

25

Capítulo

Estabilizadores de Tensão CA

Meta deste capítulo

Estudar o princípio de funcionamento dos estabilizadores de tensão alternada.

objetivos

- Entender o princípio de funcionamento de estabilizadores de tensão;
- Analisar circuitos de estabilizadores de tensão alternada;
- Simular circuitos de estabilizadores de tensão;
- Implementar circuitos de estabilizadores de tensão.

Pré-requisitos

Ter estudado o capítulo referente aos conversores ca-ca.

Continuidade

Este é o capítulo final deste curso básico de eletrônica de potência.

Prof. Clóvis Antônio Petry.
Florianópolis, junho de 2020.

1 Introdução

Nos capítulos anteriores deste curso foram estudados os conversores ca-cc, cc-cc, cc-ca e ca-ca. Agora, por fim, se estudarão os estabilizadores de tensão, que compõe o grupo dos conversores ca-ca, fechando-se assim este curso básico de eletrônica de potência.

O capítulo anterior abordou alguns aspectos de cunho geral, aplicáveis a todos os conversores ca-ca e em seguida foram apresentados em detalhes os conversores ca-ca operando com tiristores, nas funções de gradadores e variadores de tensão.

Os conversores ca-ca com a função de estabilizadores de tensão alternada são aplicados em residências, no comércio e na indústria, na alimentação de cargas sensíveis às variações da tensão da rede de energia elétrica.

A Figura 1 mostra exemplos de estabilizadores utilizados em aplicações hospitalares, na alimentação de equipamentos de ressonância magnética, por exemplo.

Assim, neste capítulo serão estudados os principais conceitos relacionados aos estabilizadores de tensão alternada, operando com relés, tiristores ou transistores, onde serão apresentados resultados de simulação para os circuitos estudados, além de exercícios resolvidos e propostos.



Figura 1 – Estabilizador de tensão para aplicação hospitalar.

Fonte: <https://catalogohospitalar.com.br>. Acesso em: 17/06/2020.

2 Estabilizadores de Tensão

2.1 Introdução

Os estabilizadores de tensão fazem parte do grupo de conversores ca-ca, como mostrados na Figura 2. Assim, os conceitos estudados no capítulo anterior se aplicam aos estabilizadores, visto estes serem uma categoria dentro do grupo maior, que são os conversores ca-ca.

Assim, a seguir serão apresentados os principais conceitos envolvendo os estabilizadores de tensão e na sequência deste capítulo o princípio de funcionamento dos mesmos.

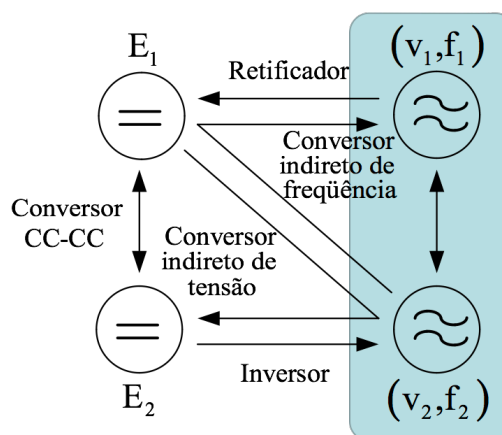


Figura 2 – Categorias de conversores estáticos.

Fonte: (Barbi, 2005).

2.2 Princípio Geral dos Conversores CC-CA

A Figura 3 mostra as formas de onda típicas de entrada e saída dos estabilizadores de tensão alternada, onde se pode notar que o objetivo principal é regular a amplitude de uma tensão alternada de saída a partir de uma tensão alternada de entrada. Em geral, os estabilizadores de tensão não alteram a frequência da forma de onda da saída, que será idêntica a frequência da entrada.

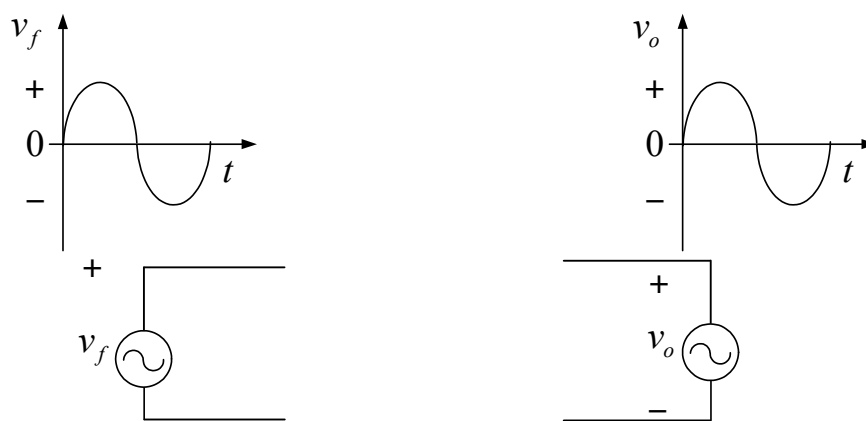


Figura 3 – Princípio geral dos estabilizadores de tensão alternada.

2.3 Classificação de Estabilizadores de Tensão

Os estabilizadores de tensão podem ser classificados de diferentes formas. Em (Petry, 2005) foi realizada uma extensa pesquisa das tecnologias disponíveis comercialmente e na literatura e como estes conversores eram classificados. Aqui usaremos uma classificação simples, conforme segue:

- Número de fases – em termos de número de fases, os estabilizadores podem ser monofásicos (uma fase), bifásicos (duas fases), trifásicos (três fases) ou n-fásicos, isto é, com qualquer número de fases; similarmente aos conversores ca-ca estudados no capítulo anterior. A Figura 4 mostra um exemplo de estabilizador monofásico, enquanto a Figura 5 mostra um estabilizador trifásico;
- Direcionalidade do fluxo de energia – os estabilizadores de tensão alternada, por princípio, devem ser bidirecionais em termos de fluxo de energia, visto se estar trabalhando com tensões positivas e negativas e correntes positivas e negativas;
- Frequência de comutação dos interruptores – os conversores podem operar em baixas frequências, com valor próximo ao da rede (60 Hz) ou alta frequência com modulação PWM senoidal, podendo chegar a dezena de kHz;
- Tecnologia dos interruptores – os estabilizadores de tensão podem ser implementados com relés, tiristores ou transistores (BJT, MOSFET, IGBT). As Figura 4, Figura 7 e Figura 8 mostram exemplos de estabilizadores com diferentes tecnologias, onde na primeira se utilizam tiristores, na segunda transistores e na terceira relés;
- Isolamento – os conversores ca-ca podem ser não-isolados ou isolados. Os exemplos das Figura 4, Figura 5, Figura 7 e Figura 8 são conversores não-isolados, enquanto o conversor da Figura 6 é um exemplo de conversor isolado;
- Forma de onda da saída – os estabilizadores podem alterar ou não a forma de onda da saída. Em geral, os equipamentos com tiristores e relés não alteram a forma de onda, enquanto equipamentos com transistores, pelo fato de operarem com modulação PWM senoidal, podem alterar o formato da tensão de saída;
- Modo de regulação da tensão – os estabilizadores podem ficar em série, entre a fonte e a carga ou operar como compensadores de tensão. As estruturas mostradas nas Figura 4 até Figura 8 são exemplos de conversores que ficam em série entre a fonte e a carga, enquanto o conversor mostrado na Figura 9 é um exemplo de compensador de tensão. As estruturas que compensam a tensão tem a vantagem de processarem apenas a parcela da potência da carga proporcional ao percentual de tensão que se deseja compensar. Assim, se for desejado compensar a tensão na saída em uma faixa de $\pm 20\%$ da tensão de entrada, então o conversor da Figura 9 seria dimensionado para 20% da potência da carga, o que torna esta estrutura muito competitiva industrialmente.

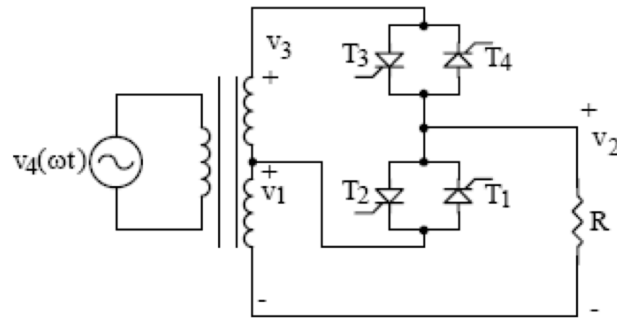


Figura 4 – Estabilizador monofásico.

Fonte: (Barbi, 2005).

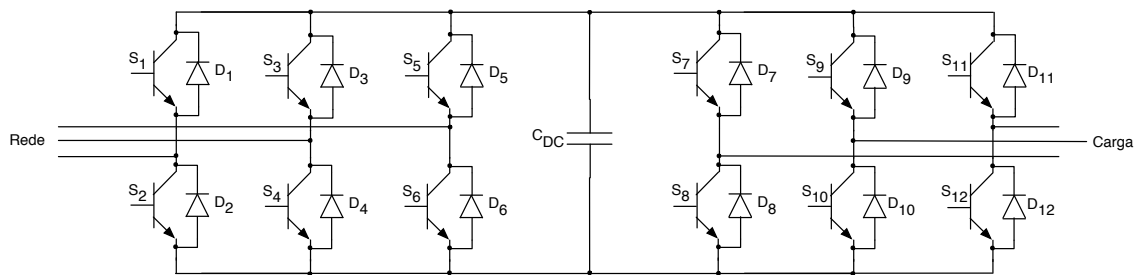


Figura 5 – Estabilizador trifásico.

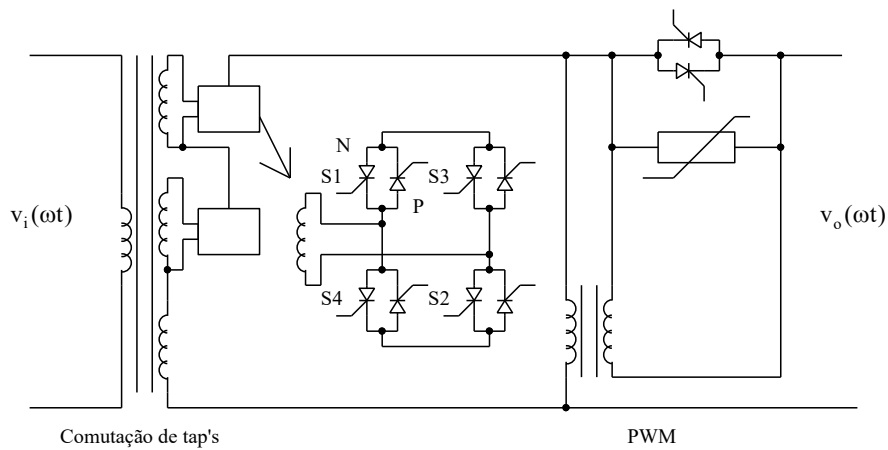


Figura 6 – Exemplo de estabilizador ca-ca isolado.

Fonte: (Petry, 2001).

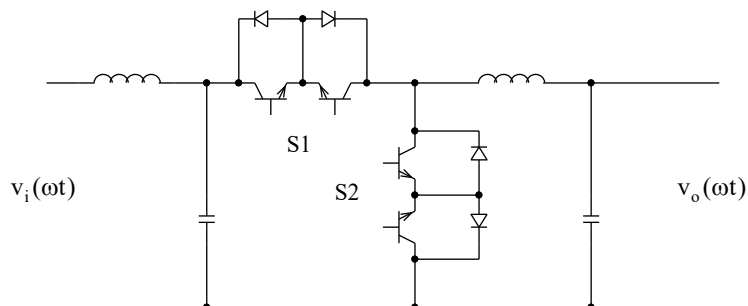


Figura 7 – Conversor ca-ca baseado no conversor Buck com filtro de entrada.

Fonte: (Petry, 2001).

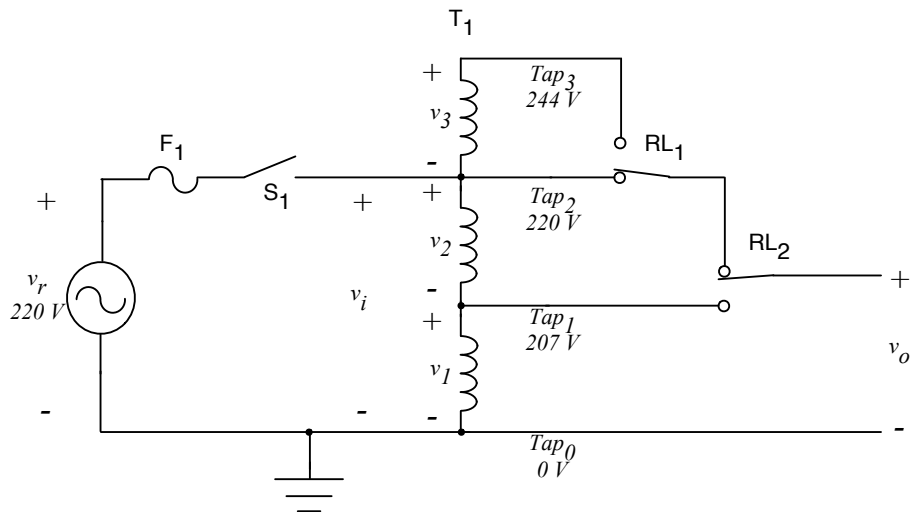


Figura 8 – Estabilizador com relés.

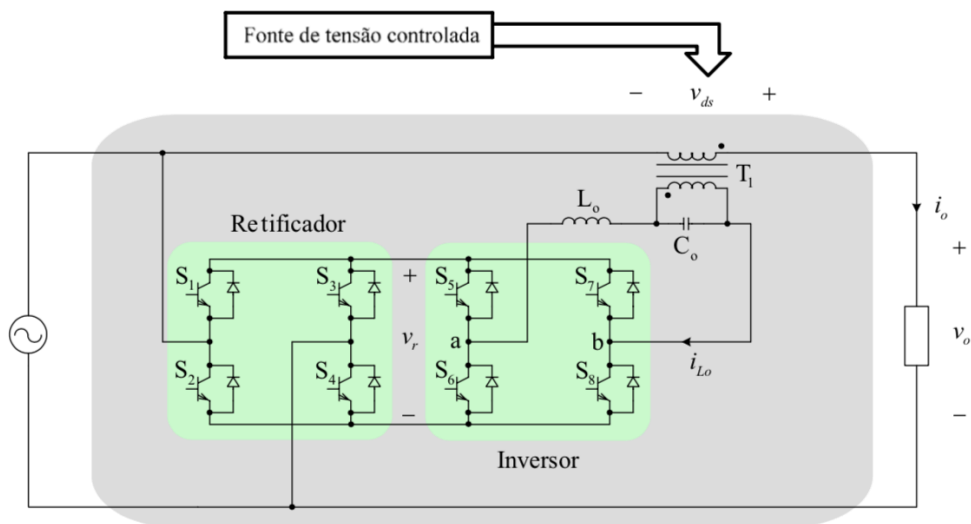


Figura 9 – Estabilizador compensador de tensão.

Fonte: (Petry, 2005).

2.4 Aplicações dos Estabilizadores de Tensão

Os estabilizadores de tensão tem inúmeras aplicações, sendo algumas delas:

- Alimentação de cargas sensíveis em laboratórios, hospitais, indústrias, equipamentos de informática, equipamentos de telecomunicações, etc;
- Condicionadores de tensão;
- Pré-estabilização em fontes de alimentação e UPS;
- Economia de energia;
- Sistemas de potência;
- Proteção de cargas de alto valor (sistemas de som e vídeo, por exemplo);
- Energias alternativas;
- Entre outras.

2.5 Utilidade dos Estabilizadores de Tensão

Atualmente é comum encontrar comentários na internet e em redes sociais sobre a inutilidade dos estabilizadores de tensão, muitas vezes até citações de que estes equipamentos prejudicam o funcionamento das cargas conectadas em sua saída.

Assim, esta parte do documento buscará desmistificar as aplicações e utilidades dos estabilizadores de tensão alternada.

