

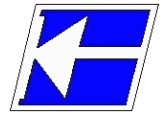


INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA

CURSO TÉCNICO INTEGRADO DE ELETRÔNICA

Eletrônica de Potência



---

# GUIA DE ESTUDO

---

## - OBJETIVO DE APRENDIZAGEM - CONVERSORES CA-CA

Prof. Clóvis Antônio Petry.

Florianópolis, setembro de 2020.

---

## **CONVERSORES CA-CA**

### **Objetivo de Aprendizagem**

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

### **Objetivos parciais**

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

### **Capítulos e aulas relacionadas**

Este objetivo de aprendizagem está relacionado aos capítulos 24 até 25 da apostila e com as aulas 24 até 25 da disciplina.

### **Pré-requisitos**

Ter estudado e obtido êxito no Objetivo de Aprendizagem 05 – Conversores cc-ca.

### **Continuidade dos Estudos**

O próximo objetivo de aprendizagem será estudar conteúdos transversais, como elementos magnéticos, operação de conversores em malha fechada, dentre outros.

### **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](http://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 24 até 25);
- ( ) Ler os capítulos deste conteúdo na apostila (capítulos 24 até 25).

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-CA

## 1 Introdução

O conteúdo a ser estudado neste tópico da disciplina está relacionado aos conversores ca-ca, que podem ser abaixadores ou elevadores de tensão, isolados ou não-isolados, ter comutação em baixa frequência ou alta frequência, dentre outras características técnicas e funcionais. Este conteúdo também está diretamente relacionado ao estudo dos conversores cc-cc, se empregando os mesmos princípios de funcionamento, quando operando em alta frequência, por exemplo.

### 1.1 Conteúdo – O que irei estudar

Estudaremos neste tópico:

- Princípio de funcionamento dos conversores ca-ca;
- Conversores com relés, tiristores e transistores;
- Estabilizadores de tensão.

### 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 conversores ca-ca;
- Entender as questões relacionadas com a comutação de conversores ca-ca;
- Conhecer as estruturas de conversores ca-ca e estabilizadores de tensão;
- Dimensionar conversores ca-ca.

A atividade avaliativa deste objetivo de aprendizagem consistirá em apresentar ao estudante um circuito de um conversor ca-ca 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 conversor ca-ca apresentado;
2. Desenhar as formas de onda da tensão de saída de um conversor ca-ca qualquer;
3. Explicar as etapas de funcionamento de um conversor ca-ca;
4. Dimensionar os componentes do conversor ca-ca;
5. Explicar o funcionamento de um estabilizador de tensão.

## 2 Comutação dos Conversores CA-CA

### 2.1 Introdução

Os conversores ca-ca que serão estudados neste curso utilizam interruptores lentos ou rápidos. Assim, no caso de interruptores rápidos, podem utilizar modulação PWM, por exemplo. De todo modo, antes de se apresentarem as principais estruturas de conversores ca-ca, será necessário discutir brevemente a comutação dos conversores ca-ca, que tem características distintas daquela dos conversores cc-cc ou cc-ca.

### 2.1 Interruptores para Conversores CA-CA

A operação em corrente alternada implica no uso de interruptores bidirecionais em tensão e em corrente, pois a tensão assumirá valores positivos e negativos a cada período e a corrente, a depender da carga utilizada, poderá ou não estar defasada da tensão. Assim, de maneira geral se utilizam interruptores bidirecionais em tensão e corrente, que podem ser implementados com relés, tiristores ou transistores.

A Figura 1 mostra uma chave ideal, que poderia ser um interruptor eletromecânico ou um contato de um relé (dispositivo eletromagnético), que é naturalmente bidirecional em tensão e em corrente. Esta chave ideal pode ser implementada por dois tiristores do tipo SCR, conectados em anti-paralelo, ou então por um tiristor do tipo TRIAC. Finalmente, a chave ideal pode ser implementada por dois transistores com diodos em anti-paralelo, necessitando-se então quatro componentes de silício, por exemplo.

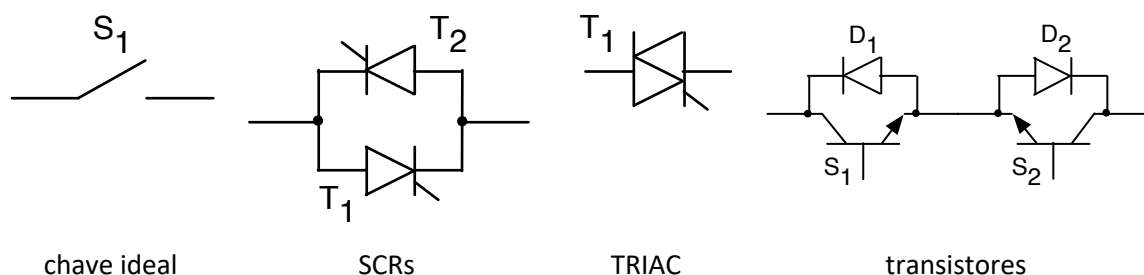


Figura 1 – Interruptores para conversores ca-ca.

### 2.2 Comutação dos Conversores CA-CA

O circuito da Figura 2 mostra uma fonte de tensão alternada conectada a uma carga resistiva-indutiva por intermédio de dois interruptores bidirecionais em tensão e corrente,  $S_1$  e  $S_2$ .

Considere que o interruptor  $S_1$  esteja conduzindo, conforme mostrado na Figura 4.

Idealmente, se poderia abrir o interruptor  $S_1$  e fechar o interruptor  $S_2$ , com os sinais de comando mostrados na Figura 3. Assim, nos instantes  $T_1$  e  $T_2$  os interruptores são comutados, alterando o funcionamento do circuito da situação mostrada na Figura 4 para a condição de condução de  $S_2$ , conforme mostrado na Figura 5.

Em termos teóricos, realizar a comutação conforme mostrado na Figura 3 é possível, pois os interruptores poderiam comutar instantaneamente, isto é, com tempo zero. Já em termos práticos isso não é possível, pois os interruptores, independente da tecnologia que utilizem, necessitam de algum tempo para abrir ou fechar. Assim, serão necessários alguns nanosegundos ou microsegundos para realizar a comutação.

Neste contexto, se tem duas opções:

- Abrir o interruptor  $S_1$  antes de fechar o interruptor  $S_2$  – esta comutação é mostrada na Figura 6. Neste caso, ambos os interruptores permanecem abertos por algum tempo, chamado de tempo morto. Essa estratégia implica na interrupção da corrente da carga resistiva-indutiva, que irá gerar uma sobretensão sobre os interruptores;
- Fechar  $S_2$  antes de abrir  $S_1$  – esta comutação é utilizada a sobreposição dos sinais de comando, conforme mostrado na Figura 7. O problema que ocorre neste caso é o curto-circuito na fonte de alimentação, visto que os dois interruptores estão conduzindo simultaneamente por alguns instantes.

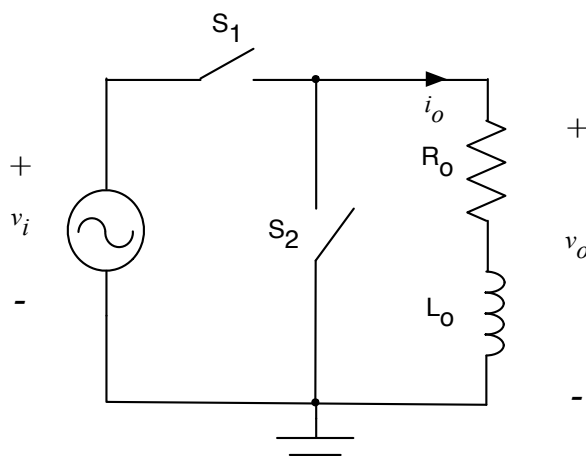


Figura 2 – Circuito exemplo para estudo da comutação de um conversor ca-ca.

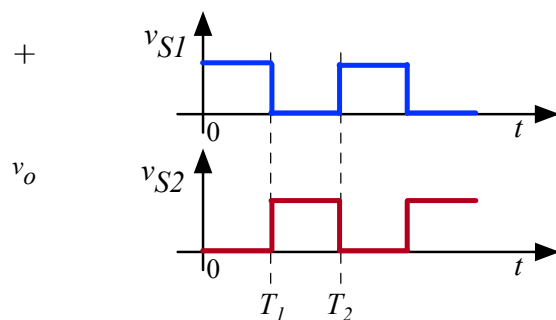


Figura 3 – Sinais de comando dos interruptores.

O problema da comutação aqui tem algumas características similares a comutação dos inversores de tensão, no entanto, naqueles conversores o uso de diodos de roda-livre resolviam o problema durante o tempo morto. A depender da tecnologia de semicondutores utilizada se terá

possibilidades de solução diferentes para o problema da comutação dos conversores ca-ca. De todo modo, soluções passivas utilizando resistores, por exemplo, podem ser empregadas. A Figura 8 mostra as soluções passivas utilizadas em alguns conversores, onde se utilizam resistores em série com a fonte de alimentação para limitar a corrente de curto-circuito, quando se opera com sobreposição dos sinais de comando dos interruptores. Por outro lado, quando se opera com tempo morto, é necessário um circuito resistivo-capacitivo em paralelo com a carga, para absorver a energia armazenada na parte indutiva da carga durante os intervalos que as chaves não estão conduzindo.

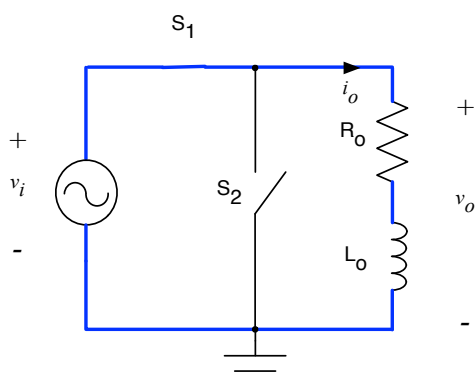


Figura 4 – Circuito exemplo com o interruptor  $S_1$  conduzindo.

