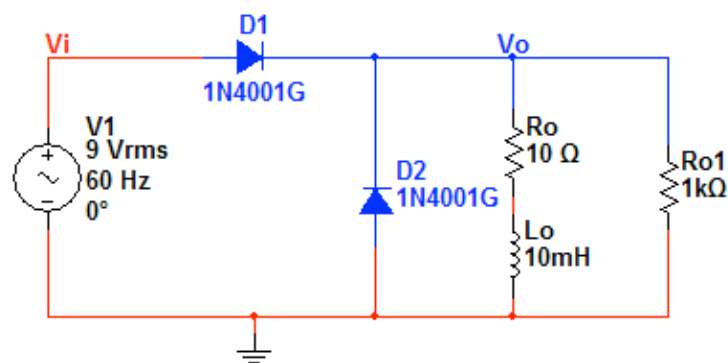


Figura 16 – Circuito simulado com diodo de roda-livre.

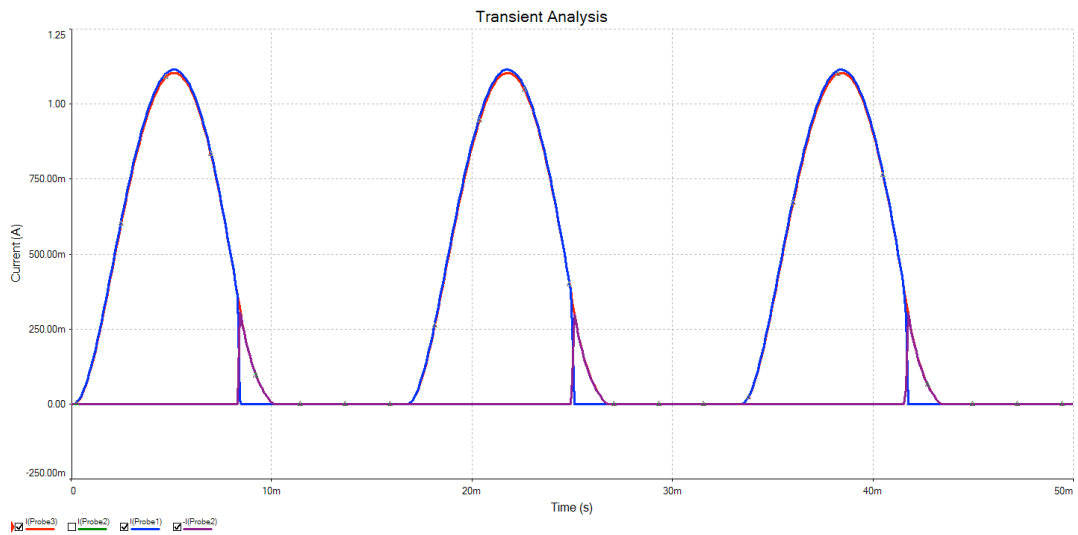


Figura 17 – Formas de onda das correntes nos diodos do retificador com diodo de roda-livre.

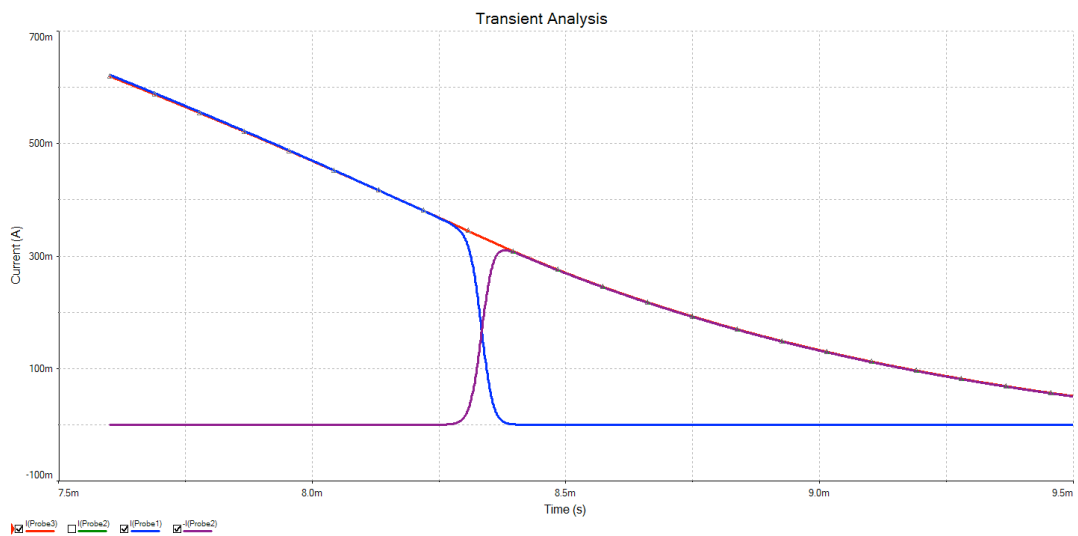


Figura 18 – Detalhe da comutação dos diodos D_1 e D_2 .

