

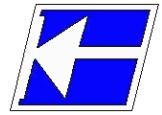
INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA

CURSO TÉCNICO INTEGRADO DE ELETRÔNICA

Eletrônica de Potência



GUIA DE ESTUDO

- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM - CONVERSORES CA-CC

CONVERSORES CA-CC

Objetivo de Aprendizagem

Conhecer as principais estruturas de retificadores de tensão, princípio de funcionamento, formas de onda, cálculo das principais grandezas (tensões, correntes e potências), projeto e implementação de conversores ca-cc.

Objetivos parciais

- Conhecer as principais estruturas de conversores ca-cc;
- Entender o princípio de funcionamento dos conversores ca-cc;
- Realizar cálculos relacionados aos conversores ca-cc;
- Simular conversores ca-cc;
- Projetar conversores ca-cc.

Capítulos e aulas relacionadas

Este objetivo de aprendizagem está relacionado aos capítulos 05 até 10 da apostila e com as aulas 05 até 10 da disciplina.

Pré-requisitos

Ter estudado e obtido êxito no Objetivo de Aprendizagem 02 – Componentes eletrônicos.

Continuidade dos Estudos

O próximo objetivo de aprendizagem será estudar os conversores cc-cc.

Roteiro para estudos

Os estudos referentes a este objetivo de aprendizagem consistem em:

1. Estudar este documento resumo, realizando as atividades propostas no mesmo;
2. Responder o quiz relacionado a este objetivo de aprendizagem;
3. Caso perceba necessidade, estudar a apresentação deste assunto ou ler os capítulos da apostila da disciplina;
4. Realizar os exercícios deste tópico da matéria;
5. Realizar a avaliação final para progredir ao próximo conteúdo.

Referências

- Material disponibilizado para a disciplina de Eletrônica de Potência I – 2020/1. Departamento Acadêmico de Eletrônica, Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.
- Capítulos da apostila de eletrônica de potência, disponível em www.ProfessorPetry.com.br.

Check-list

Caro estudante, verifique se você completou as atividades deste objetivo de aprendizagem e obteve êxito para continuar seus estudos.

Assinale as atividades realizadas:

Estudo do documento resumo:

- Leitura do documento resumo;
- Exercícios do documento resumo;
- Atividade avaliativa do documento resumo.
- Obtive êxito e entendi o conteúdo deste documento;
- Ainda não entendi bem o conteúdo e estudarei o mesmo com mais profundidade.

Estou com dúvidas, irei estudar com mais detalhes este conteúdo:

- Assistir a apresentação relacionada ao conteúdo (apresentações 05 até 10);
- Ler os capítulos deste conteúdo na apostila (capítulos 05 até 10).

Ainda estou com dúvidas:

- Entrarei em contato com o professor.

Obtive êxito, então seguirei em frente:

- Responder ao quiz deste conteúdo no Moodle;
- Informar ao professor que estou avançando com o conteúdo.

Parabéns, continue estudando com afinco e vamos em frente!!

CONTEÚDO

- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM - CONVERSORES CA-CC

1 Introdução

O conteúdo a ser estudado neste tópico da disciplina está relacionado aos conversores ca-cc, denominados de retificadores. Este conteúdo foi estudado nas aulas presenciais, servindo este material como revisão e fixação da matéria e também como reposição de estudos.

1.1 Conteúdo – O que irei estudar

Estudaremos neste tópico:

- Retificadores de meia onda;
- Retificadores de onda completa;
- Retificadores com filtro capacitivo;
- Retificadores controlados.

1.2 Metodologia – O que devo fazer e como fazer

Leia com atenção o conteúdo a seguir. Ao final deste tópico são apresentados exercícios resolvidos. Após são apresentados alguns exercícios propostos.

Ao realizar estas atividades e se sentir confiante para progredir, siga os passos indicados na primeira página deste documento.

Espera-se que após estudar este assunto, você consiga:

- Explicar o funcionamento dos principais retificadores;
- Entender como a carga influencia no comportamento do retificador;
- Saber calcular a tensão de saída dos principais retificadores;
- Dimensionar retificadores com filtro capacitivo.

A atividade avaliativa deste objetivo de aprendizagem consistirá em apresentar ao estudante um circuito de um retificador e solicitar que o mesmo identifique o circuito, explique seu funcionamento e calcule a tensão de saída do mesmo.

Exemplo de atividade avaliativa:

1. Determinar a tensão de saída do retificador apresentado.
2. Desenhar as formas de onda da tensão de saída de um retificador qualquer;
3. Explicar as etapas de funcionamento de um retificador;
4. Dimensionar um retificador de onda completa com filtro capacitivo;
5. Explicar o funcionamento de um retificador controlado.

2 Formas de Onda e Parâmetros Principais

2.1 Introdução

A análise de um circuito em eletrônica de potência se baseia, em grande medida, pelo desenho das principais formas de onda do circuito em estudo. Assim, neste tópico inicial serão apresentadas as formas de onda para tensão senoidal, quadrada e retificação em meia onda e onda completa e seus principais parâmetros.

2.2 Tensão senoidal

A tensão da rede de energia elétrica tem formato sinusoidal, normalmente chamada de tensão senoidal, por ser expressada matematicamente por um seno. A forma de onda de uma tensão senoidal é mostrada na Figura 1.

A tensão máxima (de pico) é identificada por $V_{(pk)}$, sendo definida na figura como o ponto em que a tensão atinge seu valor máximo positivo, que será igual ao valor negativo, pois estamos considerando formas de onda simétricas. A escala horizontal, de tempo, está sendo representada em radianos, que podem ser convertidos em graus usando:

$$2\pi = 360^\circ$$

Importante lembrar que:

$$\omega = 2\pi \cdot F \text{ [rad / s]}$$

$$F = \frac{1}{T} \text{ [Hz]}$$

Onde T é o período em segundos. Por exemplo, para a frequência de 60 Hz da rede de energia elétrica, se terá:

$$T = \frac{1}{F} = \frac{1}{60} = 16,67 \text{ ms}$$

$$\omega = 2\pi \cdot F = 2\pi \cdot 60 \cong 377 \text{ rad / s}$$

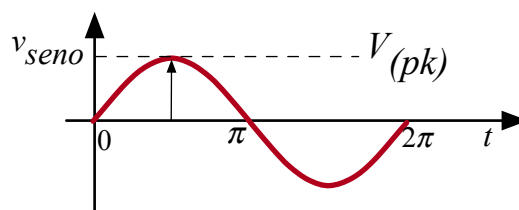


Figura 1 – Forma de onda senoidal.

Os parâmetros de tensão da forma de onda senoidal da Figura 1 serão:

$$V_{(pk)} = \text{definido}$$

$$v(t) = V_{(pk)} \cdot \text{seno}(\omega \cdot t + \phi) \quad \text{onde } \phi \text{ é ângulo de defasagem.}$$

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

$$V_{(med)} = V_{(cc)} = V_{(avg)} = 0$$

A tensão eficaz pode ser representada com o índice “*ef*” ou “*RMS*”, que significa raiz média quadrática (*root mean square*). Por sua vez, a tensão média (*average*) é identificada por “*med*”, “*cc*” ou “*avg*” e para uma onda senoidal simétrica terá valor zero.

A forma de onda da Figura 1 não apresenta defasagem, ou seja, inicia no instante zero, então o ângulo ϕ é zero.