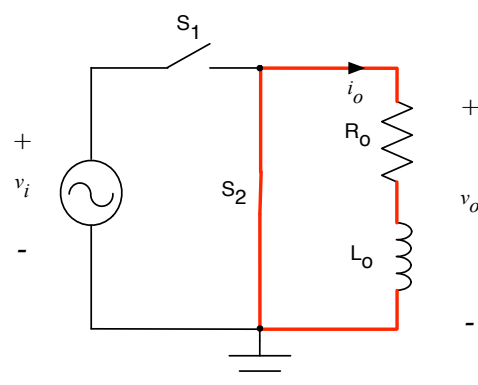


Figura 5 – Circuito exemplo com o interruptor  $S_2$  conduzindo.

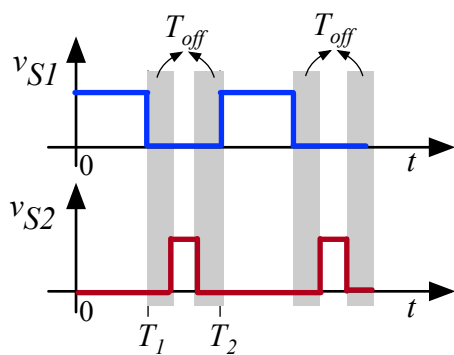


Figura 6 – Sinais de comando dos interruptores com tempo morto.

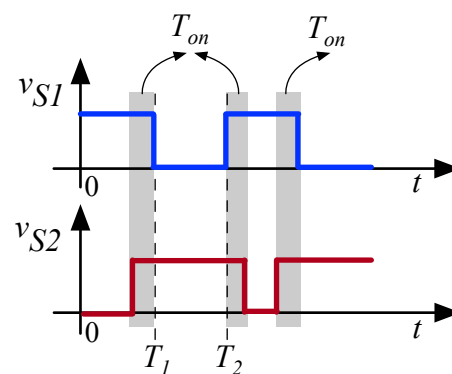


Figura 7 – Sinais de comando dos interruptores com sobreposição de tempos.

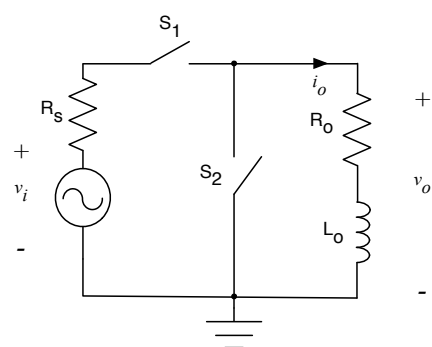
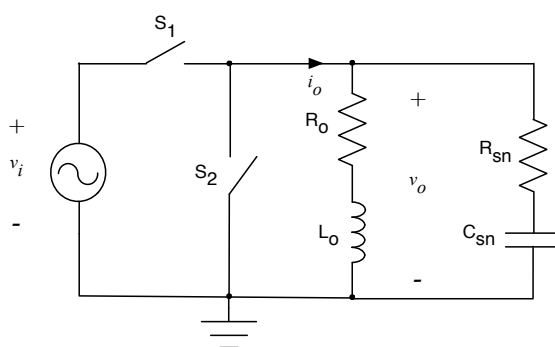


Figura 8 – Circuitos com limitação da corrente de curto-circuito e sobretensão nos interruptores.



## 2.1 Comutação dos Conversores com Relés

A Figura 9 mostra o circuito um circuito exemplo para descrever a comutação de um conversor ca-ca com relés. Neste circuito se tem duas fontes de alimentação ( $v_1$  e  $v_2$ ), que podem ser secundários de um transformador, por exemplo, e uma carga indutiva. A comutação irá ocorrer do contato a do relé para o contato b.

Ao iniciar a comutação dos contatos do relé, o afastamento da lâmina que permitia a corrente fluir de a para c, interromperá o caminho da corrente da carga, que tem característica resistiva-indutiva, gerando assim uma sobretensão ( $v_{ac}$ ) sobre o contato ac. Esta sobretensão irá provocar um arco elétrico, no sentido de manter a corrente circulando. Este arco, além de mostrar que a corrente continua circulando, ou seja, não ocorreu a comutação, também irá danificar os contatos do relé.

O uso de capacitores, por exemplo, em paralelo com os contatos do relé, auxilia na comutação, como está mostrado na Figura 10, pois neste caso se tem um caminho alternativo para a corrente da carga, que poderá circular pelo capacitor C. Assim, a sobretensão será dada pela carga do capacitor e poderá ser especificada pelo projetista. Por fim, na Figura 10 se mostra a comutação completa, quando a corrente de carga está circulando pelo contato bc.

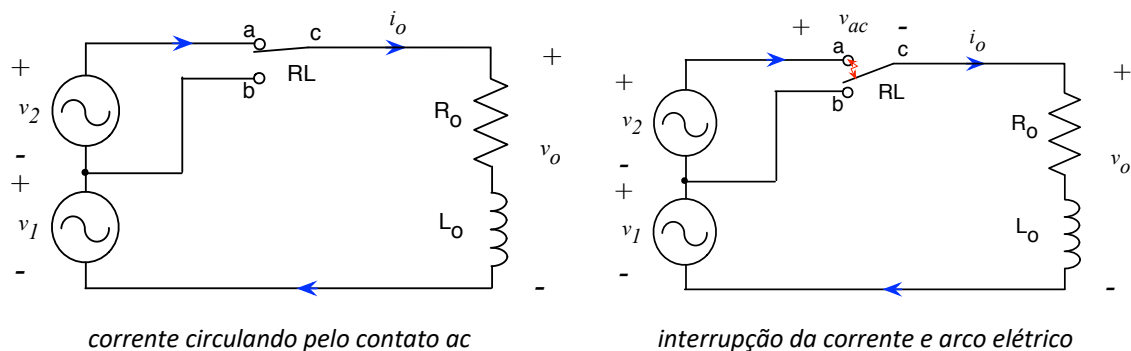


Figura 9 – Comutação de conversor ca-ca com relés.

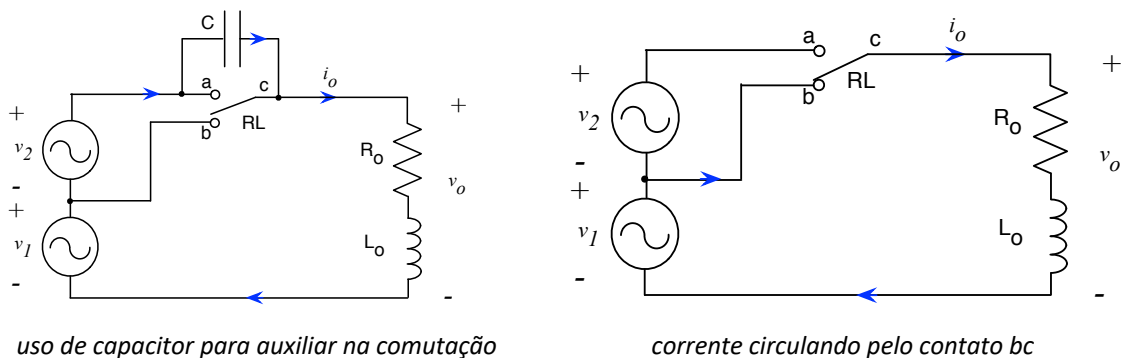


Figura 10 – Comutação de conversor ca-ca com relés.

## 2.1 Comutação dos Conversores com Tiristores

A Figura 11 mostra um circuito com tiristores para se descrever a comutação dos mesmos. Considere que o conjunto  $T_1$  e  $T_2$  estão conduzindo. A corrente da carga, que é resistiva-indutiva, está circulando pelo tiristor  $T_1$ . Assim, consideremos que se deseja fazer a comutação do conjunto  $T_1$  e  $T_2$  para  $T_3$  e  $T_4$ . Ao acionar os tiristores  $T_3$  e  $T_4$ , estes entram em condução em alguns microsegundos. Por outro lado, o conjunto  $T_1$  e  $T_2$  somente irá bloquear quando a corrente irá se tornar nula nestes semicondutores. Assim, conforme mostra a Figura 12, se tem um curto-circuito na fonte  $v_2$ , pois ambos os conjuntos de tiristores estarão conduzindo por um intervalo de tempo que pode decorrer em alguns milissegundos.

Uma alternativa, que em termos energéticos não é a mais interessante, mas do ponto de vista técnico é funcional, é utilizar resistores em série com os tiristores para limitar a corrente de curto-circuito, conforme mostrado na Figura 12. Assim, o problema da comutação não é resolvido, mas seu efeito é tolerado, escolhendo-se tiristores com alta capacidade de corrente de curto-circuito.

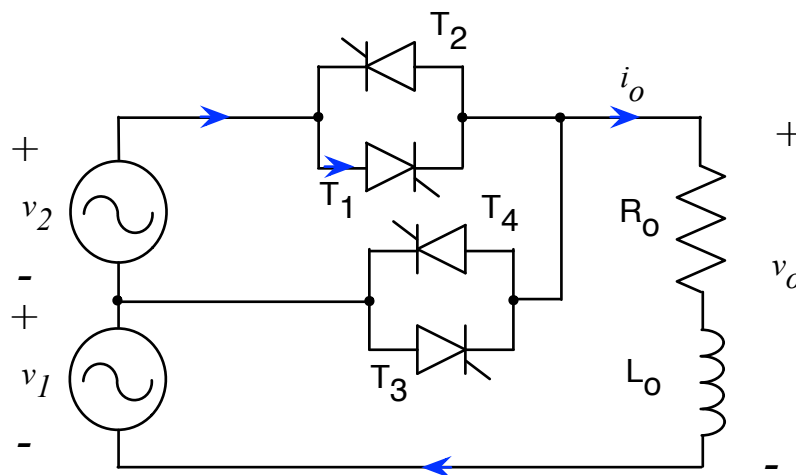
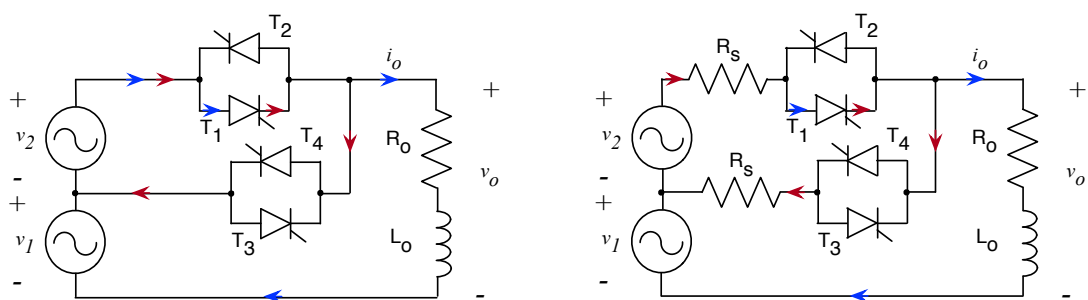


Figura 11 – Comutação de conversor ca-ca com tiristores.



curto-circuito na comutação dos tiristores

resistores série para limitar corrente de curto

Figura 12 – Comutação de conversor ca-ca com tiristores.