2.5.1 Qualidade da Energia Elétrica

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) regulamenta os parâmetros de qualidade do sistema de energia elétrica, que levam em conta níveis de tensão, frequência, forma de onda (conteúdo harmônico) e falhas toleradas no fornecimento de energia pelas concessionárias de energia elétrica. Assim, em termos de amplitude das tensões que devem ser entregues pela concessionária, para uma rede de energia elétrica de 220 V, monofásica, e considerando o que dispõe a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL nos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST 2010, em termos de faixas de operação se tem:

- Adequada: tensão da rede entre 202 V e 231 V;
- Precária: tensão entre 191 V e 202 V ou entre 231 V e 233 V;
- Crítica: tensão abaixo de 191 V ou acima de 233 V.

Deste modo, os equipamentos eletroeletrônicos devem ser projetados para operarem corretamente na faixa considerada adequada. Neste sentido, os estabilizadores de tensão podem corrigir a amplitude da tensão, ampliando a faixa de atuação dos equipamentos eletroeletrônicos, tornando-os aptos para operação nas faixas precária e crítica.

Neste sentido, no século passado, a rede de energia elétrica possuía desempenho inferior ao que apresenta hoje, ocorrendo constantemente quedas de tensão, falta de energia, dentre outros distúrbios e faltas. Naquele contexto, era praticamente obrigatório o emprego de estabilizadores de tensão com cargas eletrônicas, como televisores, equipamentos de som, equipamentos de informática, etc.

Atualmente, o padrão da energia fornecida pela rede de energia elétrica é de alta qualidade, em geral, na maioria das regiões do Brasil. Assim, o uso de estabilizadores pode ser dispensado nos casos em que a rede de energia apresenta qualidade conhecida e garantida, pois os equipamentos eletrônicos são projetados, em sua maioria, para operarem dentro das faixas adequada e precária, e muitas vezes até na faixa crítica, conforme os níveis apresentados anteriormente.

Veja-se o exemplo de uma fonte chaveada para computador, *laptop*, *tablet*, telefone celular, etc. Estas fontes são projetadas para o mercado mundial e operam com tensões na faixa universal,

que vai de 85 a 264 V, incorporando completamente as faixas mostradas acima. Neste caso, estas fontes dispensam completamente o uso de estabilizadores, pois foram projetadas para variações grandes na tensão de entrada.

Por outro lado, se um estabilizador for empregado para alimentar uma fonte chaveada que opere na faixa universal, é possível que se tenha ganho de rendimento, pois esta fonte operando com uma tensão constante de 220 V terá corrente menor do que se estivesse operando com 90 V, por exemplo. Então neste caso, o uso do estabilizador traria benefícios, não problemas como muitas vezes argumentado na internet.

2.5.1 Velocidade de Correção dos Estabilizadores

A depender da tecnologia utilizada na construção dos estabilizadores de tensão, pode-se ter tempos de correção da tensão da saída da ordem de vários milisegundos, quando se utilizam relés ou tiristores, até alguns microsegundos quando se utilizam transistores operando em alta frequência. Assim, é importante destacar que o desempenho do estabilizador estará associado a tecnologia de comutação utilizada no seu desenvolvimento. Relés tem tempos de abertura e fechamento da ordem de 4 a 20 ms. Tiristores são mais rápidos, mas somente bloqueiam na passagem por zero da corrente elétrica, então se um tiristor for comando a abrir no início de um período, o mesmo só deixará de conduzir de fato em torno de 8 ms após o comando. Por outro lado, estabilizadores que empregam transistores podem ter tempos de resposta da ordem de alguns microsegundos, por exemplo de 10 a 20 μ s.

Neste contexto, um estabilizador que emprega relés ou tiristores terá uma resposta lenta e irá de fato corrigir o valor eficaz da tensão em sua saída, e não o valor instantâneo. Por isso é fundamental que se conheça a carga que se pretende conectar em sua saída, pois se for uma carga sensível a variações rápidas (abruptas) na tensão de entrada, então um estabilizador a relés ou tiristores pode não ter um desempenho efetivo e adequado para este tipo de carga.

2.5.1 Ruído Audível na Comutação de Estabilizadores

Além da resposta lenta de estabilizadores a relés, estes ainda apresentam ruídos na abertura e fechamento dos contatos do relé, o que pode gerar incomodo ao usuário, pois quando estiverem ocorrendo transitórios na tensão da rede de energia elétrica, o relé irá comutar seus contatos provocando ruídos. Este fenômeno as vezes é chamado de “o relé está batendo”, mas é compatível com o princípio de funcionamento destes equipamentos.

2.5.1 Proteção de Cargas de Alto Valor

É usual para consumidores de alto poder aquisitivo, que possuem em suas residências equipamentos de áudio e vídeo de milhares de reais (ou dólares) utilizarem equipamentos de proteção, pois se ocorrer alguma falta na rede (queda ou sobretensão), poderiam ocorrer danos a estes equipamentos gerando prejuízos de grande monta.

Assim, existem estabilizadores de alto desempenho disponíveis comercialmente, denominados de condicionadores de tensão alternada (*line conditioner*). Estes equipamentos foram estudados em detalhes em (Petry, 2005), mostrando-se na Figura 10 um exemplo de condicionador de tensão alternada disponível comercialmente, com faixa de preço da ordem de R\$ 9.000,00 em junho de 2020.



Figura 10 – Condicionador de tensão alternada.

Fonte: <https://www.panamax.com>. Acesso em: 17/06/2020.

2.1 Comutação dos Interruptores

A comutação dos conversores ca-ca é diferente daquela dos conversores cc-cc, pelo fato de se utilizar interruptores bidirecionais em tensão e corrente, pois se está operando com tensões e correntes alternadas.

No capítulo anterior foi abordado o problema da comutação de conversores ca-ca com transistores, quando se mostrou a necessidade de empregar tempo morto entre o acionamento dos interruptores ou então tempo de sobreposição. Conforme cada solução, poderia ocorrer a interrupção da corrente da carga e sobretensões nos interruptores ou então curto-circuito na fonte de alimentação, quando utilizando tempo morto ou tempo de sobreposição dos sinais de comando das chaves. Assim, para os conversores ca-ca com transistores foram desenvolvidas técnicas de comando adequadas para resolver o problema da comutação, que estão apresentadas na literatura e em artigos técnicos.

Por sua vez, os conversores com relés ou tiristores também podem apresentar problemas de comutação, especialmente quando a carga é indutiva, o que será apresentado a seguir neste capítulo.

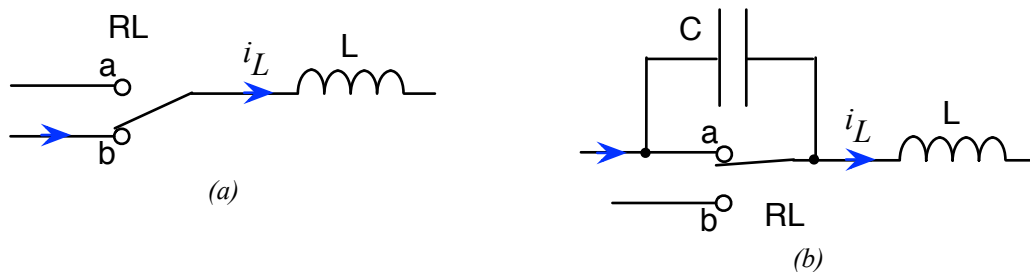
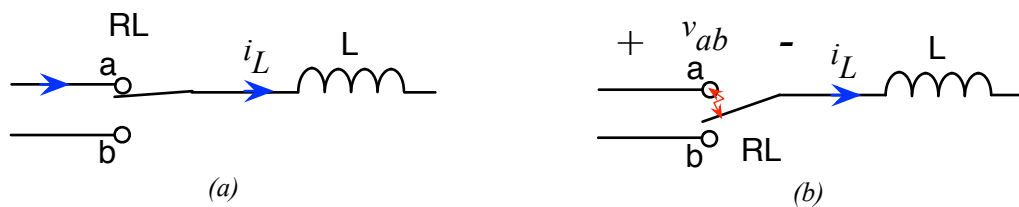
2.1.1 Comutação de Relés com Cargas Indutivas

O relé é um dispositivo eletromecânico que tem um tempo de comutação grande, podendo ser maior do que 10 ms, conforme o modelo de relé utilizado. Este tempo decorre da movimentação do contato, a partir do acionamento da bobina do relé, que após criar o campo magnético, que exercerá uma força magnética sobre uma lâmina, deslocará o contato, vencendo a resistência de uma mola, até a nova posição (aberta ou fechada). Assim, este tempo para a origem do campo magnético, da força e do deslocamento da lâmina é que representa o tempo de comutação do interruptor.

A Figura 11 mostra um circuito simplificado, onde um relé está conectado em uma carga

indutiva (L), pela qual está circulando uma corrente i_L . Inicialmente o relé está na posição “a”, como mostrado na Figura 11a. Em seguida, o relé é acionado a comutar, ou seja, mudar a posição do contato comum da posição “a” para a posição “b”, como mostrado na Figura 11b. Neste caso, o contato se afasta da posição inicial, interrompendo o caminho da corrente elétrica (i_L) e sendo a carga indutiva, irá ocorrer a indução de uma tensão elevada sobre o indutor L, em virtude da rápida variação (derivada) da corrente no indutor. Este valor de tensão irá aparecer sobre os contatos do relé, representada na figura por v_{ab} . Se a energia armazenada na indutância for alta o suficiente, poderá aparecer um arco elétrico no contato do relé, provocando danos ao mesmo e sua destruição ao longo do tempo.

A Figura 12a mostra o fim da comutação, quando o contato está posicionado em “b” e a corrente está fluindo normalmente. Para minimizar o problema da sobretensão nos contatos dos relés, podem ser usados capacitores de pequeno valor em paralelo com os contatos, como mostrado na Figura 12b. Outras soluções também são possíveis, como usar varistores, circuitos RC, etc.



2.1.1 Comutação de Tiristores com Cargas Indutivas

Os tiristores são componentes com tempos de comutação bem menores do que os relés, sendo da ordem de alguns microsegundos. No entanto, os tiristores, de modo idêntico aos diodos, somente bloqueiam quando a corrente nos mesmos se torna nula. Isso significa que em um tiristor, comanda-se o instante em que o mesmo entra em condução, mas seu bloqueio é determinado pela corrente do circuito.

A Figura 13 mostra um circuito simplificado, onde um tiristor está conectado em uma carga indutiva (L), pela qual está circulando uma corrente i_L . Inicialmente o tiristor T_1 está conduzindo, como mostrado na Figura 13. Neste caso, tanto o tiristor T_1 como o tiristor T_2 estarão comandados a conduzir, pois a corrente pode ser positiva ou negativa, dependendo da carga. Em outras palavras, o interruptor bidirecional em corrente e tensão é formado pelo conjunto T_1/T_2 e pelo conjunto T_3/T_4 .

Ao se comandar o conjunto T_3/T_4 , a corrente da carga ainda estará circulando por T_1 , pois este somente irá bloquear quando a corrente zerar no mesmo. Nesta situação, pela presença da fonte v_i , irá ocorrer um curto-circuito nesta fonte, com a corrente de curto-circuito passando por T_1 e T_4 , conforme mostrado na Figura 14. A fonte v_i pode ser o enrolamento de um transformador, como mostrado na Figura 8.

Uma forma simples de resolver o problema do curto-circuito gerado na comutação dos tiristores com cargas indutivas é mostrada na Figura 15 onde se utilizam resistências em série com os interruptores para limitar a corrente de curto-circuito. Apesar de não ser uma solução energeticamente eficiente, em virtude das perdas nestas resistências, a mesma é simples, robusta e fácil de implementar; levando em conta que a corrente de surto suportada pelos tiristores é muito alta, então a resistência série será baixa, com valor da ordem de miliohms até alguns ohms.

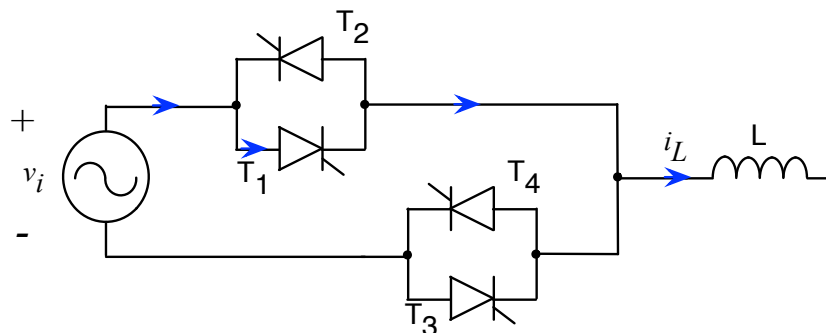


Figura 13 – Comutação de tiristor com carga indutiva.

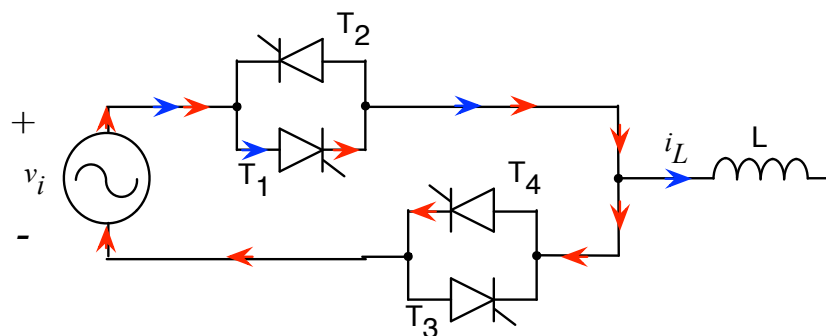


Figura 14 – Curto-circuito gerado na comutação de tiristor com carga indutiva.

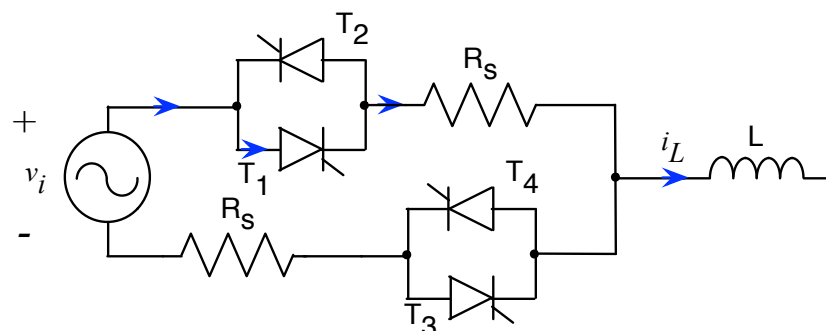


Figura 15 – Circuito com tiristores e resistência para limitar a corrente de curto-circuito.

3 Conversor CA-CA a Relés

3.1 Introdução

O estabilizador a relés a ser estudado neste item está mostrado na Figura 16, sendo monofásico, com uma fonte de tensão na entrada (v_i), um autotransformador (T_1) com três enrolamentos e dois relés (R_{L1} e R_{L2}) para conectar a saída aos enrolamentos do autotransformador.

O uso de autotransformadores é frequente em eletrônica de potência, quando não houver necessidade de isolamento, em virtude de terem menor volume e custo do que os transformadores com primário e secundário, por exemplo. As tensões nos enrolamentos do autotransformador foram explicitadas para servirem de exemplo no funcionamento deste conversor.

A tecnologia de estabilizador apresentada na Figura 16 é também conhecida como estabilizador com *taps* variáveis, isto é, que utiliza derivações de transformadores ou autotransformadores. Esta solução é muito empregada em sistemas de potência, para ajustar a tensão nas redes de distribuição, ajustando-se a derivação (*tap*) do transformador de distribuição presentes nas ruas próximos as residências dos consumidores.