Como exemplo, a tensão monofásica da rede de energia elétrica na cidade de Florianópolis teria os seguintes parâmetros:

$$F = 60 \text{ Hz} \rightarrow T \cong 16,67 \text{ ms} \rightarrow \omega \cong 377 \text{ rad / s}$$

$$V_{(pk)} = 311 \text{ V} \rightarrow V_{(ef)} = 220 \text{ V} \rightarrow V_{(med)} = 0$$

2.1 Tensão senoidal retificada em meia onda

A tensão senoidal retificada em meia onda é mostrada na Figura 2. Note que o semiciclo negativo foi descartado, diga-se, o retificador elimina este semiciclo, aproveitando apenas o semiciclo positivo da tensão disponibilizada pela rede de energia elétrica.

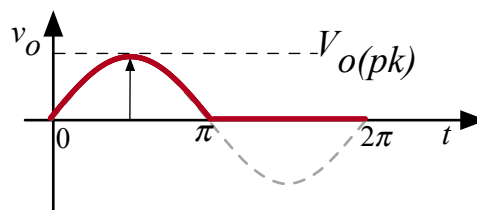


Figura 2 – Forma de onda senoidal retificada em meia onda.

Os parâmetros de tensão da forma de onda senoidal da Figura 2 serão:

$$V_{o(pk)} = \text{definido}$$

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

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

2.1 Tensão senoidal retificada em onda completa

A tensão senoidal retificada em onda completa é mostrada na Figura 3. Neste caso se aproveitam os dois semiciclos da tensão disponibilizada pela rede de energia elétrica.

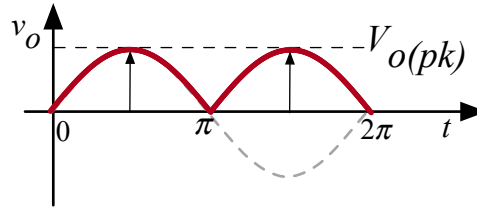


Figura 3 – Forma de onda senoidal retificada em onda completa.

Os parâmetros de tensão da forma de onda senoidal da Figura 2 serão:

$$V_{o(pk)} = \text{definido}$$

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

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

Note que a tensão eficaz de uma tensão senoidal retificada é idêntica aquela de uma tensão senoidal.

2.1 Tensão quadrada

A tensão com forma de onda quadrada é mostrada na Figura 3. Por sua vez, a Figura 5 mostra a forma de onda para retificação em meia onda e onda completa.

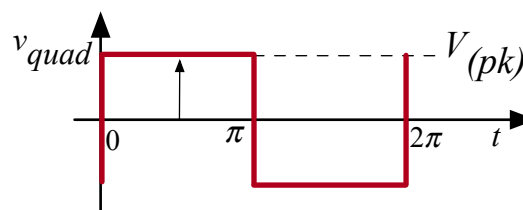


Figura 4 – Forma de onda quadrada.

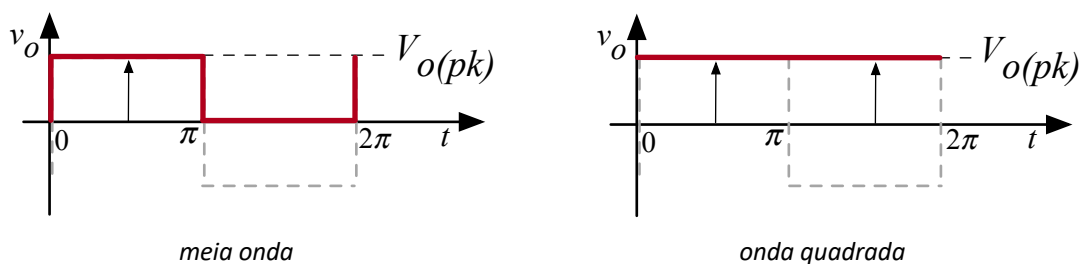


Figura 5 – Formas de onda quadrada com retificação.

Os parâmetros de tensão da forma de onda quadrada alternada da Figura 4 serão:

$$V_{(pk)} = \text{definido}$$

$$V_{\alpha(ef)} = V_{\alpha(pk)}$$

$$V_{\alpha(med)} = 0$$

Por sua vez, a tensão quadrada retificada em meia onda terá:

$$V_{o(pk)} = \text{definido}$$

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

$$V_{\alpha(med)} = \frac{V_{\alpha(pk)}}{2}$$

Por fim, a tensão quadrada retificada em onda completa terá:

$$V_{o(pk)} = \text{definido}$$

$$V_{\alpha(ef)} = V_{\alpha(pk)}$$

$$V_{\alpha(med)} = 2 \cdot \frac{V_{\alpha(pk)}}{2} = V_{\alpha(pk)}$$

Note que as tensões eficaz e média são iguais a tensão de pico da onda quadrada.

3 Retificadores de Meia Onda

3.1 Introdução

Este tópico apresenta um resumo dos retificadores de meia onda, seja com carga resistiva e com carga resistiva-indutiva. As principais expressões e formas de onda serão também apresentadas.

3.2 Retificador de meia onda com carga resistiva

A Figura 6 mostra o circuito do retificador de meia onda com carga resistiva. Este retificador tem duas etapas de funcionamento, que são:

- Primeira etapa (0 até π) - a tensão de entrada (v_i) é positiva, o diodo (D_1) está diretamente polarizado e conduzindo. A tensão de saída (v_o) é igual a da entrada;

- Segunda etapa (π até 2π) - a tensão de entrada (v_i) é negativa, o diodo (D_1) está reversamente polarizado e não conduzindo, pois a corrente se tornou zero no instante π radianos. A tensão de saída (v_o) é igual a zero.

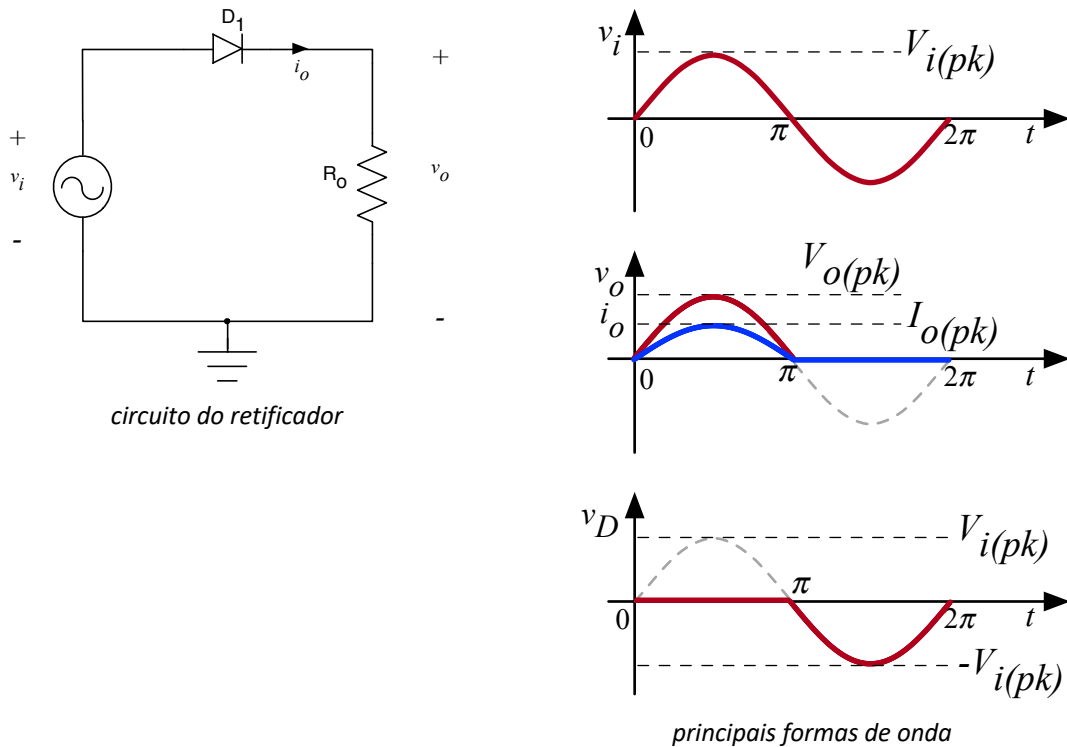


Figura 6 – Circuito retificador de meia onda e principais formas de onda.