A utilização de circuitos de acionamento dos tiristores que monitorem a tensão ou corrente, para realizar o acionamento próximo ao zero destas grandezas, são comuns e estão disponíveis comercialmente, sendo amplamente empregados na indústria. Assim, o problema do curto-circuito é minimizado, podendo-se inclusive agregar o uso de resistores série com o acionamento próximo a passagem por zero, por exemplo.

É possível também implementar circuitos que realizem o bloqueio forçado dos tiristores, mas são circuitos mais complexos e por isso não serão abordados aqui.

## 2.1 Comutação dos Conversores com Transistores

A Figura 13 mostra um circuito com duas fontes de tensão e carga resistiva-indutiva, com um conjunto de transistores formando interruptores bidirecionais em tensão e corrente. Inicialmente se considera que o conjunto  $S_1/D_1$  e  $S_2/D_2$  está conduzindo e se deseja fazer a comutação para o conjunto  $S_3/D_3$  e  $S_4/D_4$ . Neste caso, conforme mostrado na Figura 14, se o conjunto  $S_3/D_3$  e  $S_4/D_4$  for acionado antes de se abrir o conjunto  $S_1/D_1$  e  $S_2/D_2$ , então se terá um curto-circuito na fonte de alimentação  $v_2$ . Por outro lado, se o conjunto  $S_1/D_1$  e  $S_2/D_2$  for comandado ao bloqueio, antes de se acionar  $S_3/D_3$  e  $S_4/D_4$ , então se terá a interrupção da corrente da carga, gerando sobretensões nos elementos do circuito.

Assim, uma solução muito utilizada na indústria em tempos passados era realizar a comutação com tempo morto e usar um conjunto resistivo-capacitivo (RC) sobre os interruptores para absorver a energia da carga durante o tempo morto, dissipando esta energia na forma de calor. No final dos anos 90 e início dos anos 2000 foram desenvolvidas técnicas de comutação segura para os conversores ca-ca, que utilizam o monitoramento da tensão da rede ou corrente da carga, permitindo então resolver o problema da comutação nos conversores com transistores e modulação PWM.

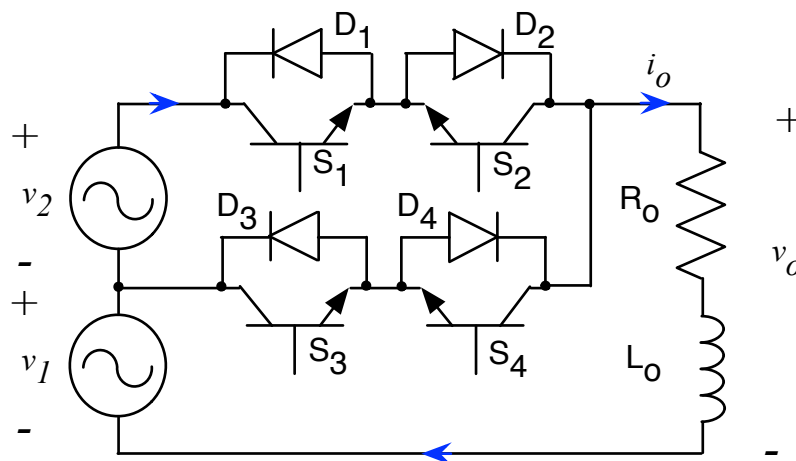


Figura 13 – Comutação de conversor ca-ca com transistores.

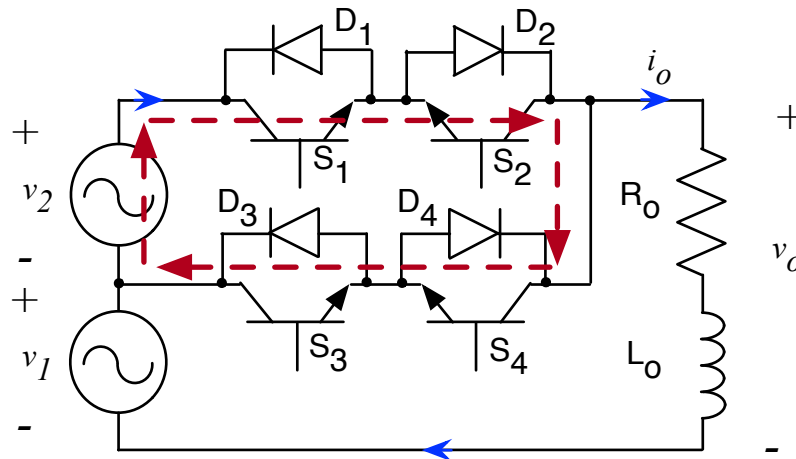


Figura 14 – Problema da comutação de conversor ca-ca com transistores.

## 2.1 Princípio de Funcionamento dos Conversores CA-CA

O conversor ca-ca mais simples é formado por um interruptor conectado em série com a carga, conforme mostrado na Figura 15. Este conversor não possui filtro, ou seja, a tensão de saída terá a forma da tensão de entrada e dependerá da estratégia de acionamento do interruptor  $S_1$ .

O conversor ca-ca da Figura 15 tem duas etapas de funcionamento, que são:

- Primeira etapa (0 até  $T_{on}$ ) - o interruptor  $S_1$  é comandado a conduzir, ou seja, está fechado. A tensão de saída ( $v_o$ ) é igual a da entrada ( $v_i$ ). A corrente na carga é sua tensão dividida pela resistência;
- Segunda etapa ( $T_{on}$  até  $T_s - T_{on}$ ) - o interruptor  $S_1$  está bloqueado, isto é, aberto. A tensão de saída ( $v_o$ ) e a corrente são iguais a zero.

As formas de onda da tensão de saída serão diferentes conforme as estratégias de acionamento que podem ser utilizadas para comandar o interruptor  $S_1$ . Aqui mostramos três técnicas diferentes, que são:

- Controle por ângulo de fase – o interruptor é acionado em um ângulo que pode variar entre 0 e  $180^\circ$  para o semiciclo positivo da tensão de entrada. A tensão de saída será zero antes do acionamento do interruptor e será igual a tensão de entrada após o acionamento do interruptor. No semiciclo negativo se repete aplica o mesmo do que no semiciclo positivo. As principais formas de onda para a técnica de controle da tensão de saída por ângulo de fase são mostradas na Figura 16;
- Controle por ciclos inteiros – o interruptor é acionado por um determinado número de ciclos e depois permanece aberto por outro número de ciclos. A

tensão de saída será igual a entrada quando o interruptor estiver acionado e será zero quando o interruptor estiver aberto. As principais formas de onda para a técnica de controle da tensão de saída por ciclos inteiros são mostradas na Figura 17;

- Controle por modulação PWM – o interruptor é comanda em alta frequência com modulação por largura de pulsos (PWM). A tensão de saída será igual a entrada quando o interruptor estiver acionado e será zero quando o interruptor estiver aberto. As principais formas de onda para a técnica de controle da tensão de saída por ciclos inteiros são mostradas na Figura 18.

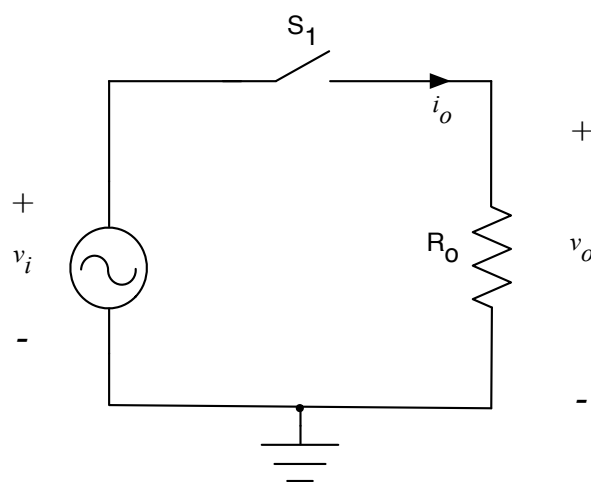


Figura 15 – Conversor ca-ca simples.

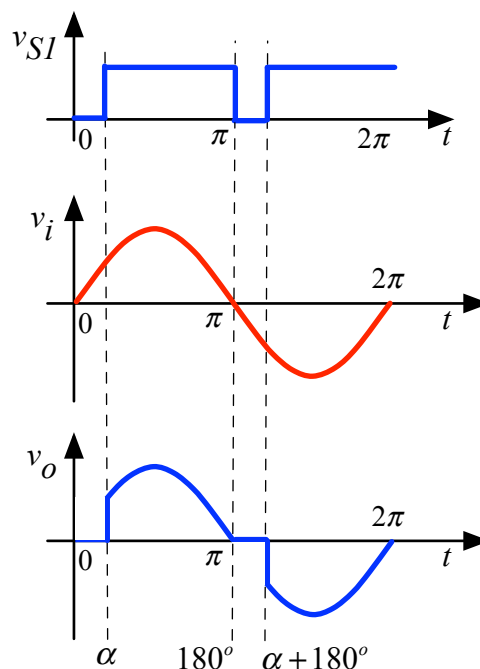


Figura 16 – Formas de onda do conversor ca-ca simples operando com controle por ângulo de fase.