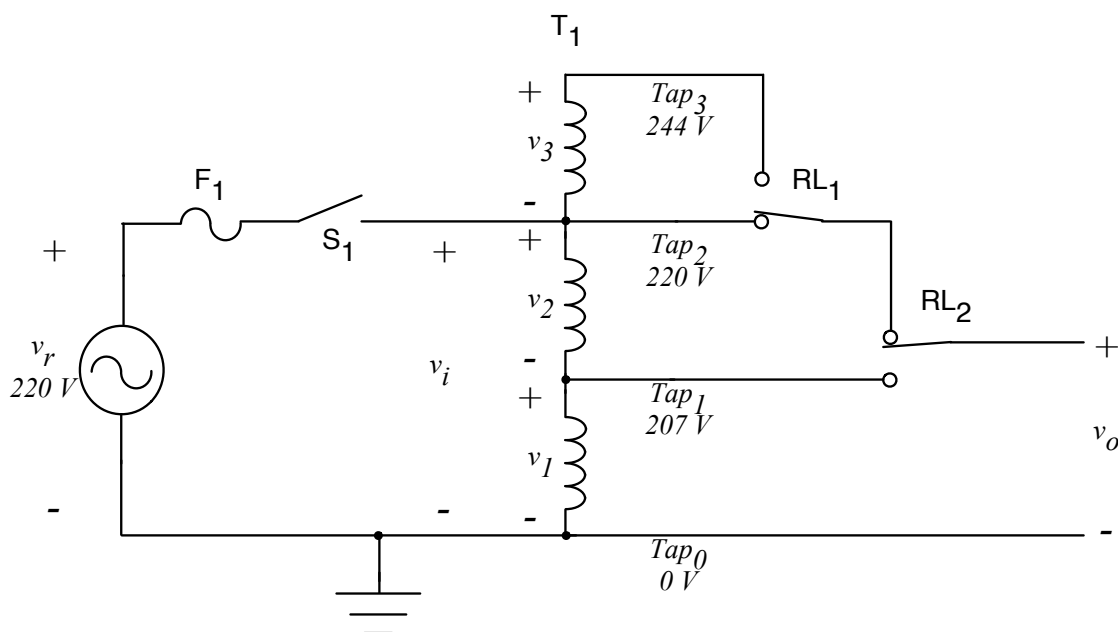


Figura 16 – Estabilizador com relés.

3.2 Princípio de Funcionamento do Estabilizador com Relés

O estabilizador da Figura 16 será estudado considerando-se que a tensão de entrada irá operar com três níveis distintos em sua tensão, sendo tensão nominal, abaixo da nominal e acima da nominal, para se exemplificar a estratégia de escolha da derivação adequada do autotransformador T_1 . O circuito da Figura 16 possui um fusível de proteção na entrada (F_1) e uma chave liga-desliga

(S₁), que tem a função de desconectar o circuito da rede quando não estiver em uso.

Nota-se pela Figura 16 que a posição de repouso dos contatos dos relés conectará a saída diretamente na entrada, correspondendo a situação para operação com tensão nominal ou na faixa adequada na entrada. Lembrando que as faixas de tensão da rede de energia elétrica, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL nos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST 2010, são:

- Adequada: tensão da rede entre 202 V e 231 V;
- Precária: tensão entre 191 V e 202 V ou entre 231 V e 233 V;
- Crítica: tensão abaixo de 191 V ou acima de 233 V.

O estabilizador com relés, dependendo da amplitude da tensão de entrada, pode operar em três situações distintas, descritas a seguir:

1ª Etapa (0, T₁) – A tensão de entrada está em seu valor nominal ou dentro da faixa adequada (202 até 231 V) não sendo acionado nenhum relé. A tensão de saída é igual a tensão de entrada. Os relés R_{L1} e R_{L2} estão em repouso. Esta etapa de operação é mostrada na Figura 17;

2ª Etapa (T₁, T₂) – A tensão de entrada está abaixo do seu valor nominal, ou seja, na faixa precária (191 até 202 V). A saída será a tensão de entrada mais a tensão do enrolamento três (*tap 3*) do autotransformador. O relé R_{L1} é acionado, enquanto o R_{L2} continua em repouso. Esta etapa de operação é mostrada na Figura 18;

3ª Etapa (T₂, T₃) – A tensão de entrada está acima do seu valor nominal, ou seja, na faixa precária (231 até 233 V). A saída será a tensão de entrada menos a tensão do enrolamento dois (*tap 1*) do autotransformador. O relé R_{L1} estará em repouso, enquanto o R_{L2} será acionado. Esta etapa de operação é mostrada na Figura 19.

As etapas de operação descritas anteriormente podem durar o tempo que for necessário, em virtude do comportamento da tensão de entrada. Aqui, para fins de estudo, considerou-se um período da rede para cada etapa de operação, para fins de simplificação.

As formas de onda da tensão de entrada (v_i), tensão de saída (v_o) e comando dos relés são mostradas na Figura 20 onde se nota que as tensões são senoidais, já que esta tecnologia de conversor não altera a forma de onda da tensão disponibilizada na saída.

A comutação dos relés foi realizada na passagem por zero da tensão de entrada (*zero crossing*), técnica comumente utilizada na indústria para minimizar os problemas de comutação discutidos anteriormente.

Para fins de simplificação, não foram considerados os tempos de comutação dos relés nas etapas de funcionamento e desenho das formas de onda mostradas na Figura 20.

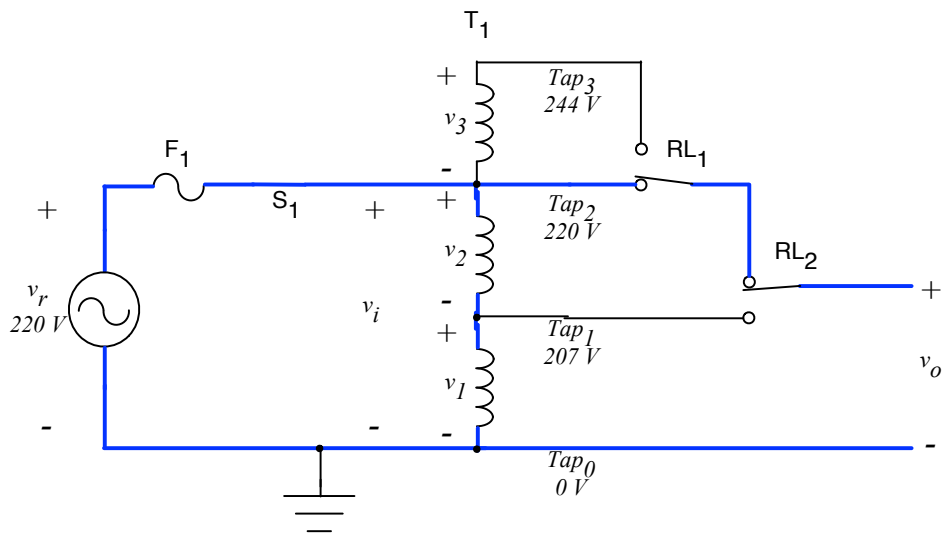


Figura 17 – Etapa de operação do estabilizador com relés para tensão de entrada nominal.

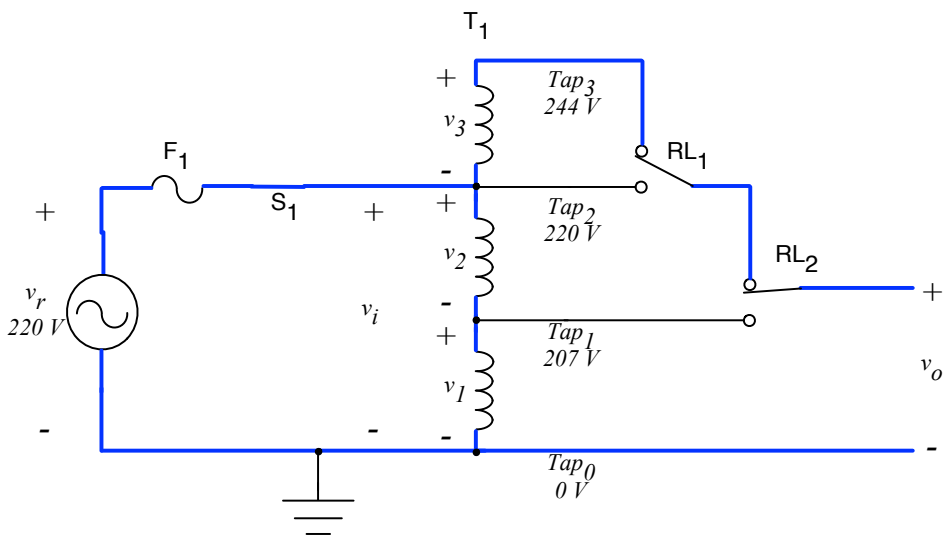


Figura 18 – Etapa de operação do estabilizador com relés para tensão de entrada abaixo do nominal.

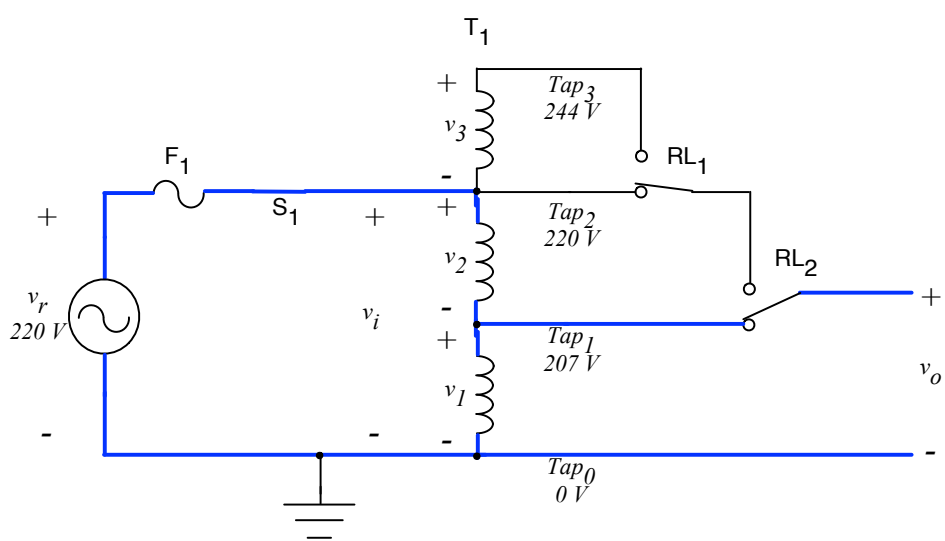


Figura 19 – Etapa de operação do estabilizador com relés para tensão de entrada acima da nominal.

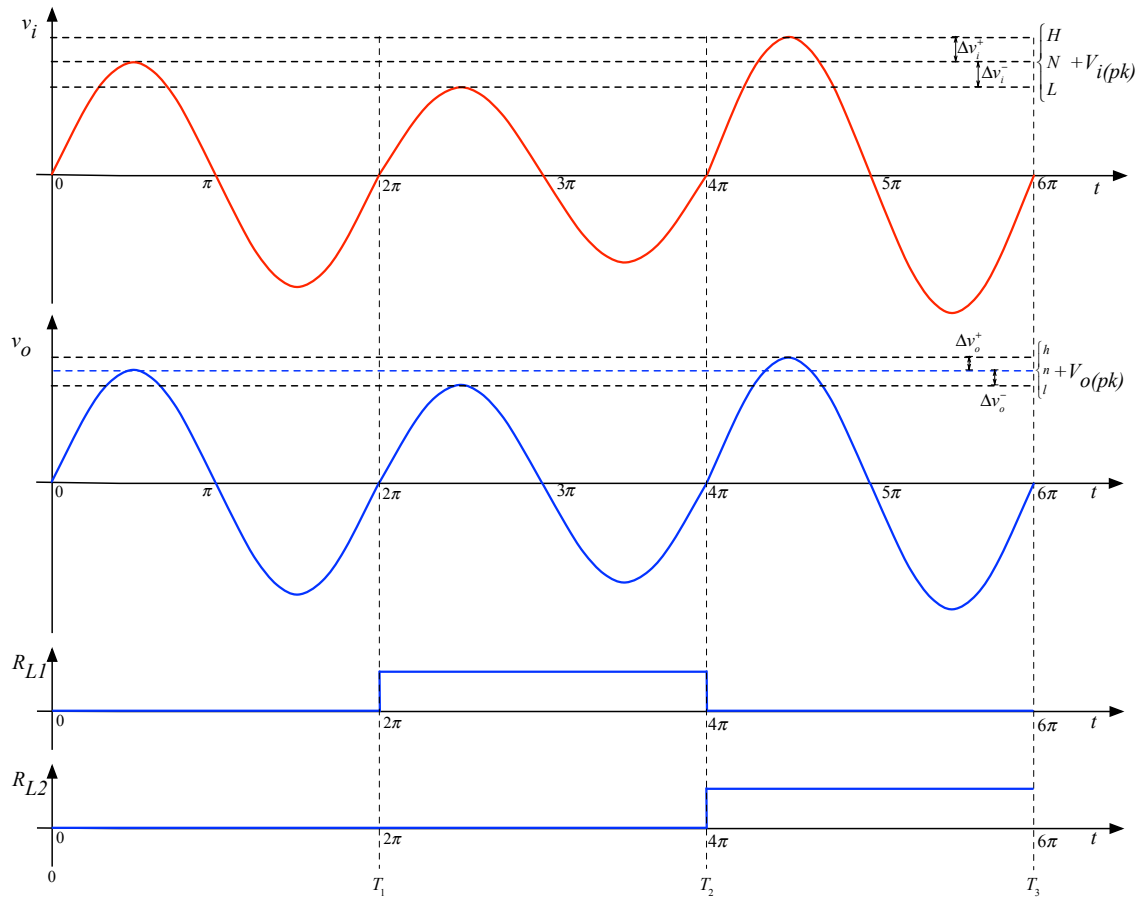


Figura 20 – Formas de onda do estabilizador com relés.

A tensão de entrada (v_i) foi representada na Figura 20 pelo seu valor de pico (V_{pk}). Considerando que os componentes são ideais, a tensão de saída será:

$$v_i = v_r ;$$

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

$$v_o = \begin{cases} v_o = v_i \rightarrow R_{L1} \text{ e } R_{L2} \text{ off} \\ v_o = v_i + v_3 \rightarrow R_{L1} \text{ on e } R_{L2} \text{ off} \\ v_o = v_i - v_2 \rightarrow R_{L1} \text{ off e } R_{L2} \text{ on} \end{cases} .$$

As tensões instantâneas em cada derivação (*tap*) foram dadas na Figura 16. Considerando que a tensão de entrada seja de 220 V, se terá:

$$v_{Tap_1} = 207V \rightarrow v_i = 220V ;$$

$$v_{Tap_2} = 220V \rightarrow v_i = 220V ;$$

$$v_{Tap_3} = 244V \rightarrow v_i = 220V .$$

As tensões nos secundários são dadas por:

$$v_1 = \frac{v_i}{n_1} \rightarrow n_1 = \frac{220}{207} = 1,064 ;$$

$$v_2 = \frac{v_i}{n_2} \rightarrow n_2 = \frac{220}{220 - 207} = 16,95 ;$$

$$v_3 = \frac{v_i}{n_3} \rightarrow n_3 = \frac{220}{244 - 220} = 9,17 .$$

Assim, durante a primeira etapa de operação, quando nenhum relé é acionado, a tensão de saída é igual a tensão de entrada. A tensão de entrada é mostrada na Figura 20 pelo seu valor nominal como sendo $V_{i(pk)} N$. Esta etapa será definida como sendo:

$$v_o = v_i \rightarrow R_{L1} \text{ e } R_{L2} \text{ off} \rightarrow 202V \leq v_i \leq 231V .$$

Já a segunda etapa de operação, quando a tensão de entrada estiver abaixo do valor nominal, mostrada na Figura 20 como $V_{i(pk)} L$, isto é:

$$v_{i(pk)} = v_{i(pk)} L - \Delta v_i^- .$$

Assim, se a tensão de entrada estiver abaixo de 202 V, será acionado relé R_{L1} , fazendo com que a tensão de saída seja aumentada. O valor da tensão de saída será então:

$$v_o = v_i + v_3 \rightarrow R_{L1} \text{ on e } R_{L2} \text{ off} \rightarrow 191V \leq v_i \leq 202V .$$

Assim, nos limites inferior e superior se terá:

$$v_o = v_i + v_3 \rightarrow v_o = v_i + \frac{v_i}{n_1} \rightarrow v_o = 191 + \frac{191}{9,17} \cong 212V ;$$

$$v_o = 202 + \frac{202}{9,17} = 224V .$$

Nota-se que as tensões resultantes na saída estão dentro da faixa considerada adequada pela ANEEL.

Por sua vez, se a tensão de entrada estiver acima de 231 V, será acionado relé R_{L2} , fazendo com que a tensão de saída seja diminuída. O valor da tensão de saída será então:

$$v_o = v_i - v_2 \rightarrow R_{L1} \text{ off e } R_{L2} \text{ on} \rightarrow 231V \leq v_i \leq 233V .$$

Assim, nos limites inferior e superior se terá:

$$v_o = v_i - v_2 \rightarrow v_o = v_i - \frac{v_i}{n_2} = 231 - \frac{231}{16,95} = 217,4V ;$$

$$v_o = 233 - \frac{233}{16,95} = 219,2V$$

Nota-se que as tensões resultantes na saída estão dentro da faixa considerada adequada pela ANEEL.