A tensão e corrente de saída são dadas, considerando o diodo ideal, por:

$V_{i(pk)}$ = definido

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

$$V_{\alpha(ef)} = \frac{V_{\alpha(pk)}}{2} \rightarrow I_{o(ef)} = \frac{V_{o(ef)}}{R_o}$$

$$V_{\alpha(med)} = \frac{V_{\alpha(pk)}}{\pi} \rightarrow I_{o(med)} = \frac{V_{o(med)}}{R_o}$$

As correntes no diodo são iguais aquelas na carga. Já a tensão reversa no diodo será:

$$V_{RRM} = V_{i(pk)}$$

3.3 Retificador de meia onda com carga resistiva-indutiva

A Figura 7 mostra o circuito do retificador de meia onda com carga resistiva-indutiva, ou seja, mista. Este retificador tem três etapas de funcionamento, que são:

- Primeira etapa (0 até π) - a tensão de entrada (v_i) é positiva, o diodo (D_1) está diretamente polarizado e conduzindo. A tensão de saída (v_o) é igual a da entrada;
- Segunda etapa (π até β) - a tensão de entrada (v_i) é negativa, o diodo (D_1) está reversamente polarizado mas continua conduzindo, pois a corrente na carga (resistiva-indutiva) está atrasada em relação à tensão. A tensão de saída (v_o) é igual a da entrada e negativa neste caso;
- Terceira etapa (β até 2π) - a tensão de entrada (v_i) é negativa, o diodo (D_1) está reversamente polarizado e não conduzindo, pois a corrente se tornou zero no instante β radianos. A tensão de saída (v_o) é igual a zero.

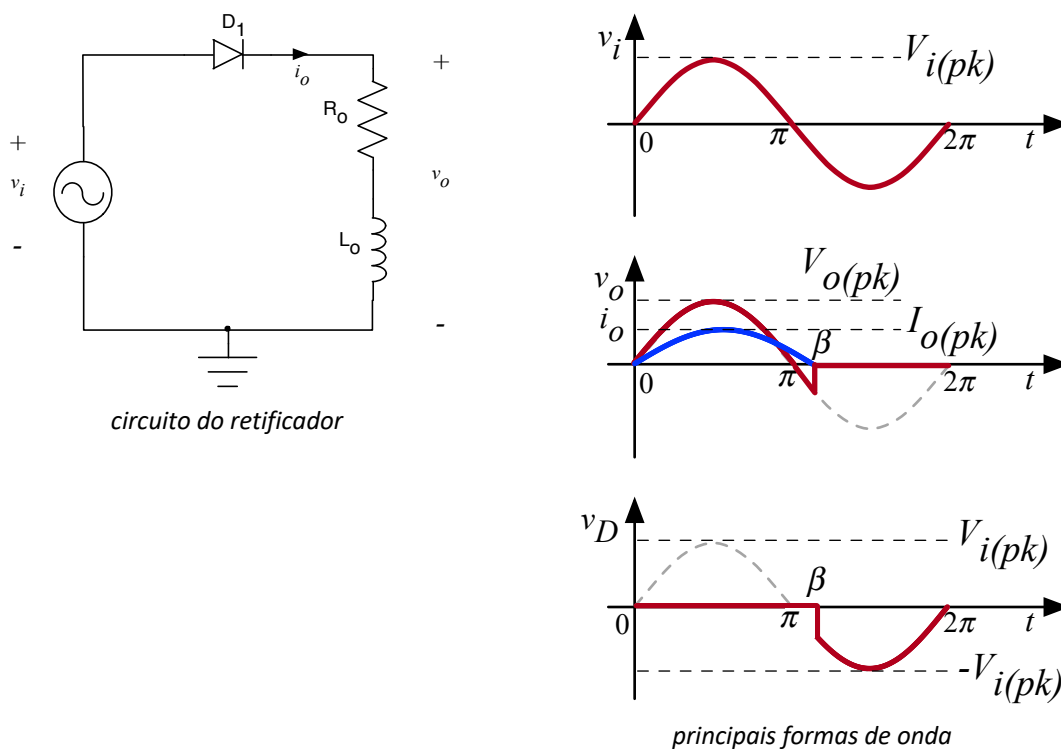


Figura 7 – Circuito retificador de meia onda com carga mista e principais formas de onda.

A tensão e corrente de saída são dadas, considerando o diodo ideal, por:

$$V_{i(pk)} = \text{definido}$$

$$X_{L_o} = \omega \cdot L_o = 2\pi \cdot F \cdot L_o \rightarrow Z_o = R_o + j \cdot X_{L_o} \rightarrow |Z_o| = \sqrt{R_o^2 + X_{L_o}^2} \rightarrow \phi = \tan^{-1} \left(\frac{X_{L_o}}{R_o} \right)$$

Adotando-se uma aproximação linear sobre o ábaco que determina o ângulo em que a

corrente se torna zero (β) a partir do ângulo da carga (ϕ), conforme ensinado no livro de Eletrônica de Potência do professor Ivo Barbi (<https://ivobarbi.com.br>), pode-se obter:

$$\beta = 1,14 \cdot \phi + 180 \left[^\circ \right] \rightarrow 0 \leq \phi \leq 70^\circ$$

$$\beta = 3 \cdot \phi + 50 \left[^\circ \right] \rightarrow 70^\circ \leq \phi \leq 85^\circ$$

$$\beta = 360^\circ \rightarrow 85 \leq \phi \leq 90^\circ$$

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

$$V_{\alpha(ef)} = \frac{V_{\alpha(pk)}}{2} \cdot \sqrt{\frac{\beta - \cos(\beta) \cdot \text{sen}(\beta)}{\pi}} \rightarrow I_{o(ef)} \cong \frac{V_{o(ef)}}{R_o} \rightarrow \text{ou} \rightarrow I_{o(ef)} \cong 1,7 \cdot I_{o(med)}$$

$$V_{\alpha(med)} = \frac{V_{\alpha(pk)}}{2\pi} \cdot (1 - \cos(\beta)) \rightarrow I_{o(med)} = \frac{V_{o(med)}}{R_o}$$

A corrente no diodo será igual a corrente na carga. A tensão reversa sobre o diodo será igual ao pico da tensão de entrada.

Se for adicionado um diodo de roda-livre em paralelo com a carga resistiva-indutiva, então a tensão de saída não terá a parcela negativa, sendo calculada de modo idêntico a tensão do retificador de meia onda com carga resistiva.

3.4 Retificadores de onda completa

3.4.1 Retificador de onda completa com ponto médio

A Figura 8 mostra o circuito do retificador de onda completa com ponto médio (ou derivação (*tap*) central) carga resistiva. Este retificador tem duas etapas de funcionamento, que são:

- Primeira etapa (0 até π) - a tensão de entrada (v_i) é positiva, o diodo (D_1) está diretamente polarizado e conduzindo. O diodo (D_2) está reversamente polarizado e não está conduzindo. A tensão de saída (v_o) é igual a saída do secundário 1 (V_{s1});
- Segunda etapa (π até 2π) - a tensão de entrada (v_i) é negativa, o diodo (D_2) está diretamente polarizado e conduzindo. O diodo (D_1) está reversamente polarizado e não está conduzindo. A tensão de saída (v_o) é igual a saída do secundário 2 (V_{s2}).