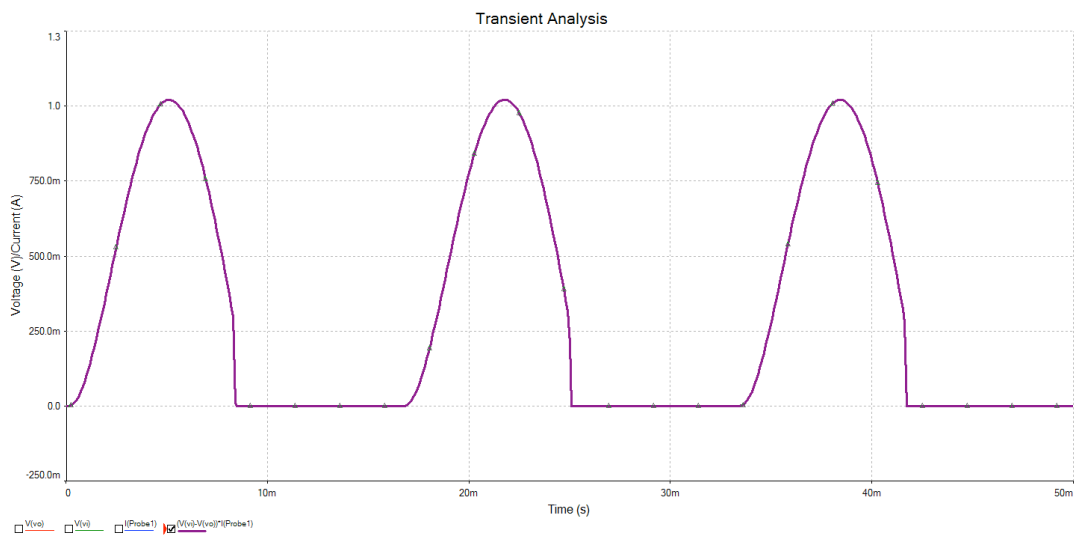


Figura 19 – Potência instantânea no diodo D_1 .

7 Exercícios

Exercícios Resolvidos

ER 01) Considerando o circuito da Figura 20 e que a fonte de alimentação seja de 12 V (eficazes), o diodo é ideal e a carga tem resistência de 5 Ω e indutância de 20 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.

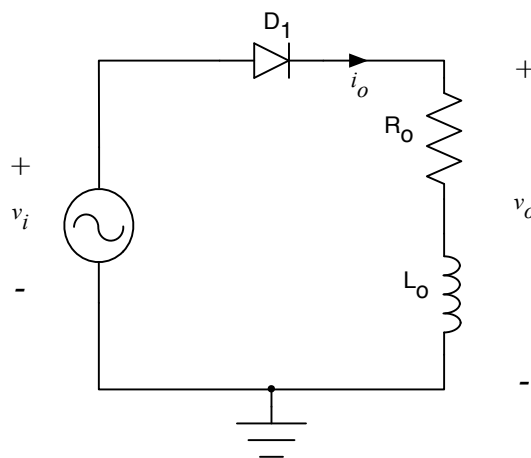


Figura 20 – Circuito para exercício resolvido 01.

Antes de determinar as tensões e correntes na carga é necessário determinar seus ângulos (Φ e β). Assim:

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\omega \cdot L_o}{R_o} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{377 \cdot 20m}{5} \right) = 56,45^\circ .$$

Consultando o ábaco da Figura 4 se obtém:

$$\beta \approx 240^\circ .$$

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

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

$$V_{o(med)} = \frac{V_{pk}}{2\pi} \cdot (1 - \cos(\beta)) = \frac{16,97}{2\pi} \cdot (1 - \cos(240)) = 4,05V .$$

$$V_{o(ef)} = \frac{V_{pk}}{2} \cdot \sqrt{\frac{\beta - \cos(\beta) \cdot \sin(\beta)}{\pi}} = \frac{16,97}{2} \cdot \sqrt{\frac{4,19 - \cos(240) \cdot \sin(240)}{\pi}} = 9,28V .$$