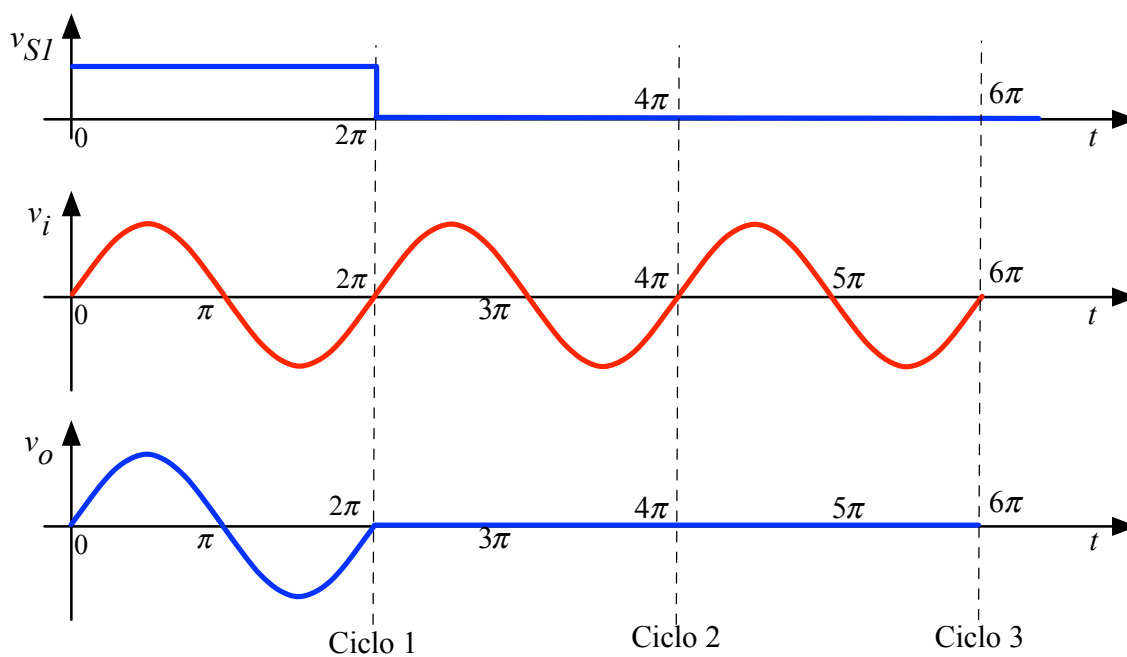


Figura 17 – Formas de onda do conversor ca-ca simples operando com controle por ciclos inteiros.

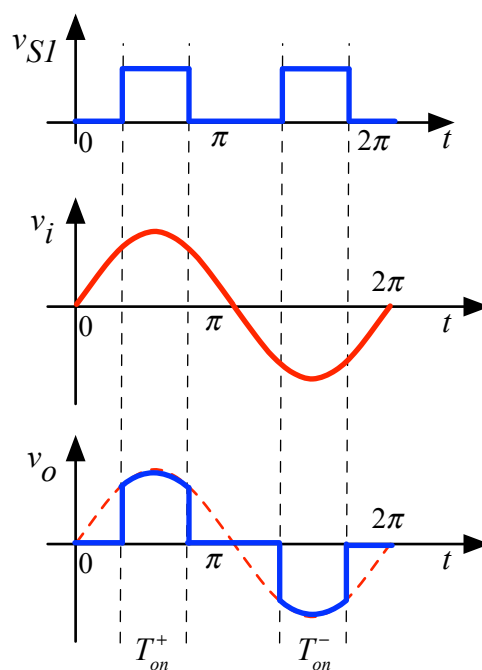


Figura 18 – Formas de onda do conversor ca-ca simples operando com controle por modulação por largura de pulsos (PWM).

## 3 Conversor CA-CA Básicos

### 3.1 Introdução

Os conversores ca-ca básicos que serão estudados são:

- Conversor ca-ca com tiristor e controle por ângulo de fase;
- Conversor ca-ca com tiristor e controle por ciclos inteiros;
- Conversor ca-ca com transistores e modulação PWM.

Neste curso serão estudados os três conversores básicos listados acima, pois estes sintetizam o funcionamento dos diversos conversores ca-ca.

### 3.2 Conversor CA-CA com Tiristor e Controle por Ângulo de Fase

A Figura 19 mostra o conversor ca-ca com tiristores, que pode utilizar SCRs ou TRIAC. Este conversor é abaixador de tensão e tem quatro etapas de funcionamento para operação com controle por ângulo de fase, sendo duas em cada período, que são:

- Primeira etapa (0 até  $\alpha$ ) - os tiristores  $T_1$  e  $T_2$  estão bloqueados, isto é, abertos. A tensão de saída ( $v_o$ ) e a corrente são iguais a zero;
- Segunda etapa ( $\alpha$  até  $\pi$ ) - o tiristor  $T_1$  é comandado a conduzir, ou seja, está diretamente polarizado e poderá entrar em condução. A tensão de saída ( $v_o$ ) é igual a da entrada ( $v_i$ ). A corrente na carga é sua tensão dividida pela resistência;
- Terceira etapa ( $\pi$  até  $\pi + \alpha$ ) - os tiristores  $T_1$  e  $T_2$  estão bloqueados, isto é, abertos. A tensão de saída ( $v_o$ ) e a corrente são iguais a zero;
- Quarta etapa ( $\pi + \alpha$  até  $2\pi$ ) - o tiristor  $T_2$  é comandado a conduzir, ou seja, está diretamente polarizado e poderá entrar em condução. A tensão de saída ( $v_o$ ) é igual a da entrada ( $v_i$ ). A corrente na carga é sua tensão dividida pela resistência.

As principais formas de onda do conversor ca-ca operando com controle por ângulo de fase são mostradas na Figura 20. As principais características do controle por ângulo de fase são:

- Controle contínuo da tensão de saída;
- Presença de conteúdo harmônico (THD) na corrente solicitada da rede, que poderá interferir no funcionamento de outras cargas conectadas no mesmo ponto. Este efeito pode ser minimizado utilizando filtros de entrada no conversor.

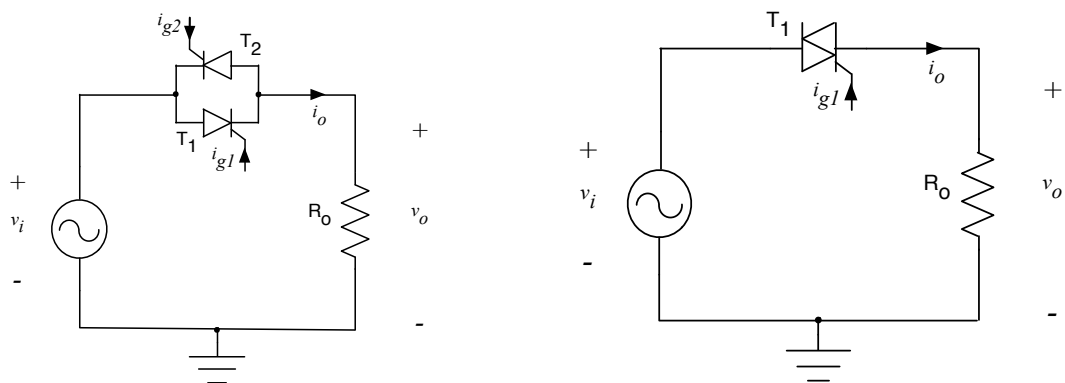


Figura 19 – Conversor ca-ca com tiristores e controle por ângulo de fase.

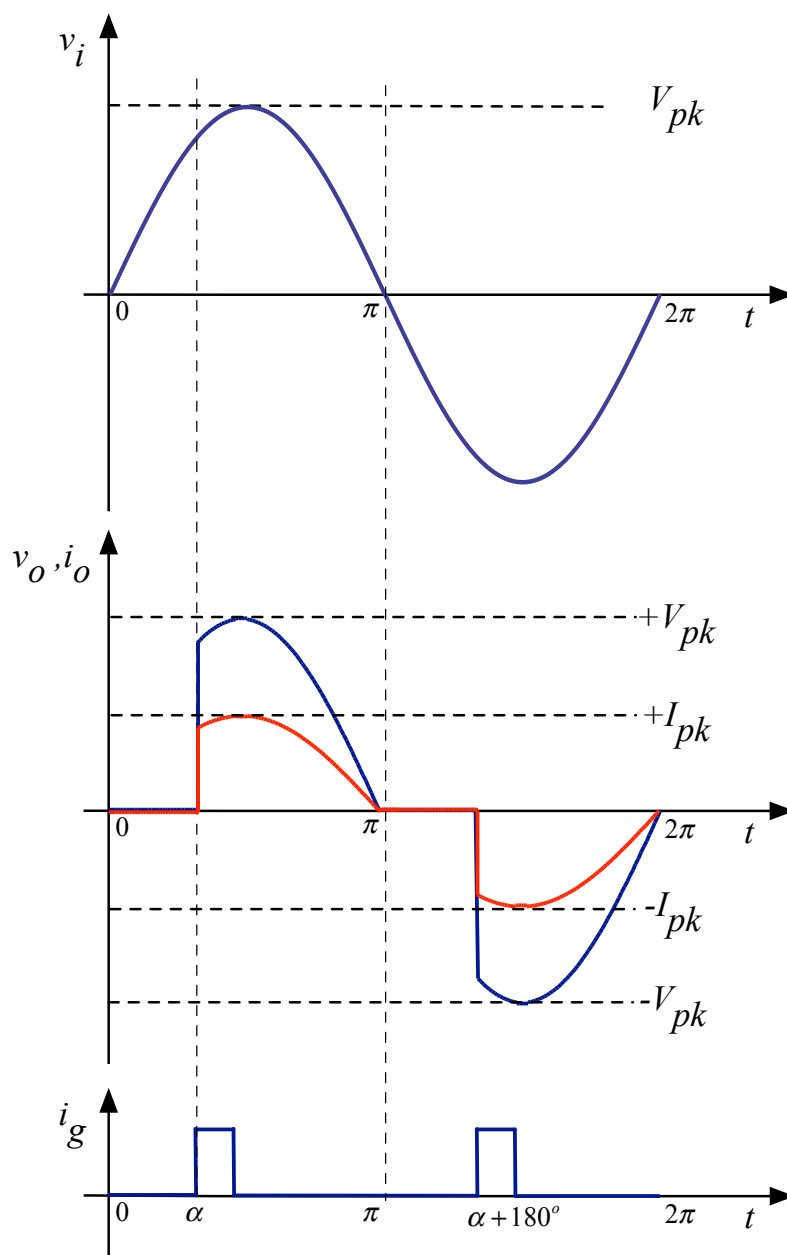


Figura 20 – Principais formas de onda do conversor ca-ca com tiristores e controle por ângulo de fase.