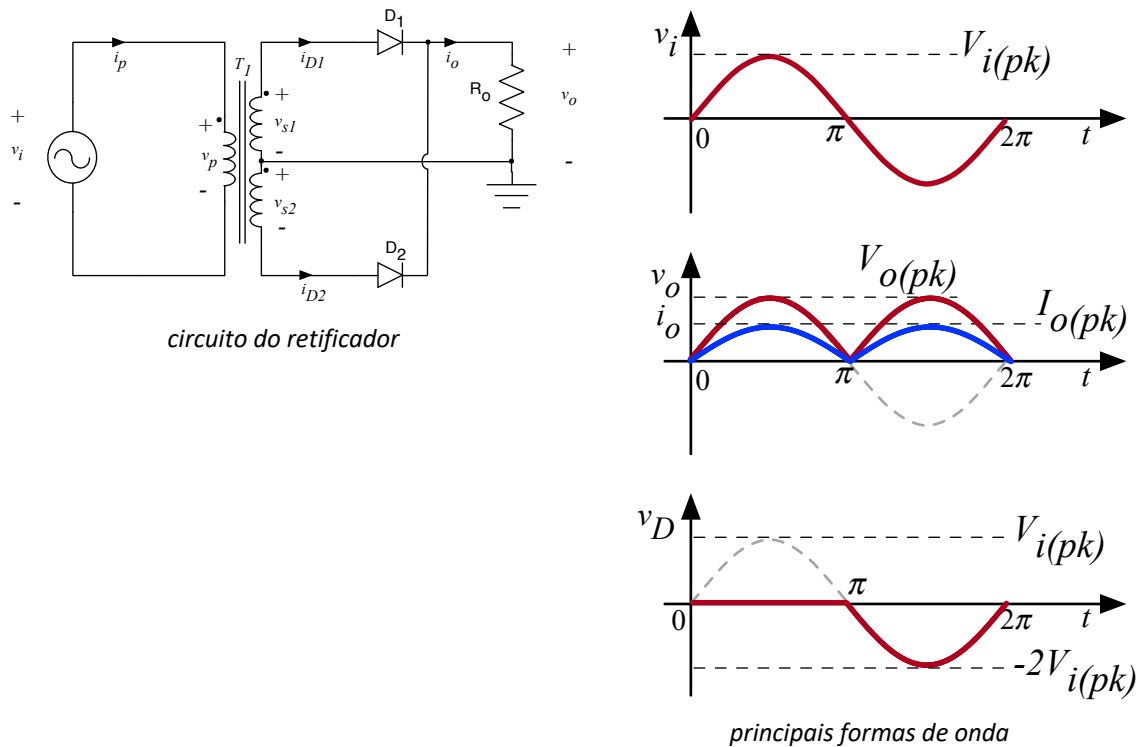


Figura 8 – Circuito retificador de onda completa em ponto médio e principais formas de onda.

A tensão e corrente de saída são dadas, considerando os diodos ideais e carga resistiva, por:

$V_{i(pk)}$ = definido

$$V_{s1(pk)} = V_{s2(pk)} = \frac{V_{p(pk)}}{n} = \frac{V_{i(pk)}}{n} \rightarrow n = \frac{V_p}{V_s}$$

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

$$V_{\alpha(ef)} = V_{s(ef)} = \frac{V_{s(pk)}}{\sqrt{2}} \rightarrow I_{o(ef)} = \frac{V_{o(ef)}}{R_o}$$

$$V_{\alpha(med)} = 2 \cdot \frac{V_{\alpha(pk)}}{\pi} \rightarrow I_{o(med)} = \frac{V_{o(med)}}{R_o}$$

As correntes nos diodos têm valor de pico igual a corrente na carga, sendo seu valor médio a metade da corrente de saída. Já a tensão reversa no diodo será:

$$V_{RRM} = 2 \cdot V_{i(pk)}$$

A operação com carga mista (resistiva-indutiva) tem amplitude e forma de onda da tensão

idênticas aquelas com carga resistiva. Já a corrente tende a ser contínua pura ou contínua com alguma ondulação (*ripple*). Neste caso o seu valor se torna mais complexo para calcular, mas pode ser aproximado considerando o valor eficaz igual a corrente de pico e o valor médio do mesmo modo que foi determinado anteriormente para carga resistiva.

3.4.1 Retificador de onda completa em ponte completa (ponte H)

A Figura 9 mostra o circuito do retificador de onda completa em ponte completa (ponte H) com carga resistiva. Este retificador tem duas etapas de funcionamento, que são:

- Primeira etapa (0 até π) - a tensão de entrada (v_i) é positiva, os diodos (D_1 e D_4) estão diretamente polarizados e conduzindo. Os diodos (D_2 e D_3) estão reversamente polarizados e não estão conduzindo. A tensão de saída (v_o) é igual a tensão de entrada (V_i);
- Segunda etapa (π até 2π) - a tensão de entrada (v_i) é negativa, os diodos (D_2 e D_3) estão diretamente polarizados e conduzindo. Os diodos (D_1 e D_4) estão reversamente polarizados e não estão conduzindo. A tensão de saída (v_o) é igual a tensão de entrada invertida ($-V_i$).

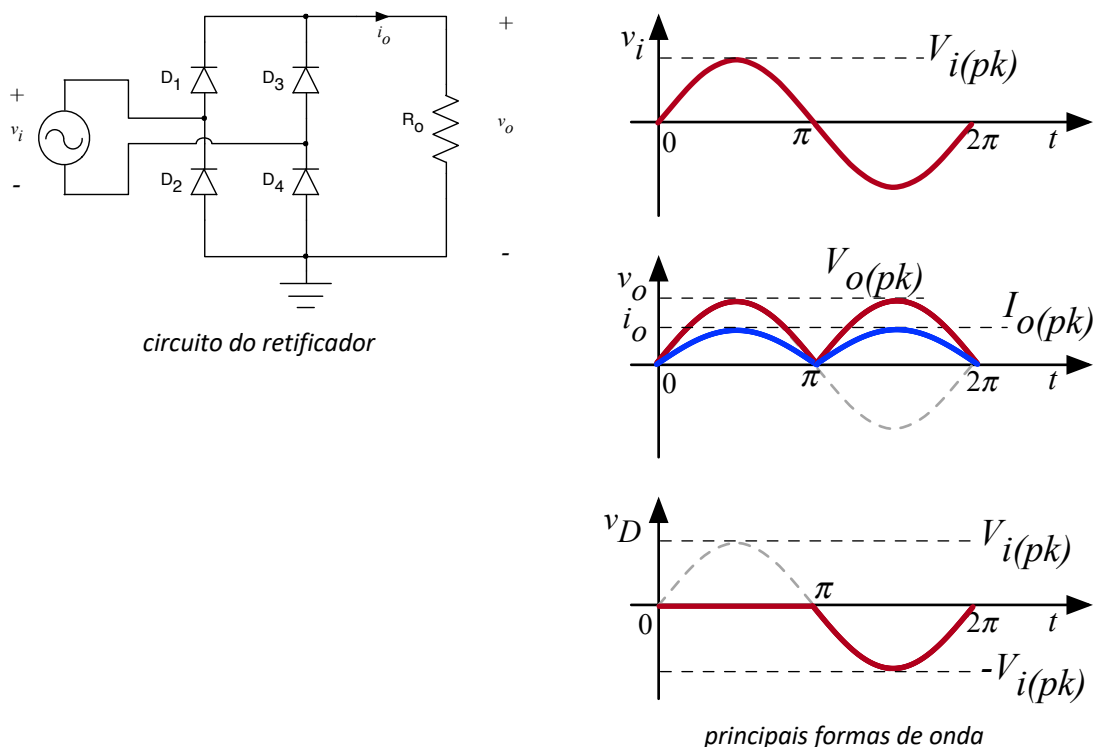


Figura 9 – Circuito retificador de onda completa em ponte completa e principais formas de onda.