As correntes na carga serão determinadas por:

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

$$I_{o(med)} = \frac{V_{o(med)}}{R_o} = \frac{4,05}{5} = 0,81 A .$$

Consultando o ábaco da Figura 5 se obtém:

$$I_{ef} = 0,6 ;$$

$$Z_o = \sqrt{R_o^2 + (\omega \cdot L_o)^2} = \sqrt{5^2 + (377 \cdot 20m)^2} = 9,05\Omega ;$$

$$I_{o(ef)} = \frac{V_{o(pk)}}{Z_o} \cdot I_{ef} = \frac{16,97}{9,05} \cdot 0,6 = 1,105 A .$$

A potência média na carga é:

$$P_o = R_o \cdot I_{o(ef)}^2 = 5 \cdot 1,105^2 = 6,1W .$$

ER 02) Considerando o circuito da Figura 21 e que a fonte de alimentação seja de 12 V (eficazes), o diodo é o 1N5400 e a carga tem resistência de 5 Ω 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.

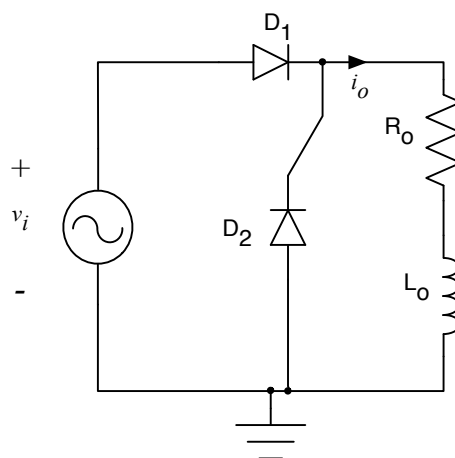


Figura 21 – Circuito para exercício resolvido 02.

Neste caso deve-se consultar a folha de dados do diodo para identificar sua queda de tensão direta, que é dada por:

$$V_F = 1,2V @ I_F = 3A .$$

Todavia, este valor é para a corrente de 3 A. Como no circuito em questão, considerando o exercício resolvido 01 (ER 01), a corrente será da ordem 1 A, então é melhor consultar a folha de dados, para se obter uma queda de tensão média, correspondente à corrente média do circuito.

Avaliando a curva da Figura 22, nota-se que para uma corrente da ordem de 1 A, a queda de tensão será da ordem de 0,8 V.

Assim, a tensão de pico na saída será menor do que a tensão de pico na entrada:

$$V_{o(pk)} = V_{i(pk)} - V_F = V_{pk} - V_F = \sqrt{2} \cdot 12 - 0,8 = 16,17V .$$

A tensões média e eficaz na carga serão:

$$V_{o(med)} = \frac{V_{o(pk)}}{\pi} = \frac{16,17}{\pi} = 5,15V .$$

$$V_{o(ef)} = \frac{V_{o(pk)}}{2} = \frac{16,17}{2} = 8,08V .$$

As correntes serão:

$$Z_o = \sqrt{R_o^2 + (\omega \cdot L_o)^2} = \sqrt{5^2 + (377 \cdot 10m)^2} = 6,26\Omega ;$$

$$I_{o(pk)} = \frac{V_{o(pk)}}{Z_o} = \frac{16,17}{6,26} = 2,58A .$$

$$I_{o(med)} = \frac{V_{o(med)}}{R_o} = \frac{5,15}{5} = 1,03A .$$

A corrente eficaz será determinada por:

$$Z_1 = Z_o = \sqrt{R_o^2 + 1^2 \cdot \omega^2 \cdot L_o^2} = \sqrt{5^2 + 1^2 \cdot 377^2 \cdot 0,01^2} = 6,26\Omega ;$$

$$Z_2 = \sqrt{R_o^2 + 2^2 \cdot \omega^2 \cdot L_o^2} = \sqrt{5^2 + 2^2 \cdot 377^2 \cdot 0,01^2} = 9,05\Omega ;$$

$$I_{o1} = I_{o1} = \frac{V_{o(pk)}}{2 \cdot \pi \cdot Z_1} = \frac{16,17}{2 \cdot \pi \cdot 6,26} = 0,41A ;$$

$$I_{o2} = \frac{2 \cdot V_{o(pk)}}{3 \cdot \pi^2 \cdot Z_2} = \frac{2 \cdot 16,17}{3 \cdot \pi^2 \cdot 9,05} = 0,121A ;$$

$$I_{o(ef)} = \sqrt{I_{o(med)}^2 + I_{o1}^2 + I_{o2}^2} = \sqrt{1,03^2 + 0,41^2 + 0,121^2} = 1,24 \text{ A} .$$