A tensão de entrada é definida tendo a seguinte expressão matemática:

$$v_{i(t)} = V_{i(pk)} \cdot \text{seno}(\omega \cdot t \pm \phi)$$

Onde:

$$V_{i(ef)} = \frac{V_{i(pk)}}{\sqrt{2}} \rightarrow \text{tensão eficaz}$$

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

$$\phi \rightarrow \text{ângulo de defasagem}$$

A tensão da rede será utilizada como referência, então sua defasagem será nula. No Brasil a frequência da rede de energia elétrica (F) é de 60 Hz.

A tensão eficaz de saída é dada por:

$$V_{o(ef)} = V_{i(ef)} \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\text{seno}(2 \cdot \alpha)}{2 \cdot \pi}}$$

Por sua vez, a tensão de pico na saída será:

$$V_{o(pk)} = \begin{cases} V_{i(pk)} \rightarrow 0 \leq \alpha \leq 90^\circ \\ V_{i(pk)} \cdot \text{seno}(\alpha) \rightarrow 90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ \end{cases}$$

As correntes serão:

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

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

As tensões máximas sobre os interruptores serão:

$$V_{T1(\max)} = V_{T2(\max)} = V_{i(pk)}$$

### 3.3 Conversor CA-CA com Tiristor e Controle por Ciclos Inteiros

A Figura 21 mostra o conversor ca-ca com tiristores, que pode utilizar SCRs ou TRIAC, do mesmo modo que foi feito no conversor ca-ca com controle por ângulo de fase. Este conversor é abaixador de tensão e tem duas etapas de funcionamento para operação com controle por ciclos inteiros, que são:

- Primeira etapa (0 até  $T_{on}$ ) - os tiristor  $T_1$  e  $T_2$  são comandados a conduzir, ou seja, estarão fechados. A tensão de saída ( $v_o$ ) é igual a da entrada ( $v_i$ ). A corrente na carga é sua tensão dividida pela resistência;
- Segunda etapa ( $\alpha$  até  $\pi$ ) - os tiristores  $T_1$  e  $T_2$  estão bloqueados, isto é, abertos. A tensão de saída ( $v_o$ ) e a corrente são iguais a zero.

As principais formas de onda do conversor ca-ca operando com controle por ciclos inteiros são mostradas na Figura 22 e suas principais características são:

- Controle discreto da tensão de saída;
- Ausência de conteúdo harmônico (THD) de alta frequência na corrente solicitada da rede, visto as formas de onda serem senoidais;
- Presença do efeito de cintilamento ou cintilação, que ocorre quando os tiristores estiverem conduzindo e a corrente da carga provocará uma queda de tensão nas impedâncias da rede, fazendo com que a tensão na carga e em outras cargas conectadas no mesmo ponto sofra alteração quando da condução e bloqueio dos tiristores. Esse efeito pode provocar alteração na intensidade luminosa de lâmpadas conectadas no mesmo ponto da rede, fazendo com que os usuários percebam o mesmo.

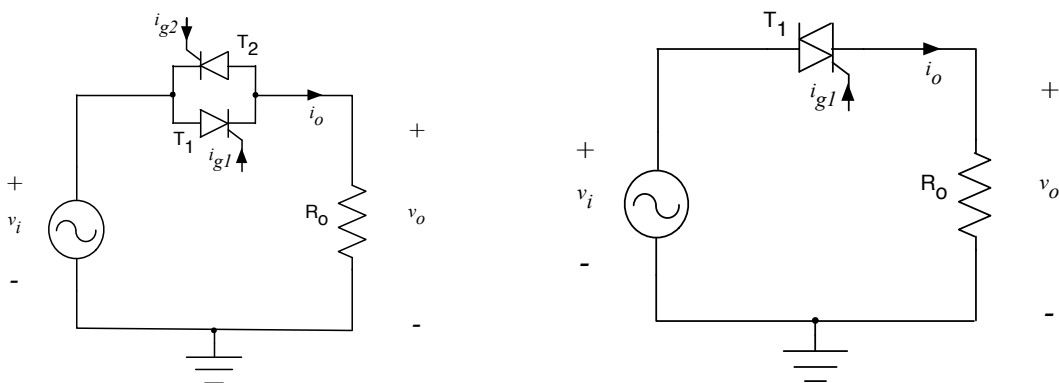


Figura 21 – Conversor ca-ca com tiristores e controle por ciclos inteiros.

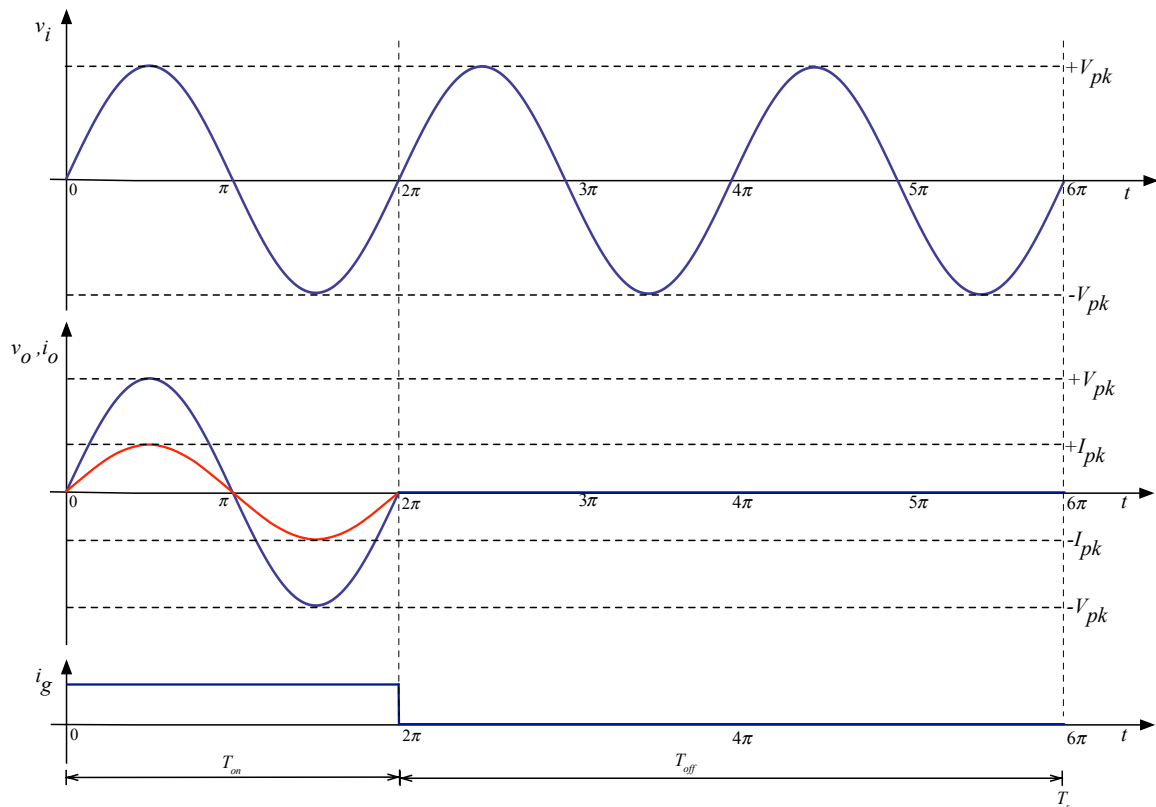


Figura 22 – Principais formas de onda do conversor ca-ca com tiristores e controle por ciclos inteiros.

A tensão de entrada é definida tendo a seguinte expressão matemática:

$$v_{i(t)} = V_{i(pk)} \cdot \text{seno}(\omega \cdot t \pm \phi)$$

Onde:

$$V_{i(ef)} = \frac{V_{i(pk)}}{\sqrt{2}} \rightarrow \text{tensão eficaz}$$

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

$$\phi \rightarrow \text{ângulo de defasagem}$$

A tensão da rede será utilizada como referência, então sua defasagem será nula. No Brasil a frequência da rede de energia elétrica (F) é de 60 Hz.

A tensão eficaz de saída é dada por:

$$V_{o(ef)} = V_{i(ef)} \cdot \sqrt{\frac{m}{M}}$$

Por sua vez, a tensão de pico na saída será:

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

As correntes serão:

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

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

As tensões máximas sobre os interruptores serão:

$$V_{T1(max)} = V_{T2(max)} = V_{i(pk)}$$

### 3.4 Conversor CA-CA com Transistores e Modulação PWM

A Figura 23 mostra o conversor ca-ca com transistores, que pode utilizar BJT, MOSFET ou IGBT, por exemplo. Este conversor é abaixador de tensão do tipo Buck, semelhante ao conversor Buck cc-cc e tem duas etapas de funcionamento principais, desconsiderando-se aqui a estratégia de comando dos interruptores para evitar curto-circuito da fonte e/ou interrupção da corrente de carga. Estas etapas são:

- Primeira etapa (0 até  $D \cdot T_s$ ) - o conjunto de interruptores  $S_1/D_1$  e  $S_2/D_2$  está comandado a conduzir, enquanto o conjunto  $S_3/D_3$  e  $S_4/D_4$  estará bloqueado. A tensão de entrada ( $v_i$ ) estará alimentando a carga e o armazenamento de energia no indutor ( $L_o$ ); a corrente no indutor cresce e a tensão após os interruptores e antes da filtragem ( $v_{ab}$ ) é igual a tensão de entrada;
- Segunda etapa ( $D \cdot T_s$  até  $T_s$ ) - o conjunto de interruptores  $S_1/D_1$  e  $S_2/D_2$  está bloqueado, enquanto o conjunto  $S_3/D_3$  e  $S_4/D_4$  está comandado a conduzir. A tensão de entrada ( $v_i$ ) estará desconectada do circuito; a corrente no indutor decresce e a tensão após os interruptores e antes da filtragem ( $v_{ab}$ ) é igual a zero. Esta é a etapa de roda-livre, equivalente a condução do diodo no conversor Buck cc-cc.