O valor de pico da tensão de saída é obtido diretamente por:

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

As correntes na carga dependerão do tipo de carga que estará conectada na saída. Em sendo carga resistiva se terá:

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

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

A potência aparente e a potência ativa na saída podem ser calculadas por:

$$S_o = V_{o(ef)} \cdot I_{o(ef)} [VA]$$

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

Para cargas resistivas, a potência aparente será igual a potência ativa e o fator de potência será unitário.

4 Conversor CA-CA a Tiristores

4.1 Introdução

O estabilizador a relés a ser estudado neste item está mostrado na Figura 16, sendo monofásico, com uma fonte de tensão na entrada (v_i), um autotransformador (T_1) com três enrolamentos e dois relés (R_{L1} e R_{L2}) para conectar a saída aos enrolamentos do autotransformador.

O uso de autotransformadores é frequente em eletrônica de potência, quando não houver necessidade de isolamento, em virtude de terem menor volume e custo do que os transformadores com primário e secundário, por exemplo. As tensões nos enrolamentos do autotransformador foram explicitadas para servirem de exemplo no funcionamento deste conversor.

A tecnologia de estabilizador apresentada na Figura 16 é também conhecida como estabilizador com *taps* variáveis, isto é, que utiliza derivações de transformadores ou autotransformadores. Esta solução é muito empregada em sistemas de potência, para ajustar a tensão nas redes de distribuição, ajustando-se a derivação (*tap*) do transformador de distribuição presentes nas ruas próximos as residências dos consumidores.

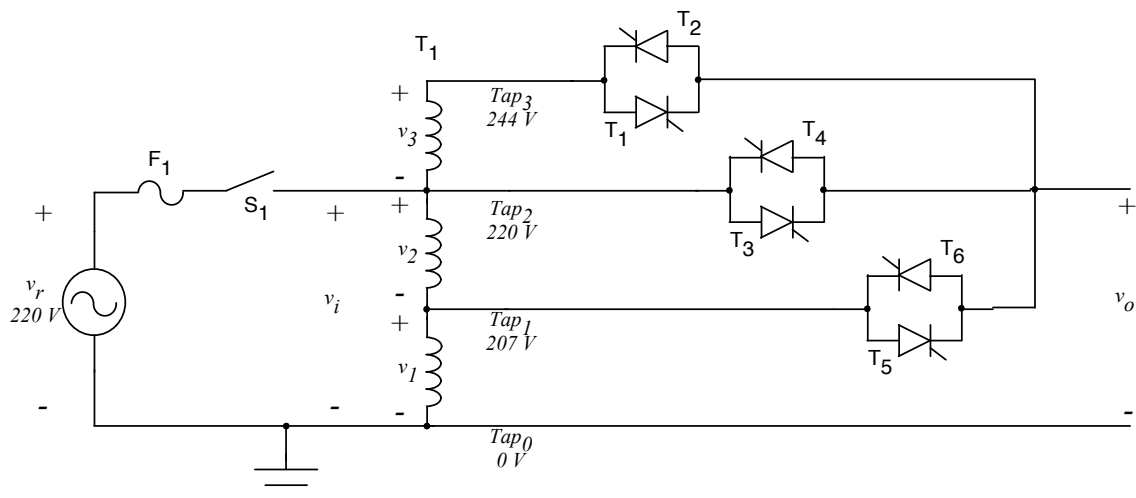


Figura 21 – Estabilizador com tiristores.

4.2 Princípio de Funcionamento do Estabilizador com Relés

O estabilizador da Figura 21 será estudado considerando-se que a tensão de entrada irá operar com três níveis distintos em sua tensão, sendo tensão nominal, abaixo da nominal e acima da nominal, para se exemplificar a estratégia de escolha da derivação adequada do autotransformador T_1 . O circuito da Figura 21 possui um fusível de proteção na entrada (F_1) e uma chave liga-desliga (S_1), que tem a função de desconectar o circuito da rede quando não estiver em uso.

O estabilizador com tiristores, dependendo da amplitude da tensão de entrada, pode operar em três situações distintas, descritas a seguir:

1ª Etapa ($0, T_1$) – A tensão de entrada está em seu valor nominal ou dentro da faixa adequada (202 até 231 V). A tensão de saída é igual a tensão de entrada. O conjunto de tiristores T_3/T_4 será acionado (*on*), estando os demais conjuntos bloqueados (T_1/T_2 e T_5/T_6 *off*). Esta etapa de operação é mostrada na Figura 22;

2ª Etapa (T_1, T_2) – A tensão de entrada está abaixo do seu valor nominal, ou seja, na faixa precária (191 até 202 V). A saída será a tensão de entrada mais a tensão do enrolamento três (*tap 3*) do autotransformador. O conjunto de tiristores T_1/T_2 será

acionado (*on*), estando os demais conjuntos bloqueados (T_3/T_4 e T_5/T_6 *off*). Esta etapa de operação é mostrada na Figura 23;

3ª Etapa (T_2, T_3) – A tensão de entrada está acima do seu valor nominal, ou seja, na faixa precária (231 até 233 V). A saída será a tensão de entrada menos a tensão do enrolamento dois (*tap* 1) do autotransformador. O conjunto de tiristores T_5/T_6 será acionado (*on*), estando os demais conjuntos bloqueados (T_1/T_2 e T_3/T_4 *off*). Esta etapa de operação é mostrada na Figura 24.

As etapas de operação descritas anteriormente podem durar o tempo que for necessário, em virtude do comportamento da tensão de entrada. Aqui, para fins de estudo, considerou-se um período da rede para cada etapa de operação, para fins de simplificação.

As formas de onda da tensão de entrada (v_i), tensão de saída (v_o) e comando dos tiristores são mostradas na Figura 25 onde se nota que as tensões são senoidais, já que esta tecnologia de conversor não altera a forma de onda da tensão disponibilizada na saída.

A comutação dos tiristores foi realizada na passagem por zero da tensão de entrada (*zero crossing*), técnica comumente utilizada na indústria para minimizar os problemas de comutação discutidos anteriormente. Para fins de simplificação, não foram considerados os tempos de comutação dos tiristores nas etapas de funcionamento e desenho das formas de onda mostradas na Figura 25.

A tensão de entrada (v_i) foi representada na Figura 25 pelo seu valor de pico (V_{pk}). Considerando que os componentes são ideais, a tensão de saída será:

$$v_i = v_r ;$$

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

$$v_o = \begin{cases} v_o = v_i \rightarrow R_{L1} \text{ e } R_{L2} \text{ off} \\ v_o = v_i + v_3 \rightarrow R_{L1} \text{ on e } R_{L2} \text{ off} \\ v_o = v_i - v_2 \rightarrow R_{L1} \text{ off e } R_{L2} \text{ on} \end{cases} .$$

As tensões instantâneas em cada derivação (*tap*) foram dadas na Figura 21. Considerando que a tensão de entrada seja de 220 V, se terá:

$$v_{Tap_1} = 207V \rightarrow v_i = 220V ;$$

$$v_{Tap_2} = 220V \rightarrow v_i = 220V ;$$

$$v_{Tap_3} = 244V \rightarrow v_i = 220V .$$

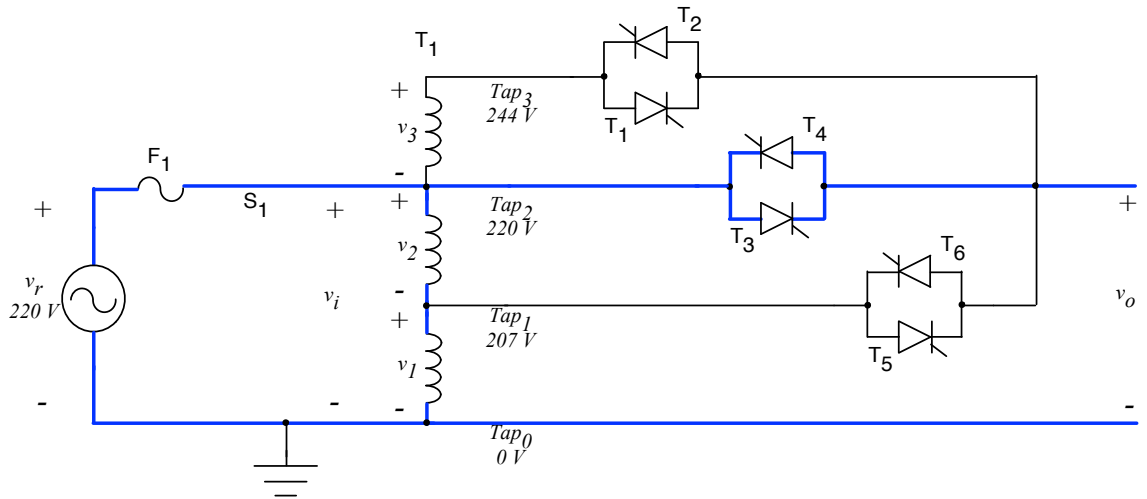


Figura 22 – Etapa de operação do estabilizador com tiristores para tensão de entrada nominal.

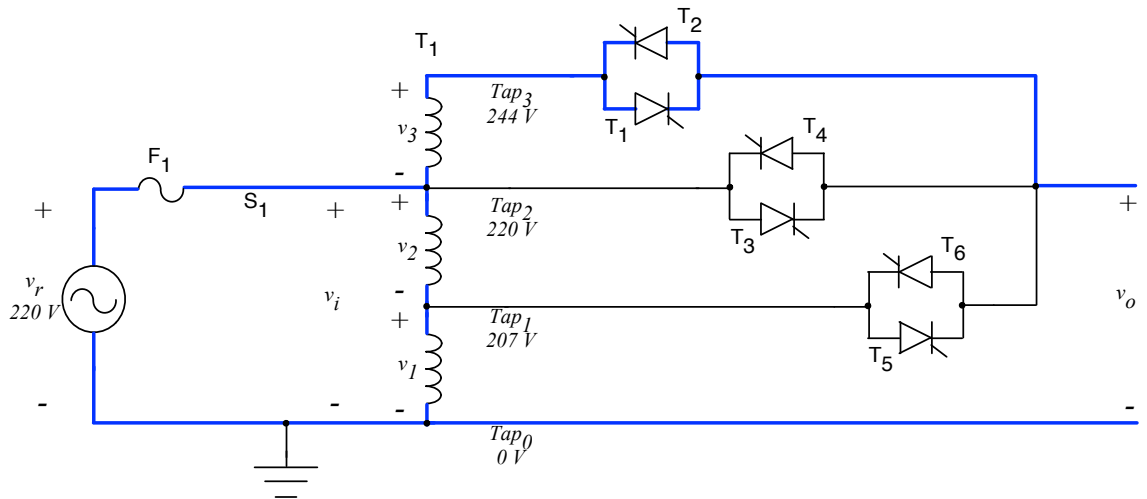


Figura 23 – Etapa de operação do estabilizador com tiristores para tensão de entrada abaixo do nominal.

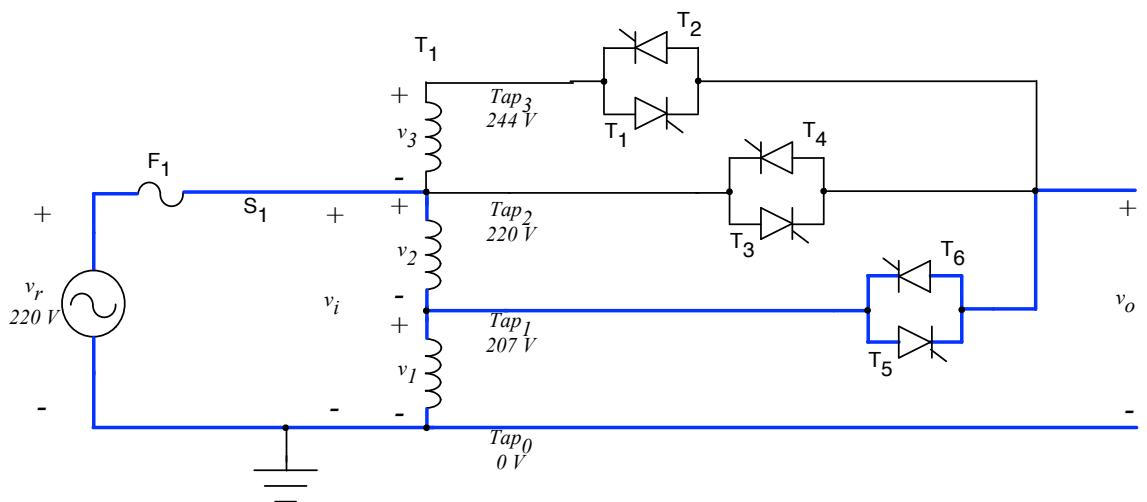


Figura 24 – Etapa de operação do estabilizador com tiristores para tensão de entrada acima da nominal.

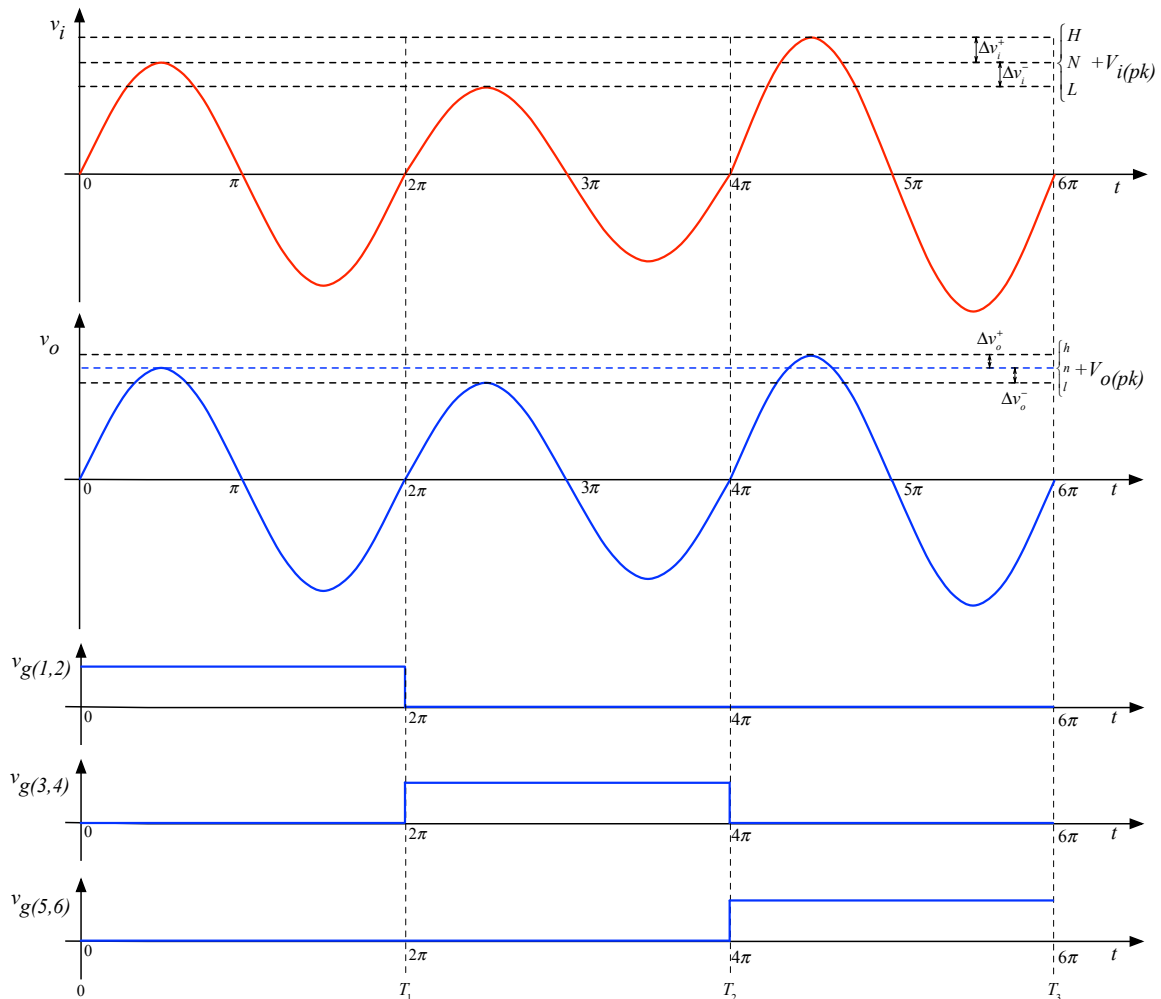


Figura 25 – Formas de onda do estabilizador com tiristores.