A tensão e corrente de saída são dadas, considerando os diodos ideais e carga resistiva,

por:

$$V_{i(pk)} = \text{definido}$$

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

$$V_{\alpha(ef)} = V_{i(ef)} \rightarrow I_{o(ef)} = \frac{V_{o(ef)}}{R_o}$$

$$V_{\alpha(med)} = 2 \cdot \frac{V_{\alpha(pk)}}{\pi} \rightarrow I_{o(med)} = \frac{V_{o(med)}}{R_o}$$

As correntes nos diodos têm valor de pico igual a corrente na carga, sendo seu valor médio a metade da corrente de saída. Já a tensão reversa no diodo será:

$$V_{RRM} = V_{i(pk)}$$

A operação com carga mista (resistiva-indutiva) tem amplitude e forma de onda da tensão idênticas aquelas com carga resistiva. Já a corrente tende a ser contínua pura ou contínua com alguma ondulação (*ripple*). Neste caso o seu valor se torna mais complexo para calcular, mas pode ser aproximado considerando o valor eficaz igual a corrente de pico e o valor médio do mesmo modo que foi determinado anteriormente para carga resistiva.

3.5 Retificadores com filtro capacitivo

3.5.1 Retificador de meia onda com filtro capacitivo

A Figura 10 mostra o circuito do retificador de meia onda com filtro capacitivo e carga resistiva. Este retificador tem quatro etapas de funcionamento, que são:

- Primeira etapa (0 até t_1) - a tensão de entrada (v_i) é positiva, mas é menor do que a tensão sobre o capacitor ($v_o = v_c$). O diodo (D_1) não está conduzindo. A tensão de saída (v_o) é igual a tensão sobre o capacitor (v_c), sendo o mesmo descarregado nesta etapa;
- Segunda etapa (t_1 até $t_2 = \pi/2$) - a tensão de entrada (v_i) é positiva e maior do que tensão no capacitor, então o diodo (D_1) está diretamente polarizado e conduzindo. O capacitor está sendo carregado e sua tensão cresce. A tensão de saída (v_o) é igual a tensão sobre o capacitor (v_c) e igual a tensão de entrada (v_i);
- Terceira etapa ($t_2 = \pi/2$ até π) - a tensão de entrada (v_i) é positiva, mas é menor do que a tensão sobre o capacitor ($v_o = v_c$). O diodo (D_1) não está conduzindo. A

tensão de saída (v_o) é igual a tensão sobre o capacitor (V_c), sendo o mesmo descarregado nesta etapa;

- Quarta etapa (π até 2π) - a tensão de entrada (v_i) é negativa, o diodo (D_1) está reversamente polarizado e não está conduzindo. A tensão de saída (v_o) é igual a tensão do capacitor (v_c). O capacitor é descarregado nesta etapa.

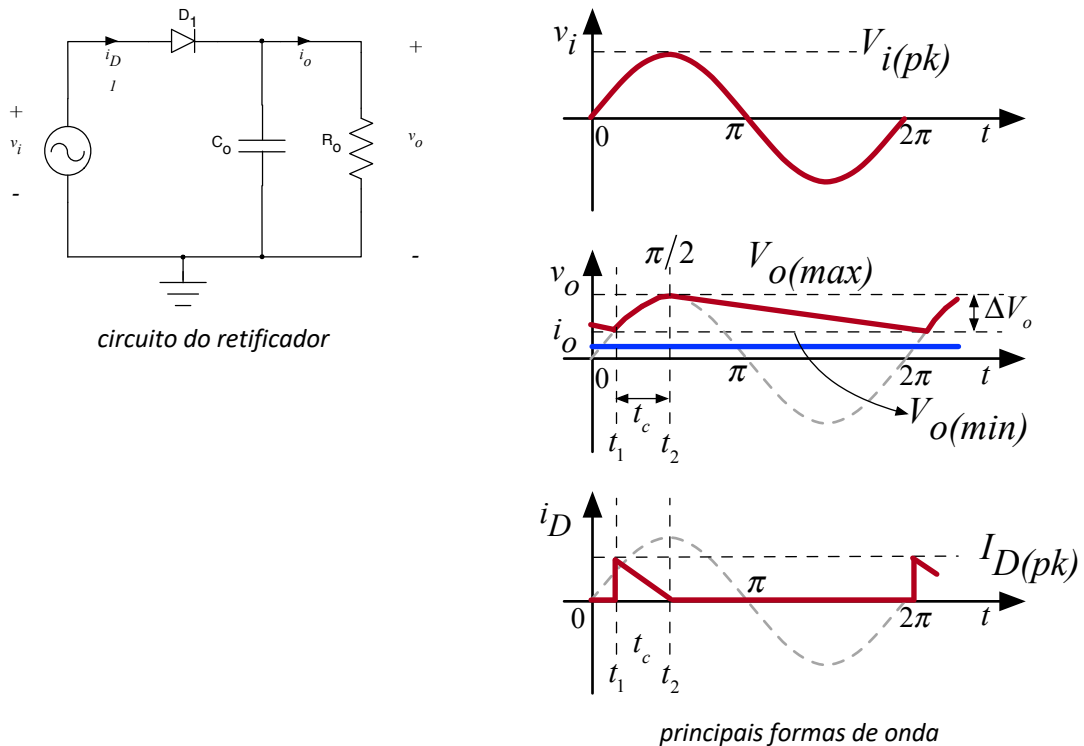


Figura 10 – Circuito retificador de meia onda com filtro capacitivo e principais formas de onda.

As tensões sobre o capacitor, considerando que o diodo é ideal, serão:

$$V_{i(pk)} = \text{definido}$$

$$V_{c(max)} = V_{o(max)} = V_{i(pk)}$$

$$V_{c(min)} = V_{o(min)} = V_{i(pk)} - \Delta V_o$$

$$\Delta V_o = \Delta V_o \% \cdot V_{i(pk)}$$

$$V_o = V_{o(ave)} = \frac{V_{o(max)} + V_{o(min)}}{2}$$

Onde ΔV_o é a ondulação de tensão (*ripple*) sobre o capacitor definida pelo projetista. Note que a ondulação de tensão é dada em percentual da tensão de pico na saída. Em geral este valor é da ordem de 10 a 20%, dependendo da carga que está conectada na saída do retificador.