As principais formas de onda do conversor ca-ca com transistores e operando com modulação PWM são mostradas na Figura 24. As principais características do conversor Buck ca-ca

são:

- Controle contínuo da tensão de saída;
- Resposta rápida, permitindo a correção imediata (pequeno tempo) da tensão de saída;
- Necessidade de filtragem, pois a corrente e tensão são pulsadas;
- Possibilidade de alterar a forma de onda da saída utilizando modulações modificadas, por exemplo;
- Estrutura compacta, pois pode operar em alta frequência, permitindo a redução dos elementos de filtragem.

A tensão de entrada é definida tendo a seguinte expressão matemática:

$$v_{i(t)} = V_{i(pk)} \cdot \text{seno}(\omega \cdot t \pm \phi)$$

Onde:

$$V_{i(ef)} = \frac{V_{i(pk)}}{\sqrt{2}} \rightarrow \text{tensão eficaz}$$

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

$$\phi \rightarrow \text{ângulo de defasagem}$$

A tensão da rede será utilizada como referência, então sua defasagem será nula. No Brasil a frequência da rede de energia elétrica (F) é de 60 Hz.

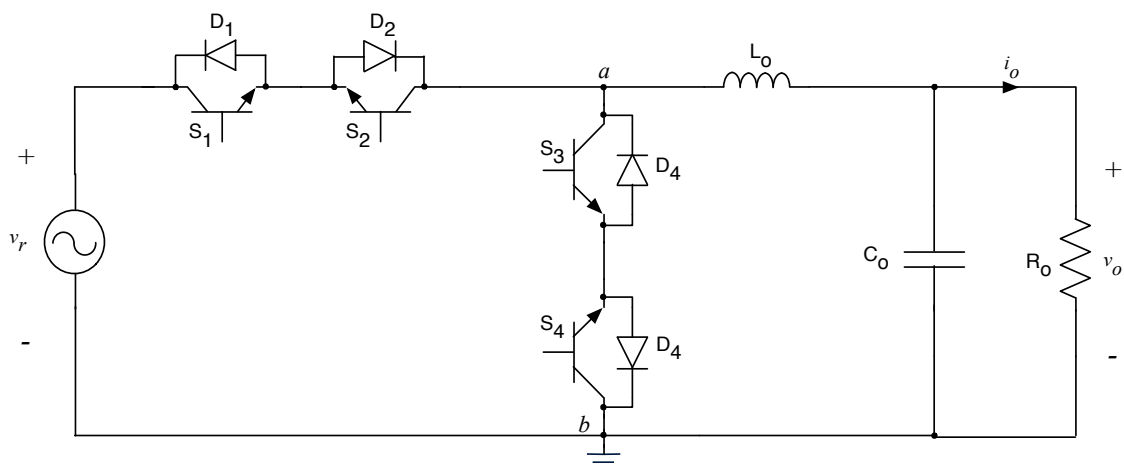


Figura 23 – Conversor ca-ca com transistores e modulação PWM.

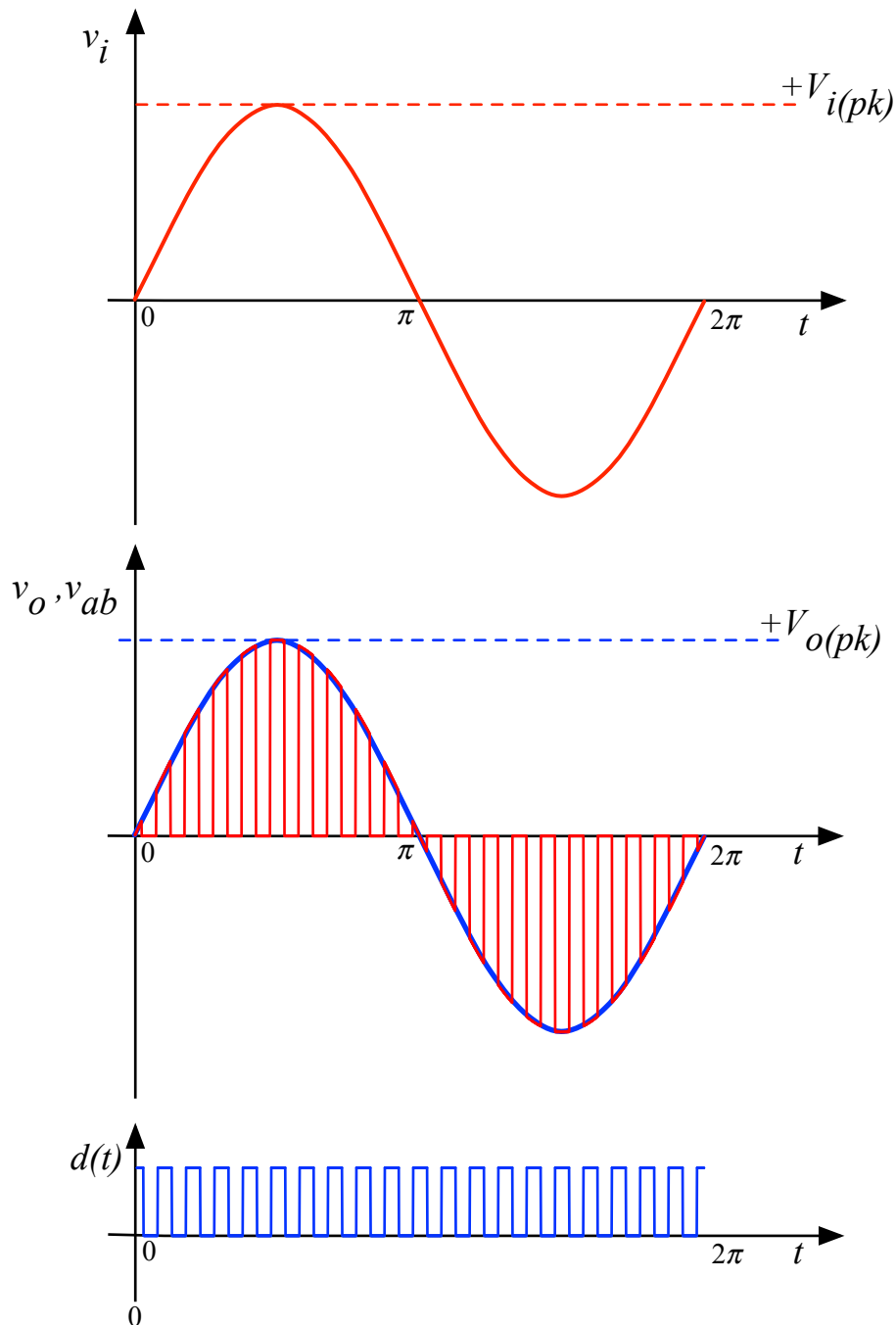


Figura 24 – Principais formas de onda do conversor ca-ca com transistores e modulação PWM.

A tensão eficaz de saída é dada por:

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

Note que esta expressão é idêntica ao conversor Buck cc-cc. O projeto do filtro de saída também é realizado de maneira semelhante ao conversor Buck cc-cc, considerando-se um ponto de operação específico da senóide de tensão, que será o pico desta tensão. Em outras palavras, o projeto do conversor é realizado como se fosse um conversor cc-cc operando no pico da tensão.

A tensão de pico na saída será:

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

As correntes serão:

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

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

As tensões máximas sobre os interruptores e diodos serão:

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

## 4 Estabilizadores de Tensão Alternada

### 4.1 Introdução

Os estabilizadores de tensão alternada tem uso frequente com diferentes tipos de cargas, por exemplo:

- 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.

É importante destacar que as faixas de tensão conforme Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST 2010 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) 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.

Em relação ao uso de estabilizadores de tensão, as cargas que possuem fontes de alimentação com tensão de entrada na faixa universal (180 V até 264 V) dispensam o uso de estabilizadores, pois estas fontes funcionam além da faixa precária definida pela ANELL, conforme mostrado anteriormente. Por outro lado, cargas sensíveis, por exemplo equipamentos de laboratório, que em caso de variação na tensão de entrada irão alterar os resultados das medidas ou ensaios destes equipamentos, necessitarão de estabilizadores de tensão. Deste modo, cabe ao profissional da área de eletroeletrônica orientar o usuário quanto ao uso ou não de estabilizadores de tensão. O mesmo acontece com equipamentos de alto valor agregado, como por exemplo, equipamentos de áudio e vídeo, que podem ter custos de milhares de reais ou dólares. Neste caso se utilizam condicionadores de tensão, para proteger os equipamentos e/ou disponibilizar aos mesmos uma tensão senoidal pura. Alguns exemplos de estabilizadores de tensão alternada são mostrados na Figura 25.



<https://www.se.com>



<https://www.engeblu.com.br>



<https://www.zael.com.br>

Figura 25 – Exemplos de estabilizadores comerciais.

Assim, as tecnologias de estabilizadores de tensão podem utilizar relés, tiristores ou transistores rápidos, que serão abordadas brevemente a seguir.

## 4.2 Estabilizador de Tensão Alternada com Relés

A Figura 26 mostra um estabilizador de tensão alternada com relés. Esta topologia utilizada um autotransformador com três saídas; este conversor também é conhecido como estabilizador com tap variável. A tensão de saída é definida a partir da seleção da saída (tap) desejado. Assim, se tem as seguintes possibilidades:

- Tap 1 - a tensão de saída será a tensão de entrada menos a tensão no secundário 2, ou seja, nesta seleção o conversor abaixa a tensão de entrada;
- Tap 2 – a tensão de saída será igual a tensão de entrada;



- Tap 3 – a tensão de saída será a tensão de entrada mais a tensão no secundário 3, ou seja, nesta posição o conversor opera como elevador de tensão.

As principais formas de onda para o estabilizador de tensão alternada com relés são mostradas na Figura 27.

A partir da tensão de entrada que é conhecida/definida, se tem que a tensão de saída será:

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

Vale destacar que os problemas de comutação que foram discutidos no início deste capítulo devem ser levados em conta aqui, principalmente quando da operação com cargas com característica indutiva, como motores por exemplo.

Note que este conversor utiliza apenas dois relés, sendo muito simples e de fácil implementação, por isso ainda ser utilizado pela indústria.

O objetivo principal deste estabilizador será entregar na saída uma tensão com amplitude dentro da faixa adequada, conforme regulamente a ANEEL, isto é, se a rede de energia elétrica disponibilizar uma tensão na faixa precária, o estabilizador deve corrigir sua amplitude, aumentando ou diminuindo a tensão de saída para estar dentro da faixa adequada.