As tensões nos secundários são dadas por:

$$v_1 = \frac{v_i}{n_1} \rightarrow n_1 = \frac{220}{207} = 1,064 ;$$

$$v_2 = \frac{v_i}{n_2} \rightarrow n_2 = \frac{220}{220 - 207} = 16,95 ;$$

$$v_3 = \frac{v_i}{n_3} \rightarrow n_3 = \frac{220}{244 - 220} = 9,17 .$$

Assim, durante a primeira etapa de operação, quando nenhum o conjunto de tiristores T_3/T_4 será acionado (*on*), estando os demais conjuntos bloqueados (T_1/T_2 e T_5/T_6 *off*), a tensão de saída é igual a tensão de entrada. A tensão de entrada é mostrada na Figura 25 pelo seu valor nominal como sendo $V_{i(pk)} N$. Esta etapa será definida como sendo:

$$v_o = v_i \rightarrow R_{L1} \text{ e } R_{L2} \text{ off} \rightarrow 202V \leq v_i \leq 231V$$

Já a segunda etapa de operação, quando a tensão de entrada estiver abaixo do valor nominal, mostrada na Figura 25 como $V_{i(pk)} L$, isto é:

$$v_{i(pk)} = v_{i(pk)} L - \Delta v_i^-$$

Assim, se a tensão de entrada estiver abaixo de 202 V, será acionado (*on*) o conjunto de tiristores T_1/T_2 , estando os demais conjuntos bloqueados (T_3/T_4 e T_5/T_6 *off*), fazendo com que a tensão de saída seja aumentada. O valor da tensão de saída será então:

$$v_o = v_i + v_3 \rightarrow R_{L1} \text{ on e } R_{L2} \text{ off} \rightarrow 191V \leq v_i \leq 202V$$

Assim, nos limites inferior e superior se terá:

$$v_o = v_i + v_3 \rightarrow v_o = v_i + \frac{v_i}{n_1} \rightarrow v_o = 191 + \frac{191}{9,17} \cong 212V$$

$$v_o = 202 + \frac{202}{9,17} = 224V$$

Nota-se que as tensões resultantes na saída estão dentro da faixa considerada adequada pela ANEEL.

Por sua vez, se a tensão de entrada estiver acima de 231 V, será acionado (*on*) o conjunto de tiristores T_5/T_6 , estando os demais conjuntos bloqueados (T_1/T_2 e T_3/T_4 *off*), fazendo com que a tensão de saída seja diminuída. O valor da tensão de saída será então:

$$v_o = v_i - v_2 \rightarrow R_{L1} \text{ off e } R_{L2} \text{ on} \rightarrow 231V \leq v_i \leq 233V$$

Assim, nos limites inferior e superior se terá:

$$v_o = v_i - v_2 \rightarrow v_o = v_i - \frac{v_i}{n_2} = 231 - \frac{231}{16,95} = 217,4V$$

$$v_o = 233 - \frac{233}{16,95} = 219,2V$$

Nota-se que as tensões resultantes na saída estão dentro da faixa considerada adequada pela ANEEL.

O valor de pico da tensão de saída é obtido diretamente por:

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

As correntes na carga dependerão do tipo de carga que estará conectada na saída. Em sendo

carga resistiva se terá:

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

A potência aparente e a potência ativa na saída podem ser calculadas por:

$$S_o = V_{o(ef)} \cdot I_{o(ef)} [VA].$$

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

Para cargas resistivas, a potência aparente é igual a potência ativa e o fator de potência será unitário.

5 Conversor CA-CA a Transistores

5.1 Introdução

O estabilizador a transistores a ser estudado neste item está mostrado na Figura 26, sendo monofásico, com uma fonte de tensão na entrada (v_i), quatro interruptores e um filtro de saída de segunda ordem. Este conversor é semelhante ao conversor Buck cc-cc estudado anteriormente neste curso, com a diferença de que agora são necessários bidirecionais em tensão e corrente.

O conversor Buck ca-ca é um conversor abaixador. Assim, a tensão de saída do conversor deverá ser necessariamente menor que a tensão de entrada. Uma aplicação típica da solução apresentada na Figura 26 seria um conversor com entrada em 220 V e saída em 110 V, por exemplo, podendo ser usado para alimentação de cargas com tensão estabilizada em situações que requeiram uma tensão fixa na entrada.

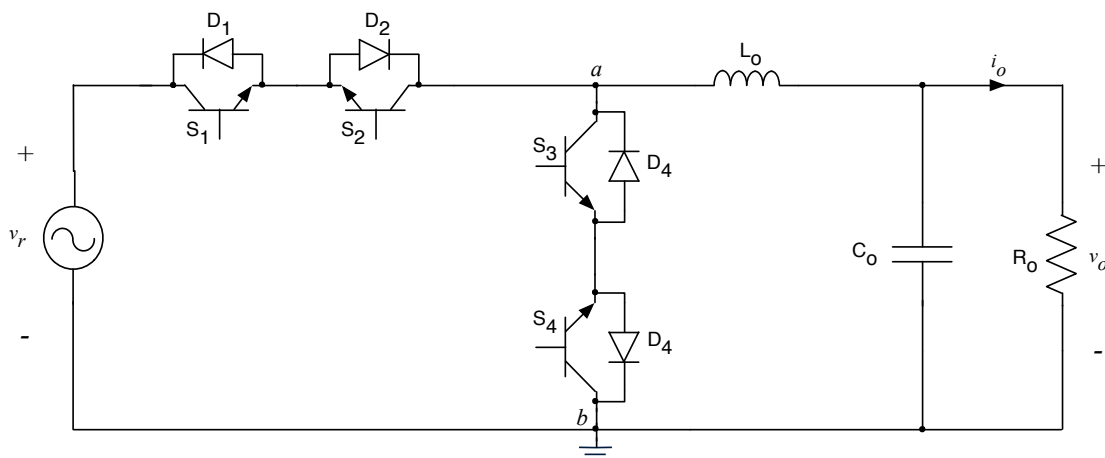


Figura 26 – Estabilizador com transistores.

5.2 Princípio de Funcionamento do Estabilizador com Transistores

O estabilizador da Figura 26 será estudado considerando-se que a tensão de entrada irá operar com três níveis distintos em sua tensão, sendo tensão nominal, abaixo da nominal e acima da nominal, para se exemplificar a estratégia de escolha da derivação adequada do autotransformador T_1 . O circuito da Figura 26 é um conversor Buck, semelhante ao conversor cc-cc, mas agora com interruptores bidirecionais em tensão e corrente. Assim, o conjunto S_1/D_1 e S_2/D_2 formam o equivalente ao interruptor do conversor Buck cc-cc, enquanto o conjunto S_3/D_3 e S_4/D_4 formam o diodo do conversor cc-cc equivalente. O filtro de saída é formado pelo indutor L_o e pelo capacitor C_o , sendo que a carga é resistiva formada por R_o .

O problema da comutação dos conversores ca-ca operando em alta frequência, discutido no capítulo anterior, não será levado em conta aqui, considerando-se que a comutação ocorre naturalmente do conjunto superior (S_1/D_1 e S_2/D_2) para o conjunto inferior (S_3/D_3 e S_4/D_4) responsável pela roda-livre.

O estabilizador com transistores, irá operar de maneira semelhante ao conversor Buck cc-cc, tendo etapa de condução dos interruptores superiores e a etapa de condução dos interruptores responsáveis pela roda-livre. A depender do sentido da corrente na carga, se terá elementos diferentes conduzindo.

As etapas de operação para o semiciclo positivo da tensão de entrada e corrente positiva no indutor, considerando o período de comutação dos interruptores (alta frequência) serão descritas a seguir:

1ª Etapa ($0, D \cdot T_s$) – O conjunto superior de interruptores estará conduzindo. Se a corrente no indutor for positiva, estará conduzindo S_1 e D_2 , conforme mostrado na Figura 27. Caso a corrente no indutor for negativa se terá a Figura 29. Nesta etapa a fonte de entrada fornece energia ao indutor, capacitor e carga, sendo que o indutor armazena energia durante a mesma;

2ª Etapa ($D \cdot T_s, T_s$) – O conjunto inferior de interruptores estará conduzindo. Se a corrente no indutor for positiva, estará conduzindo S_3 e D_4 , conforme mostrado na Figura 28. Se a corrente na carga for negativa se tem a Figura 30. Esta é a etapa de roda-livre, onde a energia transferida ao indutor na primeira etapa é transferida ao capacitor e à carga.

As etapas de operação descritas anteriormente se repetem indefinidamente, enquanto o conversor estiver ligado, em caso de condução contínua (CCM). Se a condução for descontínua (DCM), se tem mais uma etapa, descrita a seguir:

3ª Etapa ($D \cdot T_s, T_s$) – A corrente no indutor é nula e nenhum interruptor estará conduzindo. Esta etapa é mostrada na Figura 31.

As formas de onda da tensão de entrada (v_i), tensão de saída (v_o), tensão antes da filtragem (v_{ab}) e comando dos interruptores são mostradas na Figura 32, onde se nota a semelhança com as formas de onda do conversor Buck cc-cc, com a diferença que agora se tem uma variação senoidal, ou seja, a envoltória das tensões e correntes terá o formato senoidal.

As etapas de funcionamento do estabilizador com transistores, do ponto de vista da amplitude da tensão de entrada, serão descritas a seguir:

1ª Etapa ($0, T_1$) – A tensão de entrada está em seu valor nominal ou dentro da faixa adequada (202 até 231 V). O conversor estará operando com razão cíclica nominal, representada na Figura 32 pelo valor de 50%;

2ª Etapa (T_1, T_2) – A tensão de entrada está abaixo do seu valor nominal, ou seja, na faixa precária (191 até 202 V). A razão cíclica do conversor será maior que 50%, por exemplo 70% como mostrado na Figura 32;

3ª Etapa (T_2, T_3) – A tensão de entrada está acima do seu valor nominal, ou seja, na faixa precária (231 até 233 V). A razão cíclica será inferior a 50%. Na Figura 32 as formas de onda mostradas são para razão cíclica de 20%.

As etapas de funcionamento descritas anteriormente podem durar o tempo que for necessário, em virtude do comportamento da tensão de entrada. Aqui, para fins de estudo, considerou-se um período da rede para cada etapa de funcionamento, para fins de simplificação.

A frequência de operação do conversor será definida como F_s , sendo superior a frequência da rede de energia elétrica (F_r), para que a forma de onda da tensão de saída apresente a qualidade desejada, inclusive de acordo com normas que estabelecem os níveis máximos de conteúdo harmônico. Assim, o período de chaveamento será:

$$T_s = \frac{1}{F_s}$$

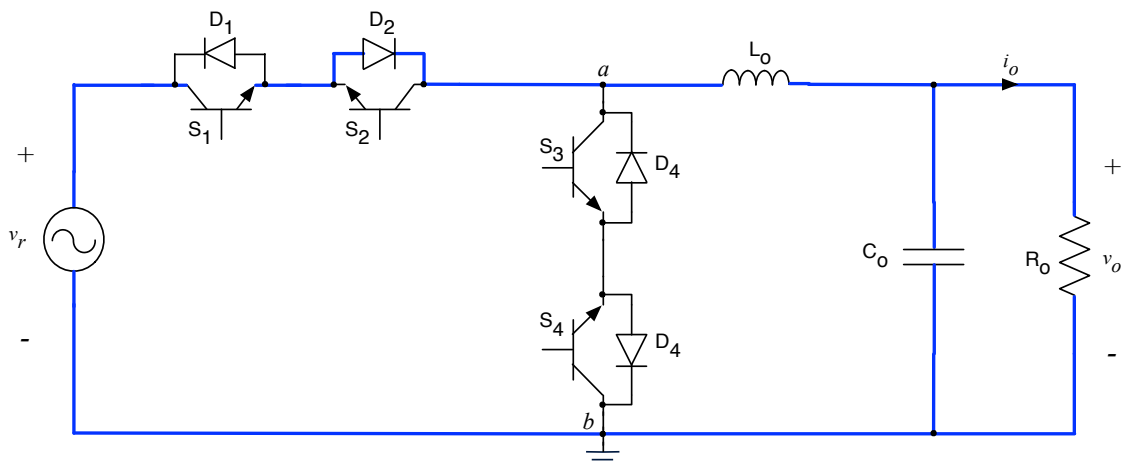


Figura 27 – Primeira etapa de operação do estabilizador transistorizado com corrente positiva no indutor.

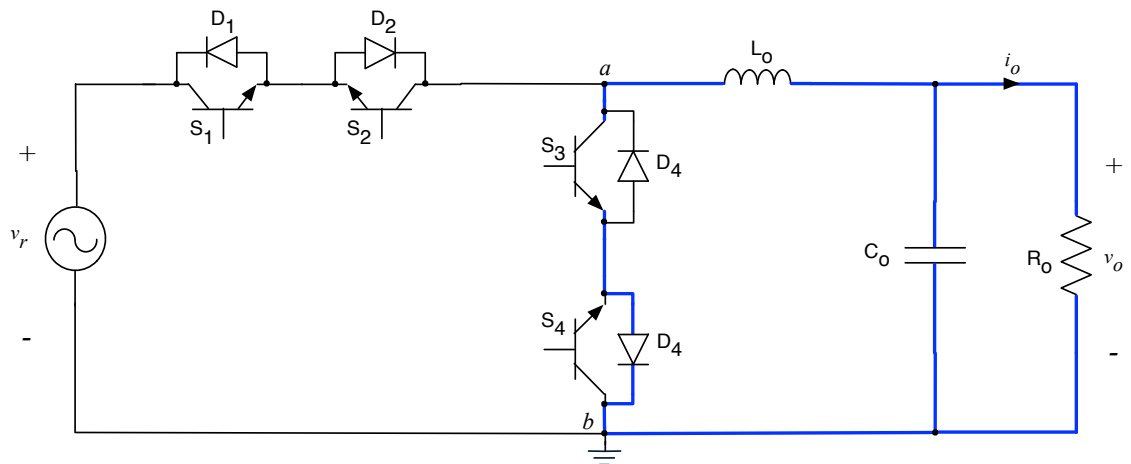


Figura 28 – Segunda etapa de operação do estabilizador transistorizado com corrente positiva no indutor.

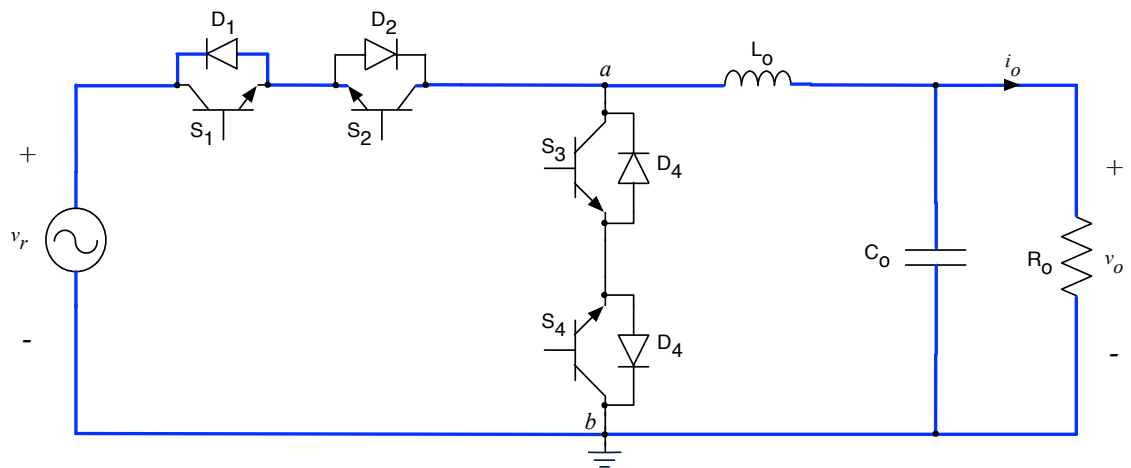


Figura 29 – Primeira etapa de operação do estabilizador transistorizado com corrente negativa no indutor.