A potência na saída é dada por:

$$P_o = \frac{V_o^2}{R_o} [W]$$

Assim, considerando a frequência da rede de energia elétrica conhecida (F_i), o capacitor será dado por:

$$C_o = \frac{2 \cdot P_o}{F_i \cdot \left[(V_{c(\max)})^2 - (V_{c(\min)})^2 \right]} [Farad]$$

A corrente média no diodo será igual a corrente na carga. Já a corrente de pico no diodo será dada por:

$$t_c = t_2 - t_1 = \frac{\cos^{-1}\left(\frac{V_{o(\min)}}{V_{o(\max)}}\right)}{2\pi \cdot F_i} \rightarrow I_{D(\max)} = \frac{2 \cdot C_o \cdot \Delta V_o}{t_c}$$

A tensão reversa no diodo será:

$$V_{RRM} = V_{i(pk)}$$

3.5.2 Retificador de onda completa com filtro capacitivo

A Figura 11 mostra o circuito do retificador de onda completa com filtro capacitivo e carga resistiva. Este retificador tem quatro etapas de funcionamento, que são:

- Primeira etapa (0 até t_1) - a tensão de entrada (v_i) é positiva, mas é menor do que a tensão sobre o capacitor ($v_o = v_c$). Os diodos (D_1 a D_4) não estão conduzindo. A tensão de saída (v_o) é igual a tensão sobre o capacitor (v_c), sendo o mesmo descarregado nesta etapa;
- Segunda etapa (t_1 até $t_2 = \pi/2$) - a tensão de entrada (v_i) é positiva e maior do que tensão no capacitor, então os diodos (D_1 e D_4) estão diretamente polarizados e conduzindo. Os diodos (D_2 e D_3) não estão conduzindo. O capacitor está sendo carregado e sua tensão cresce. A tensão de saída (v_o) é igual a tensão sobre o capacitor (v_c) e igual a tensão de entrada (v_i);
- Terceira etapa ($t_2 = \pi/2$ até π) - a tensão de entrada (v_i) é positiva, mas é menor do que a tensão sobre o capacitor ($v_o = v_c$). Os diodos (D_1 a D_4) não estão conduzindo. A tensão de saída (v_o) é igual a tensão sobre o capacitor (V_c), sendo o mesmo descarregado nesta etapa;

- Terceira etapa (2π até t_3) - a tensão de entrada (v_i) é negativa, mas é menor do que a tensão sobre o capacitor ($v_o = v_c$). Os diodos (D_1 a D_4) não estão conduzindo. A tensão de saída (v_o) é igual a tensão sobre o capacitor (v_c), sendo o mesmo descarregado nesta etapa;
- Segunda etapa (t_3 até $t_4 = 3\pi/2$) - a tensão de entrada (v_i) é negativa e maior do que tensão no capacitor, então os diodos (D_2 e D_3) estão diretamente polarizados e conduzindo. Os diodos (D_1 e D_4) não estão conduzindo. O capacitor está sendo carregado e sua tensão cresce. A tensão de saída (v_o) é igual a tensão sobre o capacitor (v_c) e igual a tensão de entrada invertida ($-v_i$);
- Terceira etapa ($t_4 = 3\pi/2$ até 2π) - a tensão de entrada (v_i) é negativa, mas é menor do que a tensão sobre o capacitor ($v_o = v_c$). Os diodos (D_1 a D_4) não estão conduzindo. A tensão de saída (v_o) é igual a tensão sobre o capacitor (v_c), sendo o mesmo descarregado nesta etapa;

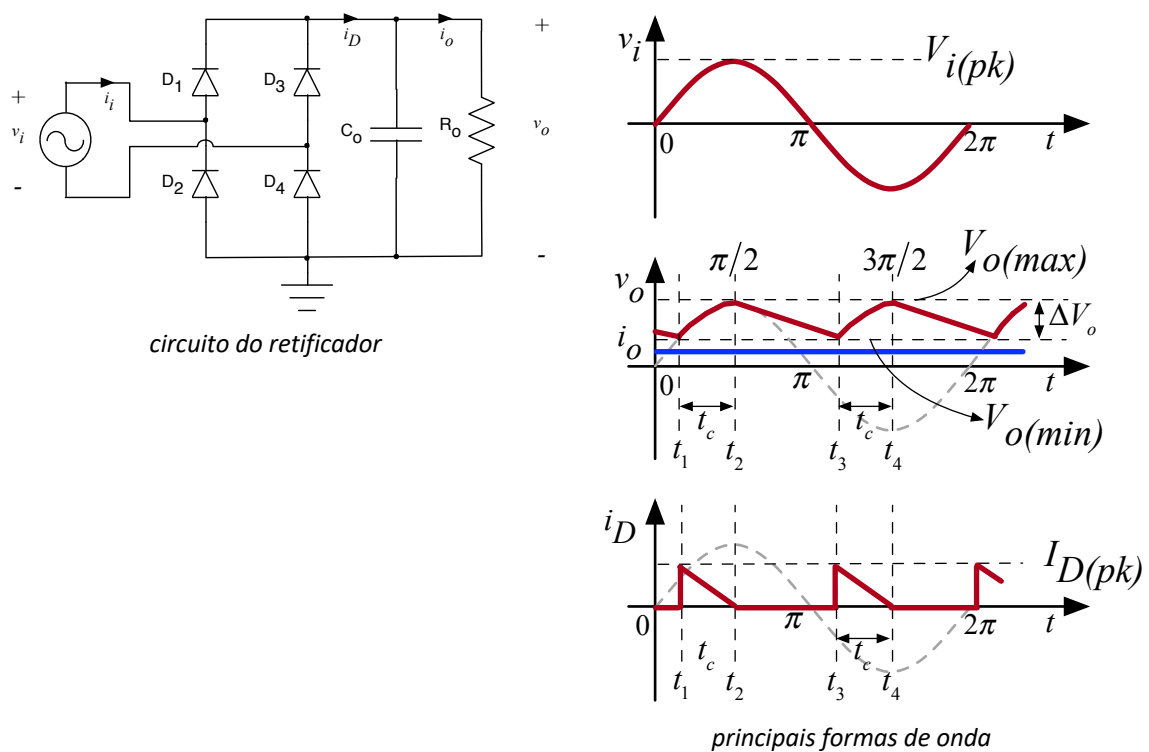


Figura 11 – Circuito retificador de onda completa com filtro capacitivo e principais formas de onda.

As tensões sobre o capacitor, considerando que os diodos são ideais, serão:

$$V_{i(pk)} = \text{definido}$$

$$V_{c(max)} = V_{o(max)} = V_{i(pk)}$$

$$V_{c(\min)} = V_{o(\min)} = V_{i(pk)} - \Delta V_o$$

$$\Delta V_o = \Delta V_o \% \cdot V_{i(pk)}$$

$$V_o = V_{o(\text{med})} = \frac{V_{o(\max)} + V_{o(\min)}}{2}$$

Onde ΔV_o é a ondulação de tensão (*ripple*) sobre o capacitor definida pelo projetista. Note que a ondulação de tensão é dada em percentual da tensão de pico na saída. Em geral este valor é da ordem de 10 a 20%, dependendo da carga que está conectada na saída do retificador.

A potência na saída é dada por:

$$P_o = \frac{V_o^2}{R_o} [W]$$

Assim, considerando a frequência da rede de energia elétrica conhecida (F_i), o capacitor será dado por:

$$C_o = \frac{P_o}{F_i \cdot \left[\left(V_{c(\max)} \right)^2 - \left(V_{c(\min)} \right)^2 \right]} [Farad]$$

A corrente média no diodo será igual a corrente na carga. Já a corrente de pico no diodo será dada por:

$$t_c = t_2 - t_1 = \frac{\cos^{-1} \left(\frac{V_{o(\min)}}{V_{o(\max)}} \right)}{2\pi \cdot F_i} \rightarrow I_{D(\max)} = \frac{2 \cdot C_o \cdot \Delta V_o}{t_c}$$

A tensão reversa no diodo será:

$$V_{RRM} = V_{i(pk)}$$

4 Retificadores Controlados

4.1 Introdução

Este tópico apresenta um breve resumo sobre os retificadores controlados, os quais permitem que a tensão de saída seja alterada pelo controle do ângulo de condução dos tiristores utilizados.