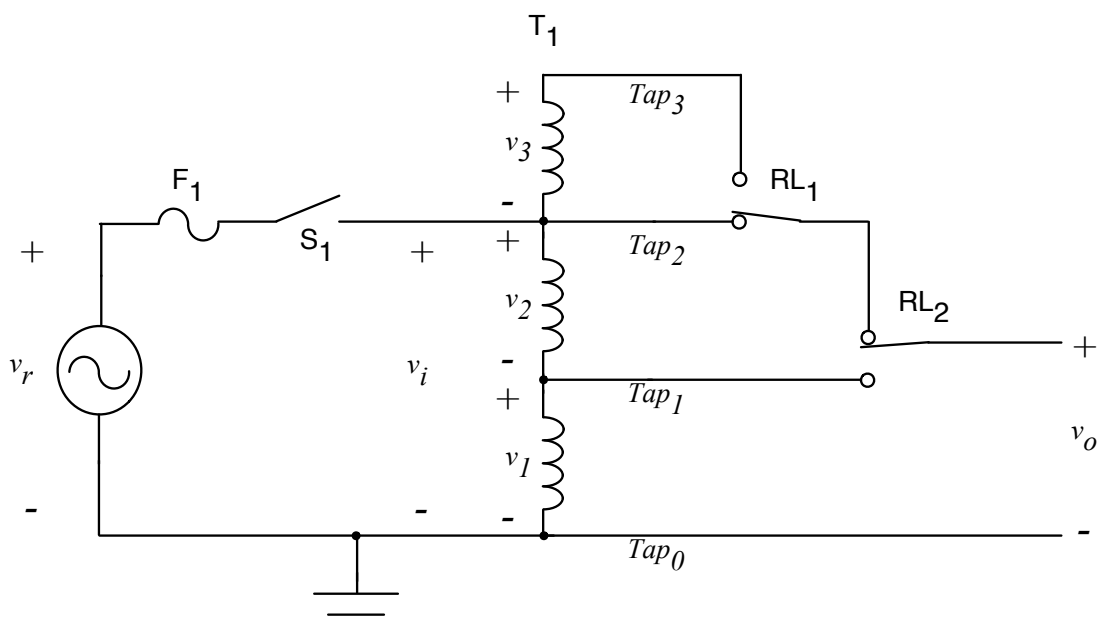


Figura 26 – Estabilizador de tensão alternada com relés.

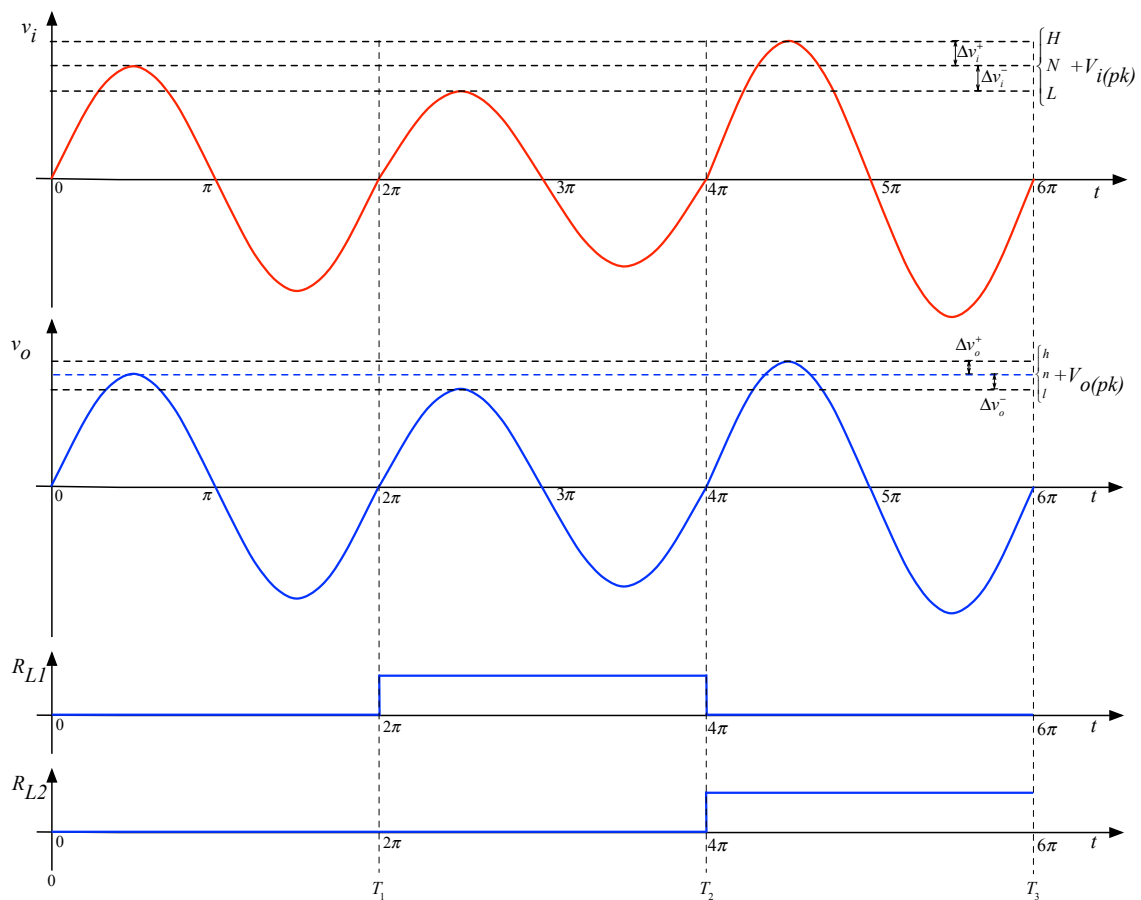


Figura 27 – Principais formas de onda do estabilizador de tensão com relés.

### 4.3 Estabilizador de Tensão Alternada com Tiristores

A Figura 28 mostra um estabilizador de tensão alternada com tiristores. O princípio de funcionamento deste conversor é semelhante ao estabilizador de tensão alteranda com relés, com a diferença que agora são os tiristores que conectam a carga na saída escolhida (tap selecionado) do autotransformador.

As principais formas de onda para o estabilizador de tensão alternada com tiristores são mostradas na Figura 29.

A partir da tensão de entrada que é conhecida/definida, se tem que a tensão de saída será:

$$v_o = \begin{cases} v_o = v_i \rightarrow T_3 \text{ e } T_4 \text{ on} \\ v_o = v_i + v_3 \rightarrow T_1 \text{ e } T_2 \text{ on} \\ v_o = v_i - v_2 \rightarrow T_5 \text{ e } T_6 \text{ on} \end{cases}$$

Novamente se destaca que os problemas de comutação que foram discutidos no início deste capítulo devem ser levados em conta aqui, principalmente quando da operação com cargas com característica indutiva, como motores por exemplo.

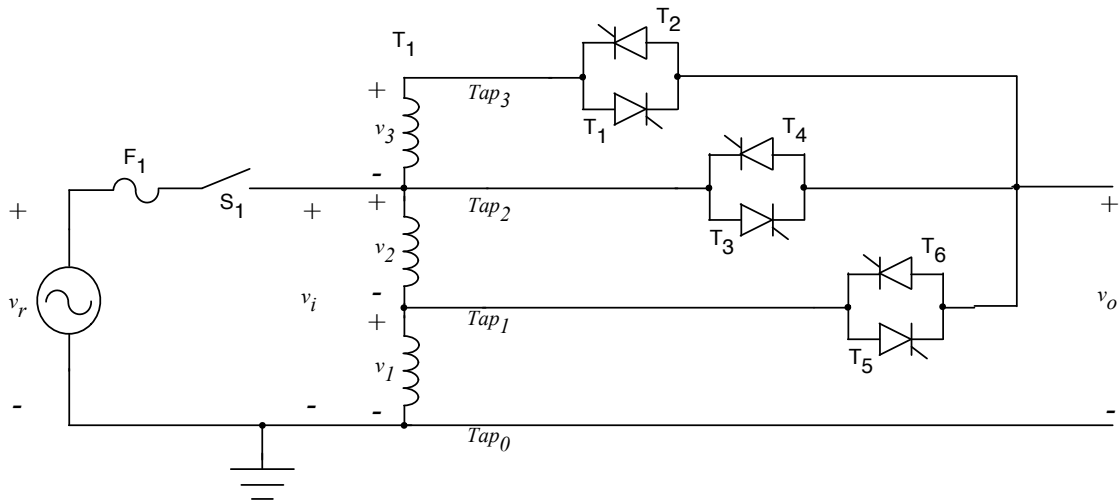


Figura 28 – Estabilizador de tensão alternada com tiristores.