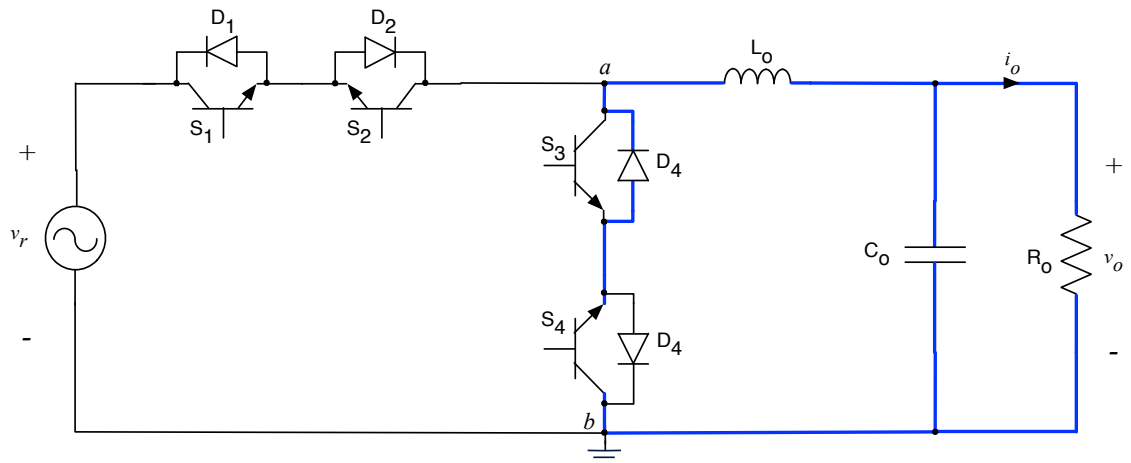


Figura 30 – Segunda etapa de operação do estabilizador transistorizado com corrente negativa no indutor.

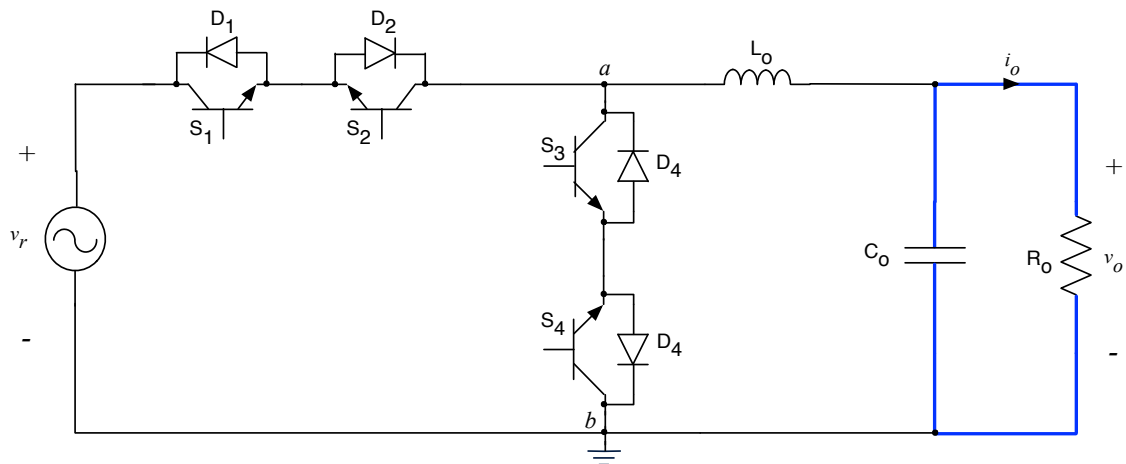


Figura 31 – Terceira etapa de operação do estabilizador transistorizado para condução descontínua.

A tensão de entrada (v_i) foi representada na Figura 32 pelo seu valor de pico (V_{pk}), sendo dada por:

$$v_i = v_r = V_{i(pk)} \cdot \text{seno}(\omega \cdot t) \rightarrow \omega = 2 \cdot \pi \cdot F_r;$$

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

A tensão após os interruptores superiores (v_{ab}) e antes da filtragem, será:

$$v_{ab}(t) = v_i(t) \cdot d(t)$$

A razão cíclica é fixa. Considerando componentes ideais:

$$v_{ab}(t) = v_i(t) \cdot D$$

A tensão média no indutor deverá ser nula, pois o mesmo não poderá armazenar energia indefinidamente. Assim, considerando os períodos de comutação dos interruptores (alta frequência):

$$V_{L_o} = 0$$

Assim:

$$v_o(t) = v_{ab}(t) = v_i(t) \cdot D = V_{i(pk)} \cdot \text{seno}(\omega \cdot t) \cdot D$$

Deste modo, considerando componentes ideais, a amplitude máxima na saída será:

$$V_{o(pk)} = D \cdot V_{i(pk)}$$

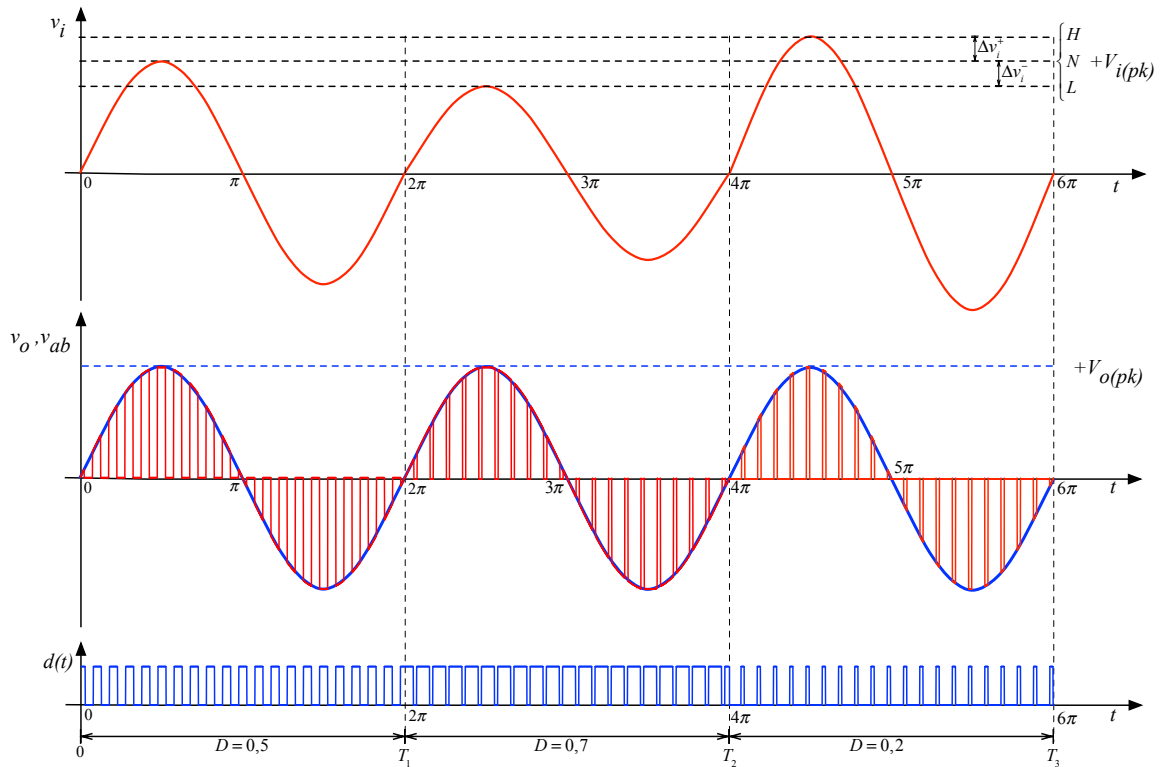


Figura 32 – Formas de onda do estabilizador com transistores.

Em valores eficazes se tem:

$$V_{o(ef)} = D \cdot V_{i(ef)}$$

Note que a tensão de pico antes da filtragem é igual a tensão de pico na entrada:

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

As tensões máximas sobre os interruptores são:

$$V_{S1 \rightarrow S4} = V_{D1 \rightarrow D4} = V_{i(pk)}$$

As correntes na carga dependerão do tipo de carga que estará conectada na saída. Em sendo carga resistiva se terá:

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

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

A potência aparente e a potência ativa na saída podem ser calculadas por:

$$S_o = V_{o(ef)} \cdot I_{o(ef)} [VA]$$

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

Para cargas resistivas, a potência aparente é igual a potência ativa e o fator de potência será unitário.

As correntes nos interruptores, simplificadaamente podem ser consideradas a partir da corrente da carga, fazendo-se os devidos ajustes em virtude da razão cíclica de operação do estabilizador. Se a razão cíclica variar muito, então por segurança considera-se as correntes nos interruptores com amplitudes semelhantes a corrente no indutor e carga.

6 Simulação dos Circuitos Estudados

A simulação dos conversores estudados neste capítulo é realizada para fins de entendimento do princípio de funcionamento dos estabilizadores de tensão alternada, seja com relés, tiristores ou transistores, conforme foi estudado nos itens anteriores.

6.1 Simulação do Estabilizador de Tensão com Relés

O circuito simulado no Psim está mostrado na Figura 33, com características distintas daquelas utilizadas durante a aula, em virtude dos modelos disponíveis no simulador. Foram utilizadas relações de transformação iguais para os quatro secundários, todas com relação de 3:1. O circuito é composto por uma fonte de tensão na entrada, o transformador com cinco enrolamentos, sendo um primário e quatro secundários, carga resistiva e três relés. Todos os componentes do circuito são ideais. A fonte de entrada possui 220 V eficazes. A carga possui uma resistência de 22 Ω . O tempo de simulação foi de 200 ms e passo de cálculo de 0,1 ms (100 μ s). Os relés foram acionados sequencialmente, nos tempos de 50 ms, 100 ms e 150 ms.

A Figura 35 mostra as mesmas formas de onda para o conversor operando com três situações distintas, onde se tem as tensões de entrada (v_i) e saída (v_o), e os sinais de comando dos relés.

Na primeira situação de funcionamento, entre 0 e 50 ms, os relés ficam sem situação de repouso e pela configuração do circuito, a tensão de saída será com a máxima amplitude, como pode ser visto na figura; a carga está conectada na tensão equivalente a soma dos quatro secundários (4 x 73,3 V = 293,2 V).

A seguir, entre 50 ms e 100 ms, se aciona o primeiro relé, que neste caso conecta a carga em uma tensão que é a soma de três secundários, equivalendo a 3 x 73,3 V = 219,9 V, ou seja, a saída é igual a entrada.

Em continuidade, entre 100 ms e 150 ms, se aciona o segundo relé, ficando a saída ligada em dois secundários, com tensão de $2 \times 73,3 \text{ V} = 146,6 \text{ V}$.

Por fim, entre 150 ms e 200 ms é acionado o terceiro relé, conectando a saída em apenas um secundário, ficando com tensão de 73,3 V.

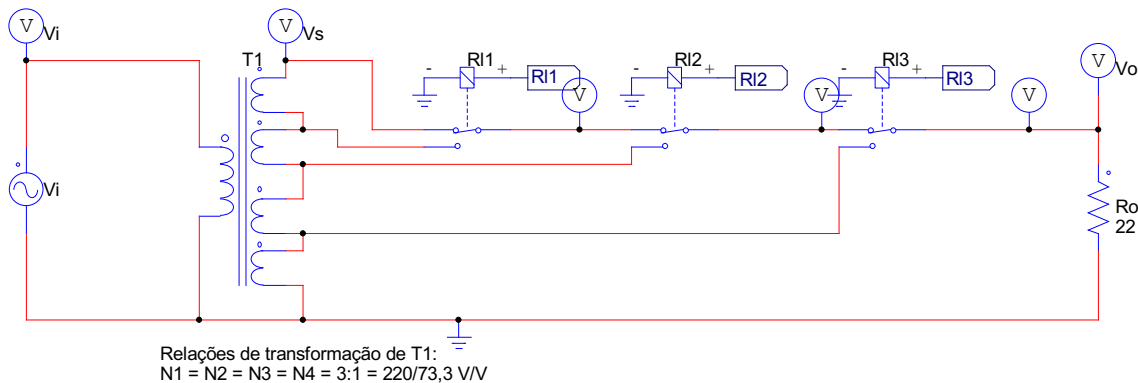


Figura 33 – Circuito do estabilizador com relés simulado no Psim.

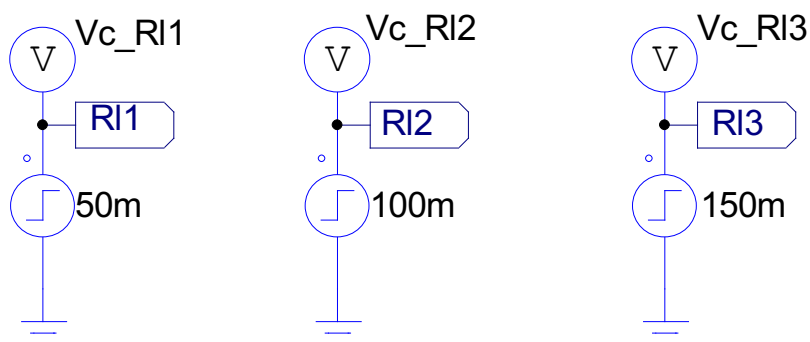


Figura 34 – Detalhes do sinal de comando dos relés.

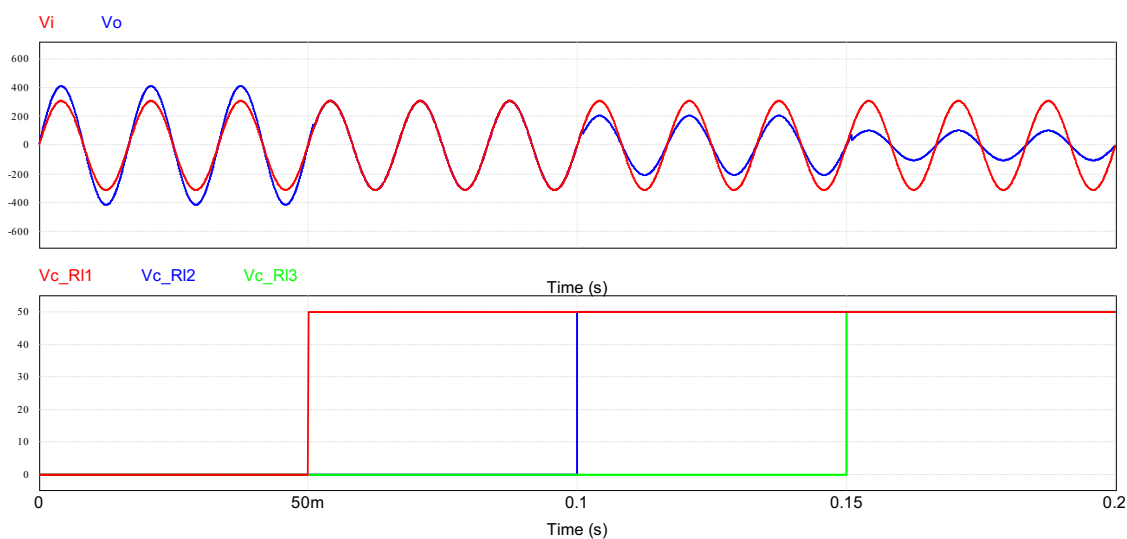


Figura 35 – Principais formas de onda para acionamento sequencial dos relés.

6.1 Simulação do Estabilizador de Tensão com Tiristores

O circuito simulado no Psim está mostrado na Figura 33, com características distintas daquelas utilizadas durante a aula, em virtude dos modelos disponíveis no simulador. Foram utilizadas relações de transformação iguais para os quatro secundários, todas com relação de 3:1. O circuito é composto por uma fonte de tensão na entrada, o transformador com cinco enrolamentos, sendo um primário e quatro secundários, carga resistiva e quatro tiristores (TRIACs). Todos os componentes do circuito são ideais. A fonte de entrada possui 220 V eficazes. A carga possui uma resistência de 22Ω . O tempo de simulação foi de 100 ms e passo de cálculo de 0,01 ms (10 μ s). Os tiristores foram acionados sequencialmente, nos tempos de 20 ms, 40 ms, 60 ms e 80 ms, sempre na passagem por zero (*zero crossing*) da tensão de entrada.