4.2 Retificador controlado de meia onda com carga resistiva

A Figura 12 mostra o circuito do retificador controlado de meia onda com carga resistiva.

Este retificador tem três etapas de funcionamento, que são:

- Primeira etapa (0 até α) - a tensão de entrada (v_i) é positiva, o tiristor (T_1) está diretamente polarizado, mas sem corrente de gatilho, por isso não está conduzindo. A tensão de saída (v_o) é zero;
- Segunda etapa (α até π) - a tensão de entrada (v_i) é positiva, o tiristor (T_1) está diretamente polarizado, com corrente de gatilho, e portanto está conduzindo. A tensão de saída (v_o) é igual a da entrada;
- Terceira etapa (π até 2π) - a tensão de entrada (v_i) é negativa, o tiristor (T_1) está reversamente polarizado e não conduzindo, pois a corrente se tornou zero no instante π radianos. A tensão de saída (v_o) é igual a zero.

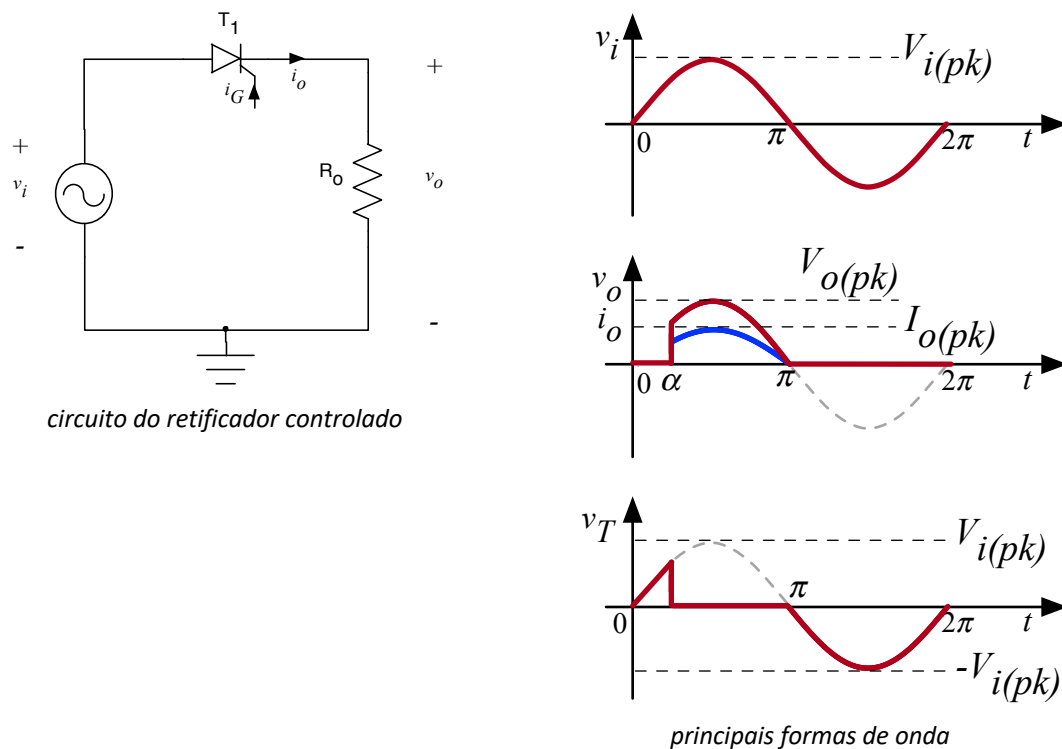


Figura 12 – Circuito do retificador controlado de meia onda e principais formas de onda.

A tensão e corrente de saída são dadas, considerando o tiristor ideal, por:

$$V_{i(pk)} = \text{definido}$$

$$V_{o(pk)} = \begin{cases} V_{i(pk)} \rightarrow \alpha < 90^\circ \\ V_{i(pk)} \cdot \text{sen}(\alpha) \rightarrow 90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ \end{cases} \rightarrow I_{o(pk)} = \frac{V_{o(pk)}}{R_o}$$

$$V_{\alpha(ef)} = \frac{V_{\alpha(pk)}}{2} \cdot \sqrt{\frac{\pi - \alpha + \cos(\alpha) \cdot \sin(\alpha)}{\pi}} \rightarrow I_{o(ef)} = \frac{V_{o(ef)}}{R_o}$$

$$V_{\alpha(med)} = \frac{V_{\alpha(pk)}}{2\pi} \cdot (1 + \cos(\alpha)) \rightarrow I_{o(med)} = \frac{V_{o(med)}}{R_o}$$

As correntes no tiristor são iguais aquelas na carga. Já a tensão reversa no tiristor será:

$$V_{RRM} = V_{i(pk)}$$

4.3 Retificador controlado de onda completa com carga resistiva

A Figura 13 mostra o circuito do retificador controlado de onda completa com carga resistiva. Este retificador tem três etapas de funcionamento, que são:

- Primeira etapa (0 até α) - a tensão de entrada (v_i) é positiva, os tiristores (T_1 e T_4) estão diretamente polarizados, mas sem corrente de gatilho, por isso não estão conduzindo. Os tiristores (T_2 e T_3) estão reversamente polarizados e não estão conduzindo. A tensão de saída (v_o) é zero;
- Segunda etapa (α até π) - a tensão de entrada (v_i) é positiva, os tiristores (T_1 e T_4) estão diretamente polarizados, com corrente de gatilho, e portanto estão conduzindo. Os tiristores (T_2 e T_3) estão reversamente polarizados e não estão conduzindo. A tensão de saída (v_o) é igual a da entrada ($v_i(t)$);
- Terceira etapa (π até $\alpha+\pi$) - a tensão de entrada (v_i) é negativa, os tiristores (T_2 e T_3) estão diretamente polarizados, mas sem corrente de gatilho, por isso não estão conduzindo. Os tiristores (T_1 e T_4) estão reversamente polarizados e não estão conduzindo. A tensão de saída (v_o) é zero;
- Quarta etapa ($\alpha+\pi$ até 2π) - a tensão de entrada (v_i) é negativa, os tiristores (T_2 e T_3) estão diretamente polarizados, com corrente de gatilho, e portanto estão conduzindo. Os tiristores (T_1 e T_4) estão reversamente polarizados e não estão conduzindo. A tensão de saída (v_o) é igual a da entrada invertida ($-v_i(t)$).

A tensão e corrente de saída são dadas, considerando os tiristores ideais, por:

$$V_{i(pk)} = \text{definido}$$

$$V_{o(pk)} = \begin{cases} V_{i(pk)} \rightarrow \alpha < 90^\circ \\ V_{i(pk)} \cdot \sin(\alpha) \rightarrow 90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ \end{cases} \rightarrow I_{o(pk)} = \frac{V_{o(pk)}}{R_o}$$

$$V_{\alpha(ef)} = V_{o(pk)} \cdot \sqrt{\frac{\pi - \alpha + \cos(\alpha) \cdot \sin(\alpha)}{2\pi}} \rightarrow I_{o(ef)} = \frac{V_{o(ef)}}{R_o}$$

$$V_{\alpha(med)} = \frac{V_{\alpha(pk)}}{\pi} \cdot (1 + \cos(\beta)) \rightarrow I_{o(med)} = \frac{V_{o(med)}}{R_o}$$