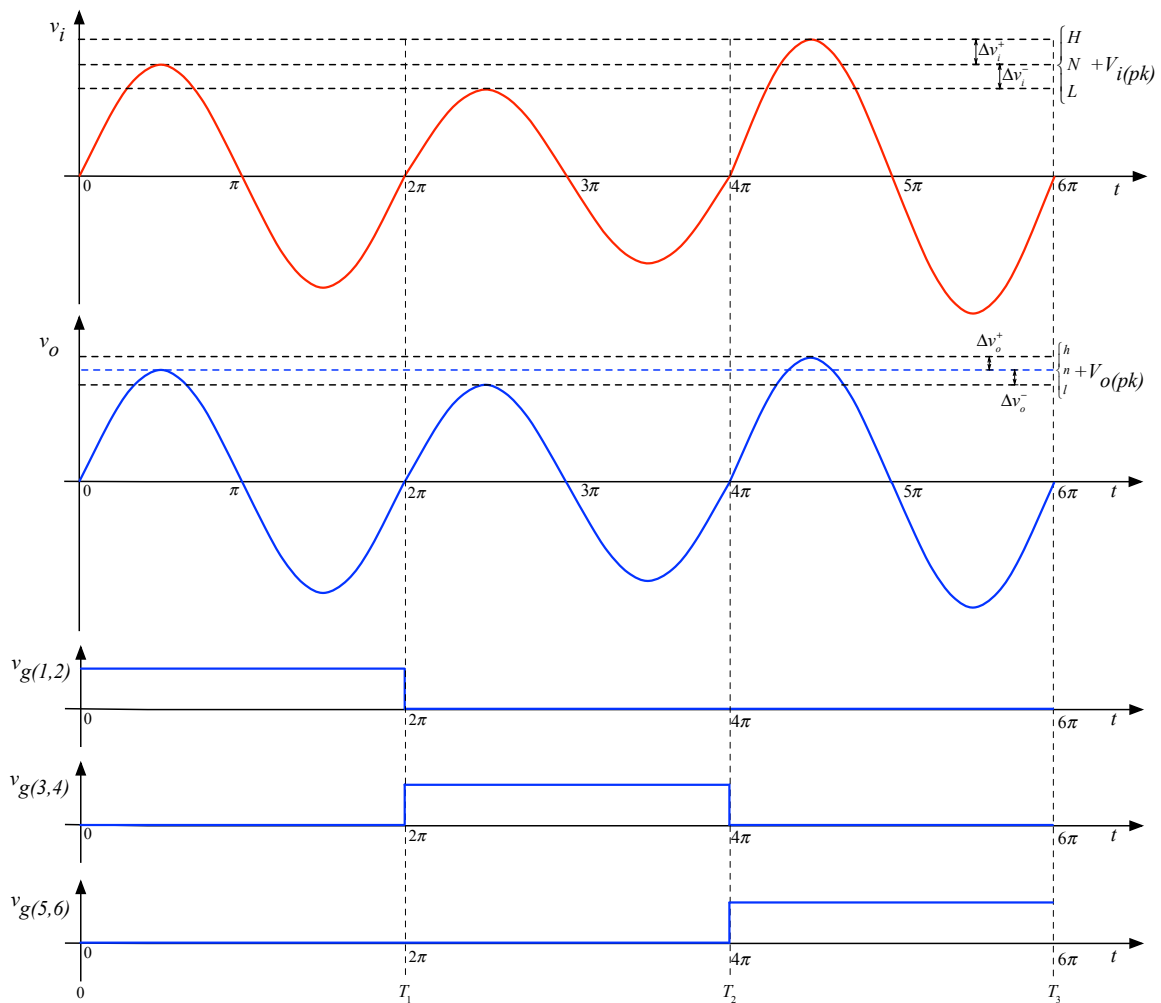


Figura 29 – Principais formas de onda do estabilizador de tensão com tiristores.

## 4.1 Estabilizador de Tensão Alternada com Transistores

O conversor mostrado na Figura 23 pode ser utilizado na função de estabilizador de tensão alternada, neste caso abaixador de tensão.

A tensão de saída será:

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

As principais formas de onda do estabilizador de tensão alternada com transistores e modulação PWM são mostradas na Figura 30, onde se mostram os detalhes para diferentes razões cíclicas, destacando que a tensão de saída permanece com o mesmo valor para distintos valores na tensão de entrada. O estabilizador de tensão alternada com transistores e modulação PWM é mais complexo que os conversores com relés e tiristores, mas pode disponibilizar na saída uma tensão com erro menor que 1%, ou seja, pode ser projetado para garantir uma tensão de saída com valor exato igual ao desejado.

Os demais conversores cc-cc estudados anteriormente também admitem a operação em tensão alteranda, substituindo-se os interruptores pelos seus conjuntos bidirecionais em tensão e e corrente. Assim, podem ser implementados conversores ca-ca abaixadores e elevadores de tensão, utilizando os conversores Buck e Boost, e no caso do Buck-Boost, abaixadores e elevadores na mesma estrutura.

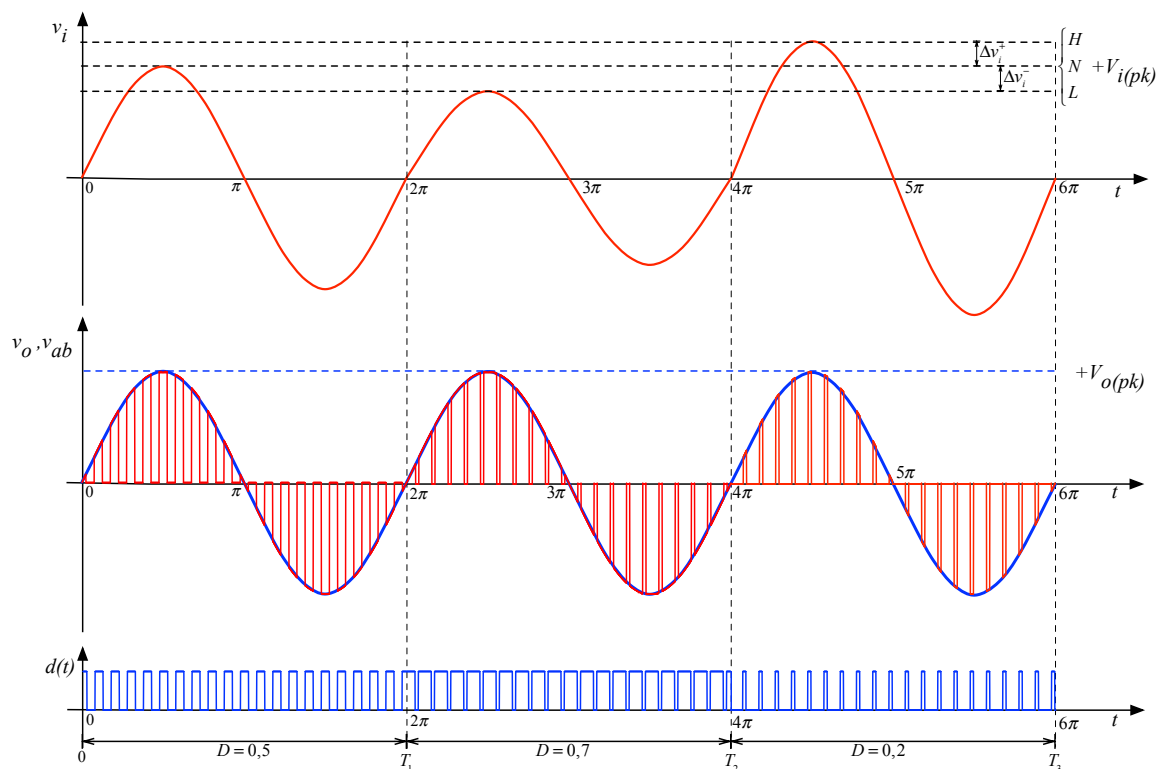


Figura 30 – Principais formas de onda do estabilizador de tensão com transistores.

## 5 Exercícios

### Exercícios Resolvidos

**ER 01.** Cite duas tecnologias de interruptores utilizadas em conversores ca-ca?

Tiristores e transistores.

**ER 02.** Calcule a tensão de saída de um conversor ca-ca com tiristores e controle por ângulo de fase, para entrada em 220 V e ângulo de disparo de 45 graus.

A tensão de saída será:

$$V_{o(ef)} = V_{i(ef)} \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\text{seno}(2 \cdot \alpha)}{2 \cdot \pi}} = 220 \cdot \sqrt{1 - \frac{\left(\frac{45 \cdot \pi}{180}\right)}{\pi} + \frac{\text{seno}(2 \cdot 45)}{2 \cdot \pi}} = 200V$$

**ER 03.** Calcule a tensão de saída de um conversor ca-ca com tiristores e controle por ciclos inteiros, para entrada em 220 V e 3 ciclos ligados de um total de 5 ciclos.

A tensão de saída será:

$$V_{o(ef)} = V_{i(ef)} \cdot \sqrt{\frac{m}{M}} = 220 \cdot \sqrt{\frac{3}{5}} = 170,4V$$

**ER 04.** Calcule a tensão de saída de um conversor Buck ca-ca com tensão de entrada de 220 V eficazes e razão cíclica de 50%.

A tensão de saída será:

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

**ER 05.** Cite cargas onde se torna necessário o uso de estabilizadores de tensão.

Os estabilizadores de tensão alternada são utilizados com cargas sensíveis, equipamentos de áudio e vídeo de alto custo, equipamentos de laboratórios, dentre outras.

### Exercícios Propostos

**EP 01.** Cite duas tecnologias de interruptores utilizadas para implementar conversores ca-ca.

**EP 02.** Calcule a tensão de saída de um conversor ca-ca com tiristores e controle por ângulo de fase, para entrada em 220 V e ângulo de disparo de 90 graus.

**EP 03.** Calcule a tensão de saída de um conversor ca-ca com tiristores e controle por ciclos inteiros, para entrada em 220 V e 2 ciclos ligados de um total de 5 ciclos.

**EP 04.** Calcule a tensão de saída de um conversor Buck ca-ca com tensão de entrada de 220 V eficazes e razão cíclica de 35%.

**EP 05.** Cite algumas características ou vantagens de estabilizadores de tensão utilizando transistores e modulação PWM.

## 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.** O que é um estabilizador de tensão alternada?

**AA 02.** Calcule a tensão de saída de um conversor ca-ca com tiristores e controle por ângulo de fase, para entrada em 220 V e ângulo de disparo de 180 graus.

**AA 03.** Calcule a tensão de saída de um conversor ca-ca com tiristores e controle por ciclos inteiros, para entrada em 220 V e 5 ciclos ligados de um total de 5 ciclos.

**AA 04.** Calcule a tensão de saída de um conversor Buck ca-ca com tensão de entrada de 110 V eficazes e razão cíclica de 50%.

**AA 05.** Cite uma vantagem e uma desvantagem dos conversores ca-ca com controle por ângulo de fase.

AA 01. Estabilizador de tensão é um conversor ca-ca que é utilizado para alimentar cargas sensíveis, por exemplo. AA 02. Neste caso a tensão de saída será zero, pois os tiristores nunca irão entrar em condução. AA 03. A tensão de saída será  $V_o = V_i \times \text{raiz}\left(\frac{m}{m}\right) = 220 \times \text{raiz}\left(\frac{5}{5}\right) = 220 \text{ V}$ . AA 04. A tensão de saída será  $V_o = V_i \times D = 110 \times 0,5 = 55 \text{ V}$ . AA 05. Uma vantagem do controle por ângulo de fase é que a tensão de saída pode ser variada continuamente alterando o ângulo de disparo dos tiristores. Uma desvantagem é a presença de conteúdo harmônico de alta frequência na corrente solicitada da rede, que pode afetar outras cargas conectadas no mesmo ponto.