A Figura 35 mostra as mesmas formas de onda para o conversor operando com cinco situações distintas, onde se tem as tensões de entrada (v_i) e saída (v_o), e os sinais de comando dos tiristores.

Na primeira situação de funcionamento, entre 0 e 20 ms, nenhum tiristor foi acionado, ficando a saída desconectada da rede, tendo assim amplitude nula. Em seguida, entre 20 ms e 40 ms, se aciona o primeiro tiristor (T_1), a tensão de saída terá a máxima amplitude, como pode ser visto na figura; a carga está conectada na tensão equivalente a soma dos quatro secundários ($4 \times 73,3 \text{ V} = 293,2 \text{ V}$).

A seguir, entre 40 ms e 60 ms, se aciona o segundo tiristor (T_2), que neste caso conecta a carga em uma tensão que é a soma de três secundários, equivalendo a $3 \times 73,3 \text{ V} = 219,9 \text{ V}$, ou seja, a saída é igual a entrada. Em continuidade, entre 60 ms e 80 ms, se aciona o terceiro tiristor (T_3), ficando a saída ligada em dois secundários, com tensão de $2 \times 73,3 \text{ V} = 146,6 \text{ V}$.

Por fim, entre 80 ms e 100 ms é acionado o quarto tiristor (T_4), conectando a saída em apenas um secundário, ficando com tensão de 73,3 V.

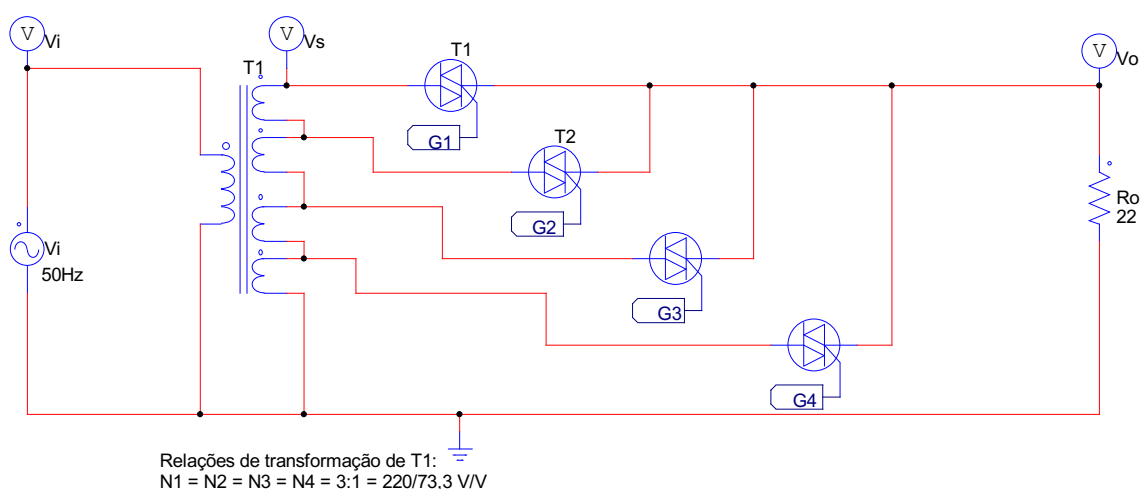


Figura 36 – Circuito do estabilizador com tiristores simulado no Psim.

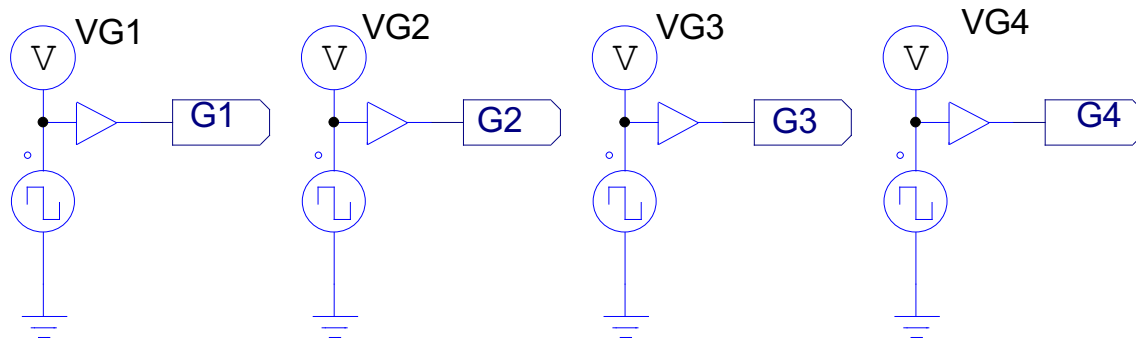


Figura 37 – Detalhes do sinal de comando dos tiristores.

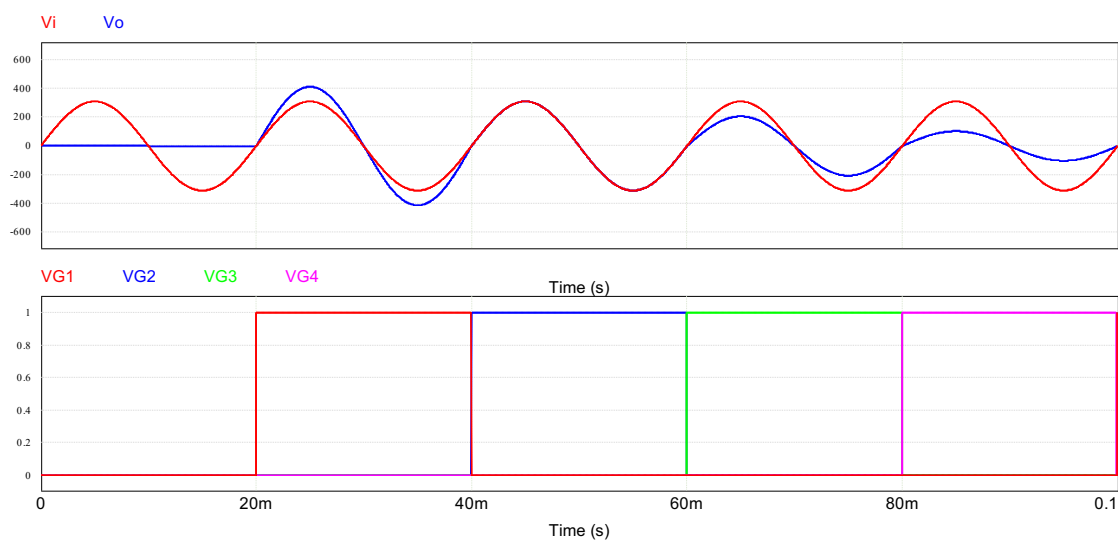


Figura 38 – Principais formas de onda para acionamento sequencial dos tiristores.

6.1 Simulação do Estabilizador de Tensão com Transistores

O circuito simulado no Psim está mostrado na Figura 39, semelhante ao que foi estudado neste capítulo anteriormente. O circuito é composto por uma fonte de tensão na entrada, carga resistiva, filtro de saída e quatro interruptores bidirecionais (diodos e transistores). Todos os componentes do circuito são ideais. A fonte de entrada possui 220 V eficazes. A carga possui uma resistência de 22 Ω . O filtro do estabilizador é formado pela indutância de 10 mH e pela capacitância de 330 μF . O tempo de simulação foi de 50 ms e passo de cálculo de 0,0001 ms (0,1 μs). Note que a frequência de comutação é de 1 kHz. Os elementos ON1 e ON2 são utilizados pelo Psim para comandar interruptores, equivalente a *drivers* de acionamento do interruptor. Não se utilizou tempo morto para acionamento dos interruptores, visto o Psim considerar os componentes como ideais.

A Figura 41 mostra as mesmas formas de onda para o conversor operando com razão cíclica de 10%, onde se tem as tensões de entrada (v_i) e saída (v_o), tensão antes da filtragem (v_{ab}) e corrente no indutor (i_{Lo}).

Por sua vez, as Figura 42 e Figura 43 mostram as formas de onda para operação com razão

cíclica de 50% e 90%, respectivamente. Pode-se notar que a tensão após os interruptores (v_{ab}) é semelhante a do conversor cc-cc Buck, mas agora com envoltória senoidal, que em seguida é filtrada por L_o e C_o , resultando em uma tensão senoidal pura na saída do estabilizador.

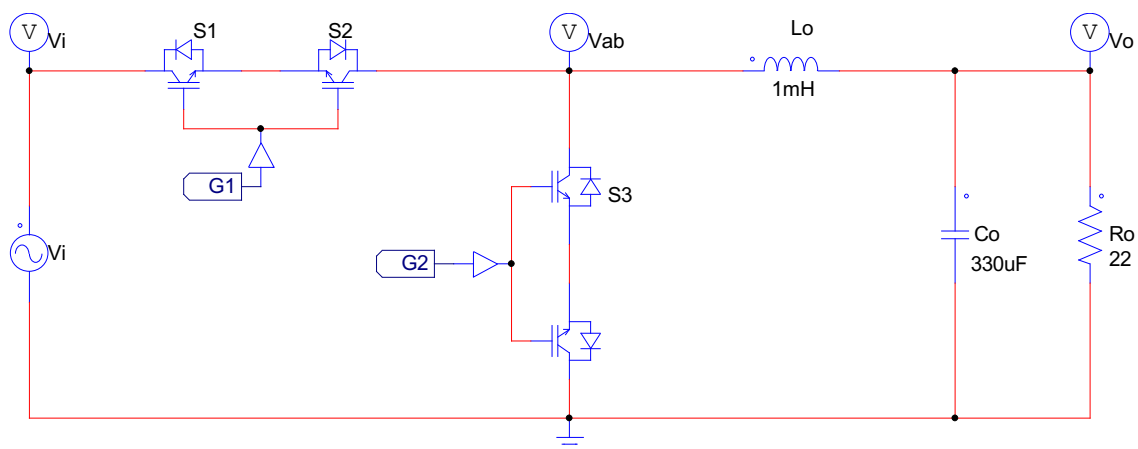


Figura 39 – Circuito do estabilizador com transistores simulado no Psim.

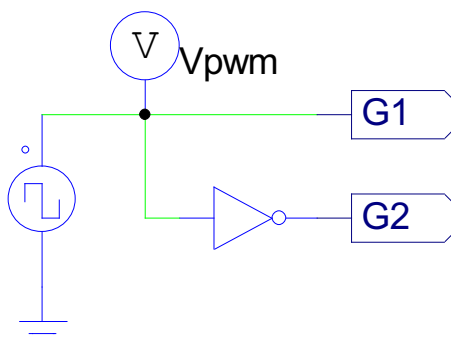


Figura 40 – Detalhes do circuito de comando do estabilizador.

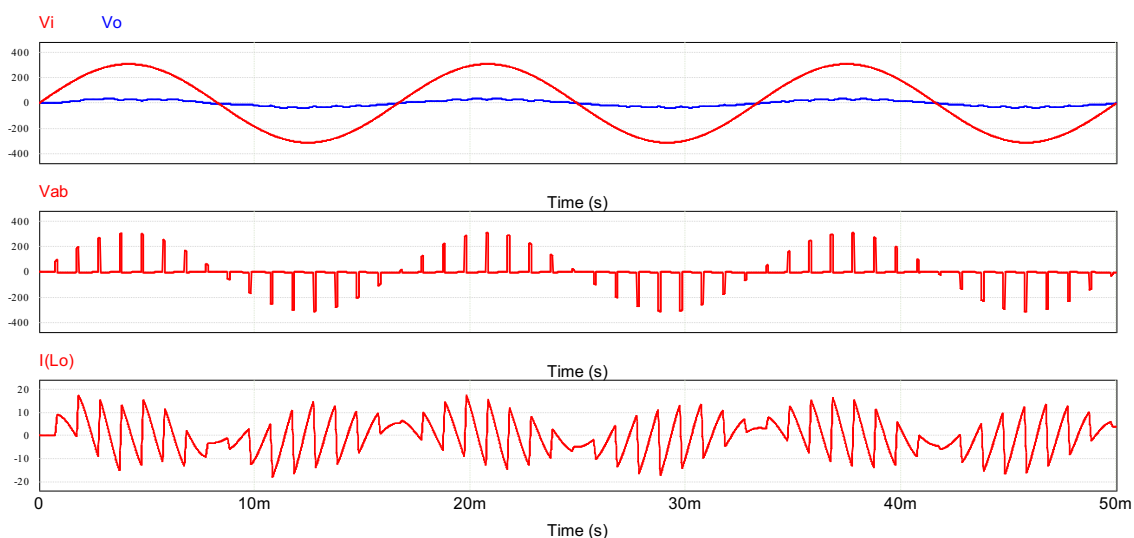


Figura 41 – Principais formas de onda para razão cíclica de 10%.

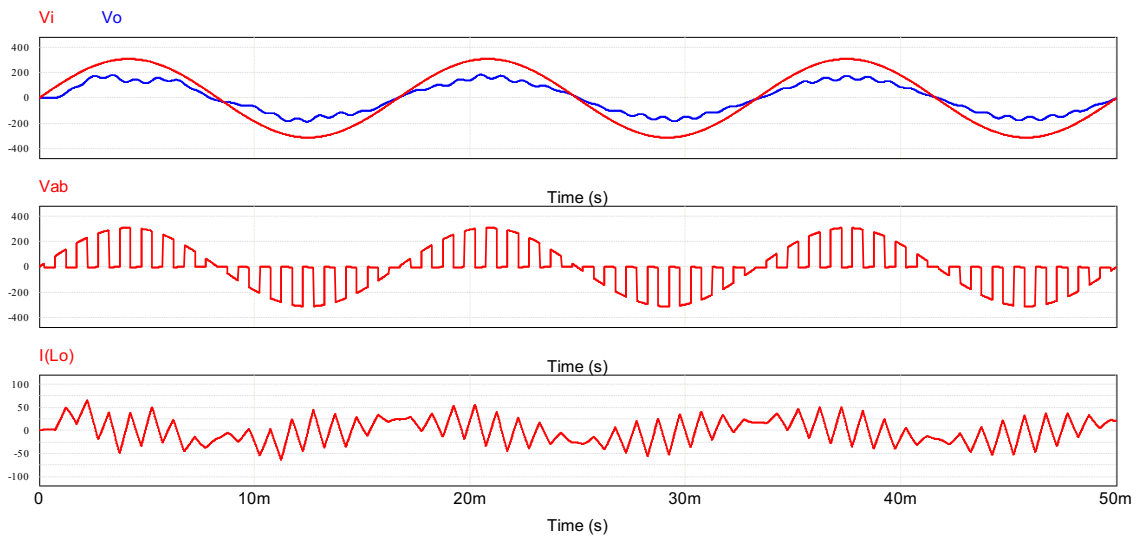


Figura 42 – Principais formas de onda para razão cíclica de 50%.

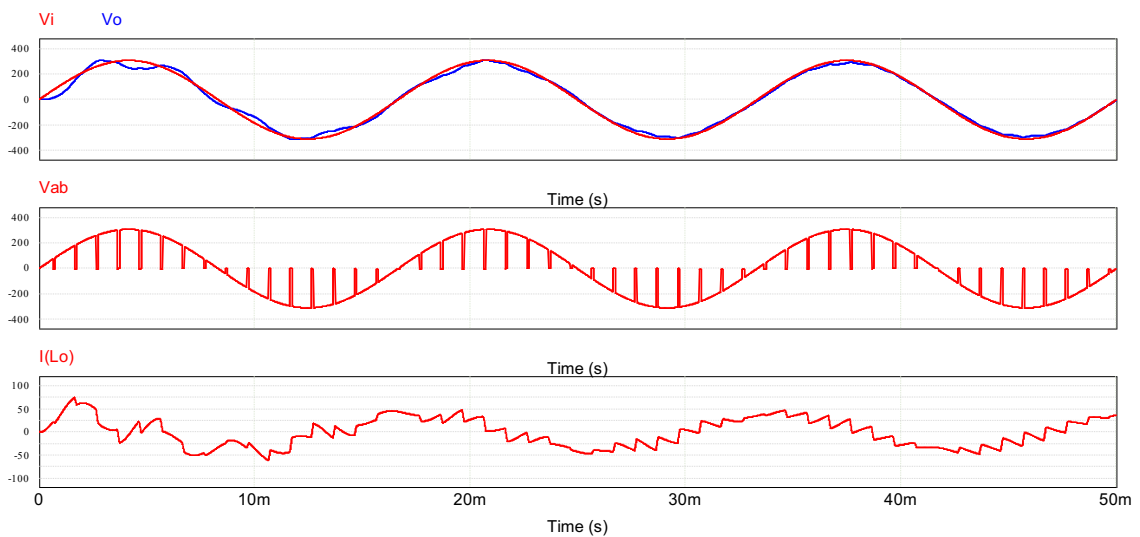


Figura 43 – Principais formas de onda para razão cíclica de 90%.