As correntes nos tiristores são iguais aquelas na carga. Já a tensão reversa nos tiristores será:

$$V_{RRM} = V_{i(pk)}$$

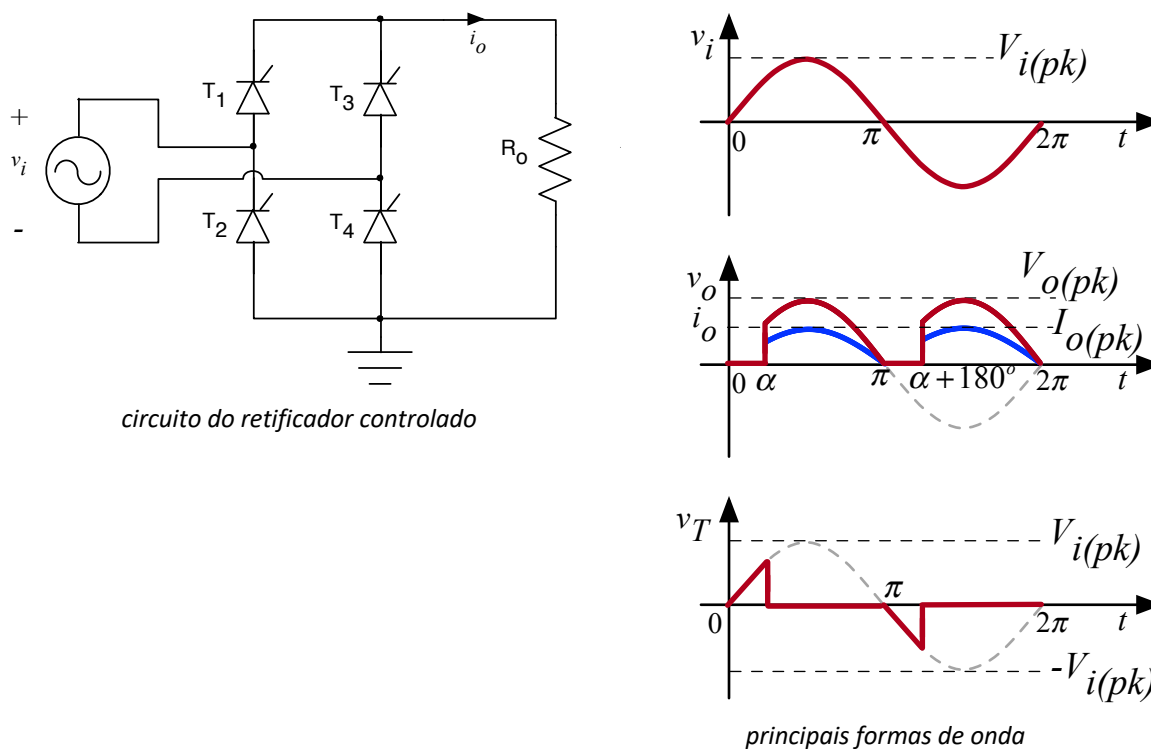


Figura 13 – Circuito do retificador controlado de onda completa e principais formas de onda.

5 Exercícios

Exercícios Resolvidos

ER 01. Explique a diferença em termos de tensão de saída entre os retificadores de meia onda e de onda completa?

Os retificadores de onda completa têm o dobro de tensão média na saída em relação aos de meia onda. Já a tensão de pico é igual em ambos os retificadores.

ER 02. Determine a tensão média na saída para um retificador de meia onda com carga resistiva que tem tensão eficaz na entrada de 16 V.

A tensão de entrada de pico será de:

$$V_{i(pk)} = \sqrt{2} \cdot V_{i(ef)} = \sqrt{2} \cdot 16 = 22,63V$$

A tensão de saída será:

$$V_{\alpha(med)} = \frac{V_{\alpha(pk)}}{\pi} = \frac{22,63}{\pi} = 7,2V$$

ER 03. Em relação ao aproveitamento da tensão disponibilizada pela rede de energia elétrica, qual retificador tem desempenho melhor?

Os retificadores de onda completa são melhores, pois aproveitam os dois semiciclos da tensão da rede de energia elétrica.

ER 04. Determine a tensão média na saída para um retificador de onda completa com carga resistiva que tem tensão eficaz na entrada de 16 V.

A tensão de entrada de pico será de:

$$V_{i(pk)} = \sqrt{2} \cdot V_{i(ef)} = \sqrt{2} \cdot 16 = 22,63V$$

A tensão de saída será:

$$V_{\alpha(med)} = 2 \cdot \frac{V_{\alpha(pk)}}{\pi} = 2 \cdot \frac{22,63}{\pi} = 14,4V$$

ER 05. Qual a utilidade dos retificadores controlados?

Os retificadores controlados permitem que se altere o valor da tensão média na carga, por isso podem ser utilizados em aplicações como: acionamento de motores de corrente contínua, aquecimento com cargas resistivas, fontes de tensão, etc.

Exercícios Propostos

EP 01. Explique o que são retificadores de tensão?

EP 02. Em termos de tensão reversa, qual a diferença do retificador de onda completa com ponto médio em relação ao retificador de onda completa em ponte completa.

EP 03. Como se altera a tensão de saída de um retificador controlado?

EP 04. Determine a tensão média na saída para um retificador de onda completa com carga resistiva

que tem tensão eficaz na entrada de 12 V.

EP 05. Determine a tensão média na saída para um retificador de meia onda com carga resistiva que tem tensão eficaz na entrada de 12 V.

6 Atividade Avaliativa

6.1 Introdução – O que preciso saber

Ao final deste objetivo de aprendizagem são apresentadas cinco questões, que devem ser respondidas sem consultar o material. Se você conseguir responder as questões e conferir as respostas com o gabarito abaixo, parabéns, você concluiu com êxito este tópico. Caso tenha errado alguma questão, revise o conteúdo relacionado com a mesma e refaça a questão, procurando se concentrar mais desta vez, para acertar a mesma e fixar bem o conteúdo.

AA 01. Calcule a tensão média na saída de um retificador de meia onda que possui tensão eficaz na entrada de 12 V.

AA 02. Calcule a tensão média na saída de um retificador de onda completa que possui tensão eficaz na entrada de 12 V.

AA 03. Calcule a tensão média na saída de um retificador controlado de meia onda que possui tensão eficaz na entrada de 12 V e opera com ângulo de disparo do tiristor de 90°.

AA 04. Calcule o capacitor para um retificador de meia onda, que tem tensão eficaz de entrada de 12 V, frequência da rede de energia elétrica de 60 Hz, potência de saída de 10 W e ondulação de tensão no capacitor de 10%?

AA 05. Calcule a corrente eficaz na saída de um retificador de meia onda que possui tensão eficaz na entrada de 12 V e um resistor de carga de 10 Ω.

AA 01. A tensão de pico na entrada será de $12 \times \sqrt{2} = 17V$. A tensão de saída será $17/\pi = 5,4V$.

AA 02. A tensão de pico na entrada será de $12 \times \sqrt{2} = 17V$. A tensão de saída será $2 \times 17/\pi = 10,8V$.

AA 03. A tensão de pico na entrada será de $12 \times \sqrt{2} = 17V$. A tensão de saída será $\frac{2\pi}{17} \times \cos(1 + 90^\circ) = 2,7V$.

AA 04. A tensão de pico no capacitor será de $12 \times \sqrt{2} = 17V$. A tensão mínima será $17 - 0,1 \times 17 = 15,3V$.

Então o capacitor será $\frac{2 \times 10}{60 \times (17^2 - 15,3^2)} = 6mF$.

AA 05. A tensão de pico será de $12 \times \sqrt{2} = 17V$. A tensão eficaz na carga será de $17/2 = 8,5V$. Então a corrente eficaz será de $8,5 / 10 = 0,85A$.