A potência média na carga é:

$$P_o = R_o \cdot I_{o(ef)}^2 = 5 \cdot 1,24^2 = 7,69 \text{ W} .$$

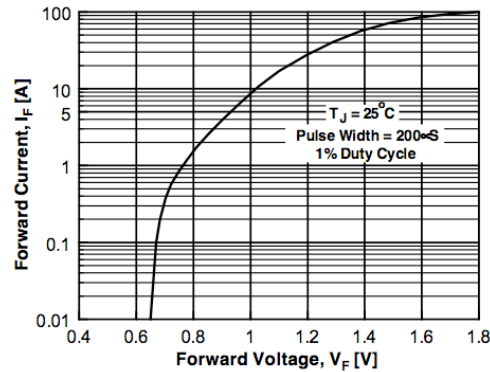


Figura 22 – Curva do diodo 1N5400.

Fonte: http://www.micropik.com/PDF/1N5400_8.pdf. Acesso em: 03/09/2013.

ER 03) Considerando o circuito da Figura 20 e que a fonte de alimentação seja de 12 V (eficazes), o diodo é ideal e a carga tem resistência de 5 Ω e indutância de 500 mH, determine:

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

As tensões na carga serão:

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

$$V_{o(med)} = \frac{V_{o(pk)}}{\pi} = \frac{16,97}{\pi} = 5,40 \text{ V} .$$

$$V_{o(ef)} = \frac{V_{o(pk)}}{2} = \frac{16,97}{2} = 8,48 \text{ V} .$$

A carga pode ser considerada predominantemente indutiva, pois:

$$\omega \cdot L_o \gg R_o ; \quad 377 \cdot 100\text{m} \gg 10 ; \quad 188,5 \gg 10 ; \quad \text{Então:}$$

$$I_{o(pk)} = I_{o(med)} = I_{o(ef)} = \frac{V_{o(med)}}{R_o} = \frac{5,40}{5} = 1,08 \text{ A} .$$

Exercícios Propostos

EP 01) Considerando o circuito da Figura 20 e que a fonte de alimentação seja de 15 V (eficazes), o diodo é ideal e a carga tem resistência de 5Ω 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;
- A tensão reversa no diodo;
- As perdas no diodo.

EP 02) Considerando o circuito da Figura 20 e que a fonte de alimentação seja de 15 V (eficazes), o diodo é o 1N5402 e a carga tem resistência de 5Ω e indutância de 20 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 no diodo;
- As perdas no diodo;
- 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. Comente sobre a queda de tensão direta que foi considerada de 0,8 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 pelo diodo. Verifique o funcionamento do circuito nestas condições. Comente.

8 Laboratório

8.1 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 meia onda com carga mista, ou seja, resistiva-indutiva.

Em síntese, objetiva-se:

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

8.2 Retificador de Meia Onda com Carga Resistiva-Indutiva

Implemente no simulador o circuito mostrado na Figura 23. 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 o indutor (L_o) de 10 mH. O diodo D_1 será ideal.

Anote os valores simulados e calculados na Tabela 4.

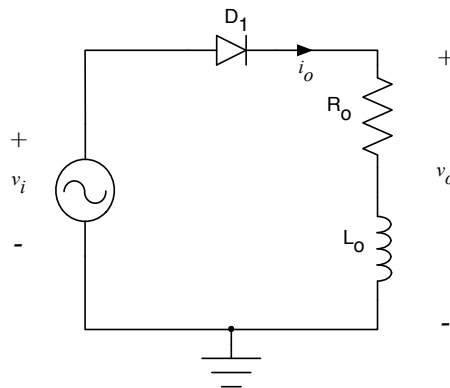


Figura 23 – Circuito do retificador de meia onda.

Tabela 4 – Resultados para o retificador de meia onda.

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		

8.3 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) Se o diodo D_1 fosse substituído por um diodo real, ocorre alteração na tensão de saída?
- 4) Determine o valor eficaz da tensão de saída.
- 5) Determine o valor eficaz da corrente de saída.

9 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.