7 Exercícios

Exercícios Resolvidos

ER 01) Considerando o circuito da Figura 16, com tensão de entrada de 220 V (eficaz), carga com resistência de 10Ω , sendo R_{L1} acionado e R_{L2} em repouso, determine:

- A tensão eficaz de saída;
- A tensão de pico na saída;
- A corrente de pico na saída;
- A corrente eficaz na saída;
- A potência na carga;

- A tensão de saída está de acordo com a faixa adequada da ANEEL?

Como o primeiro relé foi acionado e o segundo está em repouso, então a tensão de saída será dada por:

$$v_o = v_i + v_3 \rightarrow v_o = v_i + \frac{v_i}{n_1} \rightarrow v_o = 220 + \frac{220}{9,17} \cong 244V$$

A tensão de pico na saída será:

$$V_{o(pk)} = \sqrt{2} \cdot V_{o(ef)} = \sqrt{2} \cdot 244 = 345V$$

As correntes de pico e eficaz na carga serão:

$$I_{o(pk)} = \frac{V_{o(pk)}}{R_o} = \frac{345}{10} = 34,5A$$

$$I_{o(ef)} = \frac{V_{o(ef)}}{R_o} = \frac{244}{10} = 24,4A$$

A potência na carga será:

$$P_o = \frac{(V_{o(ef)})^2}{R_o} = \frac{(244)^2}{10} = 5,95kW$$

O valor de 244 V na saída está fora da faixa adequada, que vai até 231 V.

ER 02) Considerando o circuito da Figura 21, com tensão de entrada de 220 V (eficaz), carga com resistência de 10 Ω , sendo acionados os tiristores T₅/T₆ apenas, determine:

- A tensão eficaz de saída;
- A tensão de pico na saída;
- A corrente de pico na saída;
- A corrente eficaz na saída;
- A potência na carga;
- A tensão de saída está de acordo com a faixa adequada da ANEEL?

Como foram acionados os tiristores T₅ e T₆, então a tensão de saída será dada por:

$$v_o = v_i - v_2 \rightarrow v_o = v_i - \frac{v_i}{n_2} = 220 - \frac{220}{16,95} = 207V$$

A tensão de pico na saída será:

$$V_{o(pk)} = \sqrt{2} \cdot V_{o(ef)} = \sqrt{2} \cdot 207 \cong 293V$$

As correntes de pico e eficaz na carga serão:

$$I_{o(pk)} = \frac{V_{o(pk)}}{R_o} = \frac{293}{10} = 29,3A$$

$$I_{o(ef)} = \frac{V_{o(ef)}}{R_o} = \frac{207}{10} = 20,7A$$

A potência na carga será:

$$P_o = \frac{(V_{o(ef)})^2}{R_o} = \frac{(207)^2}{10} = 4,28kW$$

O valor de 207 V está dentro da faixa adequada, que vai de 202 V até 231 V.

ER 03) Considerando o circuito da Figura 26, com tensão de entrada de 220 V (eficaz), carga com resistência de 10 Ω , operando com razão cíclica de 50%, determine:

- A tensão eficaz de saída;
- A tensão de pico na saída;
- A corrente de pico na saída;
- A corrente eficaz na saída;
- A potência na carga.

Com razão cíclica de 50% a tensão de saída será:

$$V_{o(ef)} = D \cdot V_{i(ef)} = 0,5 \cdot 220 = 110V$$

A tensão de pico na saída será:

$$V_{o(pk)} = \sqrt{2} \cdot V_{o(ef)} = \sqrt{2} \cdot 110 = 155,6V$$

As correntes de pico e eficaz na carga serão:

$$I_{o(pk)} = \frac{V_{o(pk)}}{R_o} = \frac{155,6}{10} = 15,56A$$

$$I_{o(ef)} = \frac{V_{o(ef)}}{R_o} = \frac{110}{10} = 11A$$

A potência na carga será:

$$P_o = \frac{(V_{o(ef)})^2}{R_o} = \frac{(110)^2}{10} = 1,21kW$$

Exercícios Propostos

EP 01) Considerando o circuito da Figura 16, com tensão de entrada de 220 V (eficaz), carga com resistência de 10Ω , sendo R_{L2} acionado e R_{L1} em repouso, determine:

- A tensão eficaz de saída;
- A tensão de pico na saída;
- A corrente de pico na saída;
- A corrente eficaz na saída;
- A potência na carga;
- A tensão de saída está de acordo com a faixa adequada da ANEEL?

EP 02) Considerando o circuito da Figura 21, com tensão de entrada de 220 V (eficaz), carga com resistência de 10Ω , sendo acionados os tiristores T_3/T_4 apenas, determine:

- A tensão eficaz de saída;
- A tensão de pico na saída;
- A corrente de pico na saída;
- A corrente eficaz na saída;
- A potência na carga;
- A tensão de saída está de acordo com a faixa adequada da ANEEL?

EP 03) Considerando o circuito da Figura 26, com tensão de entrada de 220 V (eficaz), carga com resistência de 10Ω , operando com razão cíclica de 80%, determine:

- A tensão eficaz de saída;
- A tensão de pico na saída;
- A corrente de pico na saída;
- A corrente eficaz na saída;
- A potência na carga.

EP 04) Considerando o circuito da Figura 26, com tensão de entrada de 220 V (eficaz), carga com resistência de 10Ω , operando com razão cíclica de 100%, determine:

- A tensão eficaz de saída;
- A tensão de pico na saída;
- A corrente de pico na saída;
- A corrente eficaz na saída;
- A potência na carga.

EP 05) Considerando o circuito da Figura 21, com tensão de entrada de 110 V (eficaz), carga com resistência de 10Ω , sendo acionados os tiristores T_1/T_2 apenas, determine:

- A tensão eficaz de saída;
- A tensão de pico na saída;
- A corrente de pico na saída;
- A corrente eficaz na saída;
- A potência na carga.

EP 06) Considerando o circuito da Figura 16, com tensão de entrada de 190 V (eficaz), carga com resistência de 10Ω , sendo R_{L1} acionado e R_{L2} em repouso, determine:

- A tensão eficaz de saída;
- A tensão de pico na saída;
- A corrente de pico na saída;
- A corrente eficaz na saída;
- A potência na carga;
- A tensão de saída está de acordo com a faixa adequada da ANEEL?

EP 07) Comente sobre as diferenças de se utilizar relés, tiristores e transistores para implementar estabilizadores de tensão alternada.

EP 08) Por que atualmente não é necessário utilizar estabilizadores de tensão em fontes de notebooks?

EP 09) Cite cargas onde é necessário o emprego de estabilizadores de tensão alternada.

EP 10) Qual a maior dificuldade para se implementar estabilizadores de tensão com transistores e operando em alta frequência?

EP 11) Considerando o circuito da Figura 16, com tensão de entrada de 2300 V (eficaz), carga com resistência de 10Ω , sendo R_{L1} acionado e R_{L2} em repouso, determine:

- A tensão eficaz de saída;
- A tensão de pico na saída;
- A corrente de pico na saída;
- A corrente eficaz na saída;
- A potência na carga;
- A tensão de saída está de acordo com a faixa adequada da ANEEL?

EP 12) Cite cargas que dispensam o uso de estabilizadores, pelo fato de suas fontes de alimentação serem projetadas para operarem com tensão universal na entrada.

8 Laboratório

8.1 Introdução

Esta aula de laboratório tem por objetivo consolidar os conhecimentos obtidos nas aulas teóricas referentes ao estudo de conversores ca-ca monofásicos, especificamente sobre estabilizadores de tensão.

Em síntese, objetiva-se:

- Ensaiai estabilizadores de tensão não-isolados e isolados;
- Verificar os limites de operação do estabilizador;
- Comparar os valores medidos com a norma NBR – 14373/2006.

8.2 Estabilizador de Tensão Monofásico

A partir das informações contidas na placa de identificação ou no manual do usuário do estabilizador faça as anotações conforme solicitado na tabela 1.

Conecte o estabilizador na rede de energia elétrica e com base na forma de onda apresentada pelo osciloscópio, faça um esboço da mesma na Figura 44.

Tabela 1 – Dados de placa e do manual do estabilizador.

Característica	Anotação do dado
Fabricante	
Modelo	
Frequência de operação	
Tensão nominal de entrada	
Tensão nominal de saída	
Potência aparente	
Potência ativa	
Varição na tensão de entrada para operação em 115 V	
Varição na tensão de entrada para operação em 220 V	
Regulação da tensão de saída	

8.2.1 Operação com tensão nominal de 115 V

Ajuste o variador de tensão para 115 V e em seguida faça ajustes conforme as tabelas 2 e 3, anotando os valores medidos nas colunas correspondentes.

Tabela 2 – Limites de operação abaixo de 115 V.

Ajuste varivolt [V]	Tensão na entrada [V]	Tensão na saída [V]
115		
105		
95		
85		

Tabela 3 – Limites de operação acima de 115 V.

Ajuste varivolt [V]	Tensão na entrada [V]	Tensão na saída [V]
115		
125		
140		

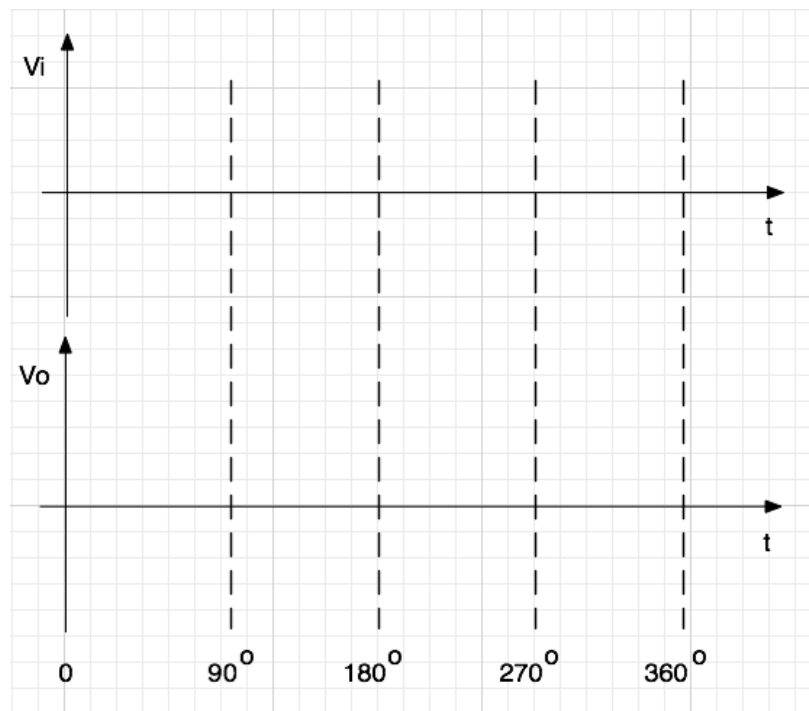


Figura 44 – Principais formas de onda do estabilizador ensaiado.

8.2.1 Operação com tensão nominal de 115 V

Ajuste o variador de tensão para 220 V e em seguida faça ajustes conforme as tabelas 4 e 5, anotando os valores medidos nas colunas correspondentes.

Tabela 4 – Limites de operação abaixo de 220 V.

Ajuste varivolt [V]	Tensão na entrada [V]	Tensão na saída [V]
220		
210		
200		
190		
175		

Tabela 5 – Limites de operação acima de 220 V.

Ajuste varivolt [V]	Tensão na entrada [V]	Tensão na saída [V]
220		
230		
240		
244		

8.3 Questões

- 1) A regulação em 115 V e em 220 V se mantém linear ou apresenta diferenças de comportamento?
- 2) Construa um gráfico com os valores medidos conforme a figura a seguir.
- 3) Compare os valores medidos com os valores regulamentados pela norma NBR – 14373/2006.

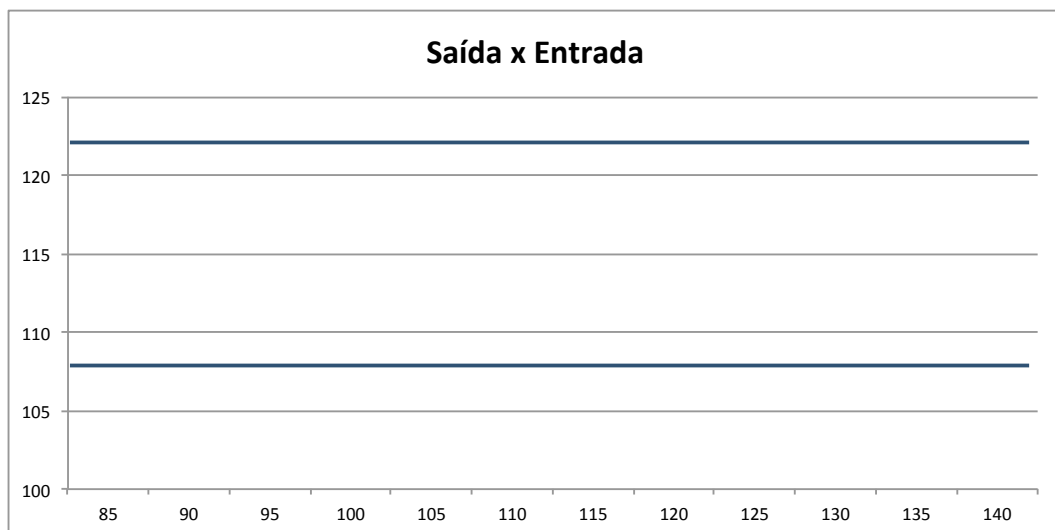


Figura 45 - Operação em 115 V.

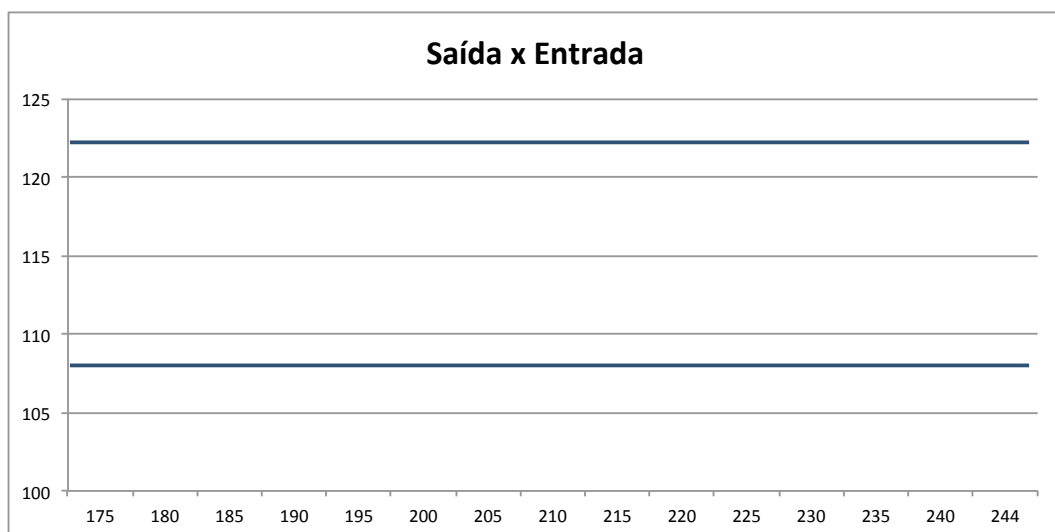


Figura 46 - Operação em 220 V.

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] ERICKSON, Robert W. Fundamentals of Power Electronics. New York, EUA – Chapman & Hall, 1997.
- [4] MOHAN, N. Power Electronic Converters, Application and Design. New York: IE-Wilwy, 2003.
- [5] PETRY, Clóvis A. Estabilizador de Tensão Alternada para Cargas Não-Lineares. Florianópolis, SC – Brasil, 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [6] PETRY, Clóvis A. Estabilizadores de tensão alternada para alimentação de cargas não-lineares estudo de variações topológicas e métodos de controle. Florianópolis, SC – Brasil, 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [7] Prodist, módulo 8. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. 2010.